

**Система электронного обучения управлению процессами  
получения твёрдых сплавов**

Корниенко И.Г., д.т.н. проф. Чистякова Т.Б., к.т.н. доц. Новожилова И.В.  
Санкт-Петербургский государственный технологический институт  
(технический университет)  
8(812)494-92-25

*Аннотация.* В работе рассматривается синтез системы электронного обучения, позволяющей исследовать и управлять процессами получения твёрдых сплавов, представлены результаты научных исследований процессов синтеза твёрдых сплавов, на базе которых разработана модель спекания твёрдых сплавов, структура библиотеки математических моделей, разработана система электронного обучения управлению процессами получения твёрдых сплавов.

*Ключевые слова:* исследование и управление, процесс синтеза твёрдых сплавов, библиотека математических моделей, nanoиндустрия

В условиях интенсивного развития инновационных предприятий и формирования промышленных корпораций, требующих унифицированных специалистов международного уровня все более актуальным становится вопрос качественной подготовки промышленного производственного персонала с целью получения новых научных знаний по организации высокотехнологичных производств на современном уровне. Например, в производстве твёрдых сплавов, как и в любой другой высокотехнологичной отрасли, ассортимент, уровень эксплуатационных характеристик и качество производимой продукции, а также уровень научных исследований, направленных на создание новых видов материалов и инновационных технологических процессов, в решающей степени определяется квалификацией кадров. При этом важно отметить проблему дефицита специалистов, способных в соответствии с требованиями профессиональных стандартов эффективно управлять качеством продукции, перенастраивать производство на новый тип и требования к качеству получаемых материалов, понимать и учитывать основные закономерности превращения сырья в продукцию. В то же время отсутствует системный подход к решению задач разработки средств обучения, максимально приближенных к потребностям современного рынка труда и своевременной подготовки/переподготовки специалистов инновационных предприятий, производящих высокотехнологичные материалы.

Одним из эффективных способов комплексного решения указанных проблем является создание практико-ориентированных обучающих систем, позволяющих с использованием дистанционных образовательных технологий проводить своевременное повышение квалификации и переподготовку производственного персонала [1].

Жизненный цикл создания практико-ориентированных обучающих систем на основе когнитивных технологий включает следующие этапы:

– анализ квалификационных дефицитов (трудовых функций, умений, знаний) специалистов инновационных предприятий и их преобразования в специальные профессиональные компетенции, позволяющие работникам выполнять трудовые функции в рамках нового или существенно обновленного вида трудовой деятельности;

– формирование траектории и содержания электронного обучения на базе модульной технологии профессионального обучения с учетом должностных инструкций и трудовых функций производственного персонала инновационных предприятий;

– разработка методов, алгоритмов и технологий синтеза практико-ориентированных обучающих систем, включающих адаптируемые подсистемы имитационного моделирования для проектирования и управления процессами получения высокотехнологичных материалов различного функционального назначения, базы данных (БД) сырьевых материалов, агрегатов, технологических регламентов и параметров, требований к качеству материалов, базы

знаний (БЗ) нестандартных ситуаций, связанных с браком продукции;

– апробация электронного обучения путем синтеза компьютерных тренажеров для производственного персонала процессов получения высокотехнологичных материалов различного функционального назначения;

– обработка результатов (протоколов) обучения производственного персонала на основе использования методов качественной и количественной оценки приобретенных обучаемыми специальными профессиональными компетенций, необходимых для выполнения ими своих трудовых функций.

Проследим весь жизненный цикл создания обучающих систем на примере системы электронного обучения управлению процессами производства твердых сплавов.

Процесс получения твердых сплавов является многостадийным (рисунок 1). Он включает получение порошков компонентов сплава, их измельчение, просеивание, приготовление смеси (порошки смешивают в количествах, соответствующих химическому составу сплава), прессование и спекание.

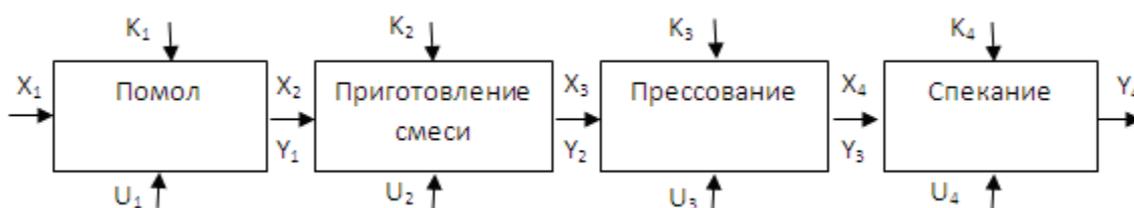


Рисунок 1. Процесс получения твердых сплавов

Спекание – наиболее важный и сложный этап технологии твердых сплавов, так как под воздействием высоких температур в ходе физико-химических процессов формируются окончательные свойства: состав, структура, форма и размеры зерен сплавов, – а брак спеченных изделий практически неустраним. Ключевыми стадиями спекания являются подъем температуры – нагрев материала (неизотермическое спекание), и выдержка материала при постоянной температуре (изотермическая выдержка).

