

СДВИГОВОЕ ДЕФОРМИРОВАНИЕ ПОРИСТЫХ ПОРОШКОВЫХ КОМПОЗИЦИЙ И СВС-ЭКСТРУЗИЯ

А.М.СТОЛИН, д-р физ.-мат. наук, проф.; Л.С.СТЕЛЬМАХ, д-р техн. наук



*Институт структурной макрокинетики
и проблем материаловедения РАН*



Институт проблем химической физики РАН

The results of the development of the process of SHS extrusion are presented. The created equipment for a realization of various variants of this method is circumscribed. The basic stages of the process are considered. The examples of practical applications of the method are given, the results of industrial trials of the tools hardened by SHS electrodes for electric spark alloying are represented. The various aspects of theoretical problems of SHS extrusion are considered.

Недостатком технологии порошковой металлургии является то, что в ней не находят широкого применения наиболее прогрессивные способы переработки, использующие сдвиговую пластическую деформацию материала и позволяющие объединить в едином цикле и синтез материала, и получение изделий из них. Эта негативная особенность порошковой металлургии имеет объективную причину. Порошки тугоплавких материалов чрезвычайно хрупкие и труднодеформируемые. В низкотемпературной области они разрушаются под действием механических напряжений без заметной или весьма малой (менее 5%) пластической деформации. Для сравнения отметим, что полимерные или резиновые материалы обладают высокой способностью деформироваться без разрушения под влиянием даже больших напряжений. Для этих объектов характерно явление вынужденной эластичности, когда деформация достигает сотен процентов.

Возникает вопрос: почему в технологическом плане важно использовать для порошковых материалов процесс сдвигового деформирования? Исчерпывающий ответ на этот вопрос получить весьма сложно, но, однако, упрощенно можно отметить следующее. Для технолога важно решить следующие две задачи: получить из порошков беспористый материал, т.е. уплотнить его; образовать соединение отдельных частиц порошка, т.е. сформовать материал. С учетом этого важно не только уплотнить материал, т.е. образовать физический контакт частиц, но и реализовать схватывание в зоне контакта. Поэто-

му не любой способ уплотнения хорош. Сейчас уже накоплено достаточно фактов для того, чтобы сделать вывод о ведущей роли сдвиговых деформационных процессов на контактных поверхностях, обусловливающих взаимодействие частиц. Поэтому не оптимальны такие методы порошковой металлургии, как прессование, изостатическое прессование, так как они основаны на закономерностях объемно-вязкого деформирования, при котором тангенциальные напряжения малы и не развиваются должным образом контактные явления.

Обнаружение в 1977 г. А.Г.Мержановым, И.П.Боровинской, В.М.Шкуро феномена твердофазного горения и создание новой технологии самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) позволило принципиально по-новому подойти к проблемам технологии получения изделий из порошков тугоплавких соединений. Появилась возможность разработки новых методов, сочетающих