В процессе спекания наблюдаются два конкурирующих массообменных процесса: уменьшение пор (усадка) и рост зерен. Усадка способствует повышению плотности твердого сплава, а рост зерен приводит к ухудшению его физико-механических свойств, наилучшие значения которых (повышенная твердость, прочность на изгиб, устойчивость к истиранию – прочность микроструктуры) наблюдаются при малом размере зерна, соответствующем зерногетерофазному уровню структуры материала. Процессами усадки материала и роста зерен можно управлять. Изменяя режимные параметры (температуру и время спекания, скорость нагрева, давление в печи), можно получать различный размер зерен и различные значения свойств твердого сплава. Поэтому определение рациональных режимов спекания с целью достижения заданных свойств твердых сплавов составляет основную задачу в технологии твердых сплавов.

Однако в настоящее время управление производством базируется на эмпирическом подходе, при котором получение твердых сплавов с заданными свойствами представляет собой скорее искусство, чем результат научной и инженерной работы. Поэтому актуально создание системы электронного обучения, интегрирующей ММ, экспертные данные процесса спекания и позволяющей сформировать у обучаемых (операторов процесса) навыки управления качеством изготавливаемых твердых сплавов.

Для реализации системы электронного обучения необходимо формализованное описание производства как объекта изучения (ОИ) на базе структурно-лингвистической модели представления знаний об объекте, описываемой в виде фрейма (рисунок 2), компонентами которого являются списки атрибутов  $Q$  и их характеристик  $A$ :  $Fr ::= \langle ОИ, Q, A \rangle$ ,  $Q = \{q_1, \dots, q_9\}$ ,  $A = \{a_{1.1}, \dots, a_{9.2}\}$ , где  $q_1$  – иерархический уровень (аппарат, поток, стадия,

процесс в целом);  $q_2$  – особенности аппаратно-технологического оформления (характер протекания процесса во времени, особенности структуры потоков, типы оборудования);  $q_3$  – режимы функционирования (аварийные, предаварийные, эксплуатационные, оптимальные);  $q_4$  – характеристика режимов функционирования в зависимости от производительности;  $q_5$  – характеристика режимов функционирования в зависимости от состава сырья;  $q_6$  – характеристика качества целевой продукции;  $q_7$  – характеристика контролируемых и неконтролируемых возмущающих воздействий;  $q_8$  – характеристика технологических параметров объекта;  $q_9$  – характеристика системы отображения информации.



**Рисунок 2. Информационная структура фрейма производства твёрдых сплавов**

Для обучения управлению процессом производства твёрдых сплавов используются информационные модели, имитационные ММ и модели представления знаний (МПЗ).

Информационные модели реализуются в виде БД геометрических моделей и конструктивных характеристик производственных агрегатов, технологических параметров процессов, характеристик сырьевых материалов и целевой продукции. БД настраиваются на различные структуры объекта изучения, режимы его функционирования, производительность, состав сырья и качество продукции путем динамического изменения диапазонов соответствующих параметров.

Имитационные ММ обеспечивают возможности активного обучения при решении различных задач обучения: обучение управлению в нештатных ситуациях и при перенастройке производства на новое задание по сырью и производительности, изучение способов и задач оптимального управления, изучение причинно-следственных связей в объекте, обучение структурному и параметрическому синтезу объекта изучения и осуществление поверочных расчетов спроектированных объектов.

Анализ процесса спекания как объекта моделирования позволил разработать его формализованное описание, которое представлено на рисунке 3.

На рисунке 3 использованы следующие обозначения:  $X_i$ ,  $U_i$ ,  $Y_i$  – векторы входных параметров, управляющих воздействий и выходных параметров  $i$ -й стадии процесса ( $i = 1, 2$ );  $P_0$  – начальная пористость материала, %;  $L_0$  – начальный средний размер зерна материала, м;  $\delta$  – толщина поверхностного слоя зерна материала, м;  $\rho_0$  – плотность компактного (беспори-

стого) материала,  $\text{кг/м}^3$ ;  $\sigma$  – удельная поверхностная энергия материала,  $\text{Дж/м}^2$ ;  $T_k$  – температура спекания,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $\tau_1$  – время неизотермического спекания, с;  $\Pi_i$ ,  $L_i$  – пористость (%) и средний размер зерна (м) на  $i$ -й стадии процесса;  $\eta_0$  – вязкость компактного материала,  $\text{Па}\cdot\text{с}$ ;  $\tau_2$  – время изотермической выдержки, с;  $P_g$  – давление инертного газа вокруг материала,  $\text{Па}$ ;  $Q$  – вектор показателей качества твердого сплава;  $\Pi_p$ ,  $L_p$ ,  $\rho_p$ ,  $S_V$  – остаточная пористость (%), средний размер зерна (м), плотность ( $\text{кг/м}^3$ ) и степень объемной усадки ( $\text{м}^3$ ) сплава.



**Рисунок 3. Формализованное описание процесса спекания как объекта моделирования**

Анализ теоретических и экспериментальных исследований российских и зарубежных ученых [2 – 4] позволил предложить базовую ММ процесса спекания в производстве твердых сплавов, настраиваемую на различные типы материалов. При построении модели приняты следующие допущения:

- уплотнение материала на стадии спекания в вакууме осуществляется по механизму диффузионно-вязкого течения, сопровождающегося термически активируемым проскальзыванием вдоль границ зерен, когда объем пор уменьшается вследствие поглощения пустоты внутренними стоками вакансий, роль которых выполняют межзеренные границы;

- уплотнение на стадии спекания под давлением (в условиях всестороннего сжатия) осуществляется по механизму вязкого течения;

- при реологическом описании пористой структуры используется матричная модель пористого тела по Макензи, в соответствии с которой фаза пустоты локализована в ансамбле невзаимодействующих равновеликих шарообразных пор, отстоящих друг от друга настолько далеко, что пористый материал может быть представлен состоящим из элементов, каждый из которых включает пору, окруженную слоем несжимаемого вещества;

- рост зерен происходит за счет термически активируемой диффузионной коалесценции частиц, которая заключается в перераспределении вещества поверхности (адатомов) мелких частиц по поверхности более крупных под действием поверхностной самодиффузии (диффузии, локализованной в поверхностном слое толщиной в один атомный диаметр  $\delta$ );

- температура не изменяется по объему внутривспечного пространства, так как по данным производства градиент температуры по объему печи не превышает  $\pm 3,5^{\circ}\text{C}$  при температурном диапазоне спекания  $800 - 1600^{\circ}\text{C}$ ;

- скорость нагрева внутривспечного пространства постоянна;

- температура материала равна температуре внутривспечного пространства.

Модель описывает ключевые стадии процесса: неизотермическое спекание в вакууме и изотермическую выдержку под давлением и позволяет рассчитать изменяющиеся во времени  $t$  характеристики (пористость, средний размер зерна) спекаемого материала и показатели качества (остаточную пористость, средний размер зерна, плотность, усадку) твердого сплава [5, 6].

Система уравнений математического описания стадии неизотермического спекания в вакууме включает:

– уравнения кинетики уплотнения материала

$$\frac{d\Pi_1}{dt} = -\frac{D_b \cdot \delta^4 \cdot \sigma}{L_1^4 \cdot k \cdot (T_1 + 273)} \cdot \Pi_1, \quad D_b = D_{b0} \cdot e^{-\frac{E_b}{R \cdot (T_1 + 273)}}, \quad 0 < t \leq \tau_1;$$

– уравнения кинетики роста зерен материала

$$\frac{dL_1}{dt} = \frac{8 \cdot R \cdot D_s \cdot \delta^4 \cdot \sigma}{L_1^3 \cdot k \cdot E_s} \cdot \left[ 1 + \frac{E_s}{R \cdot (T_1 + 273)} \right], \quad D_s = D_{s0} \cdot e^{-\frac{E_s}{R \cdot (T_1 + 273)}}, \quad 0 < t \leq \tau_1;$$

– уравнение кинетики роста температуры  $T_1$  в печи

$$dT_1/dt = w_T, \quad 0 < t \leq \tau_1;$$

– начальные условия

$$\Pi_1|_{t=0} = \Pi_0, \quad L_1|_{t=0} = L_0, \quad T_1|_{t=0} = T_0.$$

Система уравнений математического описания стадии изотермической выдержки под давлением включает:

– уравнения кинетики уплотнения материала

$$d\Pi_2/dt = -(P_c + P_g) \cdot (100 - \Pi_2) / \chi, \quad P_c = 0,02 \cdot \Pi_2 \cdot \sigma / R_p, \quad \tau_1 < t \leq \tau_1 + \tau_2;$$

– реологическую модель пористого материала Макензи

$$\chi = 400 \cdot \eta \cdot (1 - 0,01 \cdot \Pi_2) / (3 \cdot \Pi_2), \quad \eta = \eta_0 \cdot (1 - 0,01 \cdot \Pi_2)^{5/3};$$

– уравнение кинетики роста зерен материала

$$dL_2/dt = 8 \cdot D_s \cdot \delta^4 \cdot \sigma / [L_2^3 \cdot k \cdot (T_k + 273)], \quad \tau_1 < t \leq \tau_1 + \tau_2;$$

– начальные условия

$$\Pi_2|_{t=\tau_1} = \Pi_1(\tau_1), \quad L_2|_{t=\tau_1} = L_1(\tau_1).$$

Показатели качества твердого сплава определяются соотношениями:

$$\Pi_p = \Pi_2(\tau_1 + \tau_2), \quad L_p = L_2(\tau_1 + \tau_2), \quad \rho_p = (1 - 0,01 \cdot \Pi_p) \cdot \rho_0, \quad S_V = (m / \rho_0) \cdot [1 - (1 - 0,01 \cdot \Pi_p)^{-1}].$$

В уравнениях модели использованы следующие обозначения:  $D_b, D_s$  – коэффициенты зернограницной диффузии и поверхностной самодиффузии,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  $k$  – постоянная Больцмана, Дж/К;  $D_{b0}, D_{s0}$  – предэкспоненциальные множители для коэффициентов диффузии,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  $R$  – универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·К);  $E_b, E_s$  – энергии активации процессов зернограницной диффузии и поверхностной самодиффузии, Дж/моль;  $w_T$  – скорость нагрева материала,  $^\circ\text{C}/\text{с}$ ;  $T_0$  – начальная температура в печи,  $^\circ\text{C}$ ;  $P_c$  – капиллярное (лапласовское) давление, Па;  $\chi, \eta$  – объемная и сдвиговая вязкости материала, Па·с;  $R_p = f[\Pi_1(\tau_1), \Pi_2]$  – текущий радиус поры, м;  $m$  – масса заготовки материала, кг.

Предлагаемая модель позволяет рассчитать показатели качества сплава  $Q = \{\Pi_p, L_p, \rho_p, S_V\}$  как функцию от характеристик материала  $H_M = \{\Pi_0, L_0, \delta, \rho_0, \sigma, \eta_0\}$  и управляющих воздействий на стадиях процесса  $U_i, i = 1, 2$ .

Функциональная структура системы электронного обучения, позволяющего решить задачу обучения управлению производством твердых сплавов, показана на рисунке 4. Функциональная структура создана на основе анализа структур и компонентов программного обеспечения систем управления различными химико-технологическими процессами [7, 8].

Обучаемый имеет доступ к подсистеме моделирования, позволяющей рассчитывать распределения характеристик спекаемого материала во времени, показатели качества сплава и отображать оператору результаты моделирования в виде 2D и 3D графиков, описывающих зависимости характеристик материала от времени и зависимости показателей качества сплава от управляющих воздействий.

Обучаемый может вводить тип материала, тип печи и значения управляющих воздействий на стадиях процесса.

Интерфейс администратора позволяет редактировать БД характеристик процесса спекания.



**Рисунок 4. Функциональная структура системы электронного обучения**

Разработанная на основе сформированной химико-технологической схемы система электронного обучения позволяет проводить изучение способов управления производством твёрдых сплавов на базе подсистемы имитационного моделирования. Использование ММ позволяет повысить эффективность процессов получения твёрдых сплавов за счёт улучшения характеристик технологического процесса (повышения производительности и качества продукции, снижения энерго- и материалоемкости, брака). Повышение эксплуатационных характеристик выпускаемой продукции обеспечивается за счет прогнозирования на базе ММ показателей качества продукта и формирования управляющих воздействий с целью компенсации возмущений, приводящих к отклонению качества от регламента. Включенные в состав системы ММ процессы синтеза твёрдых сплавов различного функционального назначения адаптивны к аппаратному оформлению, характеристикам сырья, виду конечной продукции.

Система электронного обучения прошла апробацию при изучении модуля (междисциплинарного курса) «Автоматизированная обработка информации и управление производством наноструктурированных керамических материалов и покрытий» в рамках повышения квалификации инженеров-технологов ООО «Вириал». Система электронного обучения внедрена и используется в учебном процессе, предоставляя возможность проводить лабораторные работы со студентами по исследованию структуры материала, изучению способов управления технологическим процессом на базе имитационных моделей, заполнению БД сырья, материалов, оборудования и т.д.

#### Литература

1. Чистякова Т.Б. Об опыте обучения производственного персонала инновационных промышленных предприятий [Электронный ресурс] Портал машиностроения. – Дата публ.:

- 16.10.2012. – Режим доступа: <http://mashportal.ru/career-26813.aspx>, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. рус.
2. Гостеев Ю.А., Федоров А.В. Математическое моделирование спекания ультрадисперсного порошка // Физика горения и взрыва. – 2004. – Т. 40, № 2. – с. 42 – 44.
  3. Kamnis S., Gu S., Lu T.J., Chen C. Computational simulation of thermally sprayed WC-Co powder // Computational materials science. – 2008. – Vol. 43. – P. 1172–1182.
  4. Савицкий А.П. Многоуровневое моделирование объемных изменений двухкомпонентных порошковых тел при спекании // Журн. техн. физики. – 2010. – Т. 80, вып. 3. – с. 63 – 68.
  5. Чистякова Т.Б., Корниенко И.Г., Орданьян С.С., Фищев В.Н., Полосин А.Н. Программный комплекс для имитационного моделирования процессов спекания в высокотехнологичных керамических производствах // Материалы науч.-практ. конф., посвящ. 184-й годовщине образования СПбГТИ(ТУ). – СПб. : СПбГТИ(ТУ), 2012. – с. 149 – 150.
  6. Корниенко И.Г. и др. Математическая модель для исследования усадки керамических материалов при диффузионном спекании // Неделя науки – 2013: сб. тез. III науч.-техн. конф. молодых ученых СПбГТИ(ТУ), 2–4 апр. 2013 г. – СПб. : Изд-во СПбГТИ(ТУ), 2013. – с. 166 – 167.
  7. Чистякова Т.Б., Бойкова О.Г., Чистяков Н.А. Интеллектуальное управление многоассортиментным коксохимическим производством. – СПб. : ЦОП «Профессия», 2010. – 187 с.
  8. Чистякова Т.Б. и др. Интеллектуальные системы технологического проектирования, управления и обучения в многоассортиментном производстве гранулированных пористых материалов из тонкодисперсных частиц. – СПб. : Изд-во СПбГТИ(ТУ), 2012. – 324 с.

### **Математическое моделирование процесса регенерации зернистого фильтрующего материала от нефтепродуктов**

Иванова А.А., Станиславская Ю.С., д.т.н. проф. Булатов М.А., Хаддад Дж.  
Университет машиностроения  
8 (499) 267-19-73  
[sashai0307@yandex.ru](mailto:sashai0307@yandex.ru)

*Аннотация:* Статья посвящена математическому моделированию процесса регенерации зернистого фильтроматериала от нефтепродуктов водным раствором ПАВ. Процесс регенерации производился в лабораторных условиях. Экспериментальные данные, характеризующие макрокинетику регенерации фильтра, были получены исходя из накопления частиц нефтяных фракций, выносимых из фильтра промывной жидкостью. По этим данным была построена кинетическая кривая изменения во времени средней толщины пленки загрязнения.

*Ключевые слова:* *поверхностно-активные вещества, скорый фильтр, поверхностное натяжение, модуль упругости пленки, явление Марангони, водонефтяные эмульсии*

#### **Введение**

Процесс регенерации зависит в первую очередь от того, что по своей природе представляет собой загрязняющее вещество, и от того, каким образом оно закреплено на поверхности зернистого материала. Механизм образования загрязняющего вещества на зерне фильтроматериала полностью не изучен и при различных условиях фильтрации происходит по-разному. Нефтепродукты сточных вод представляют собой смесь фракций нефти, образовавшихся при работе оборудования предприятия или автотранспорта. Нефтепродукты поступают на очистные сооружения в эмульгированном, деэмульгированном состоянии и сорбированные на частицах. Для удаления нефтепродуктов из очищаемой воды используются отстойники, оборудованные нефтеловушками. Часть нефтепродуктов из отстойников попадает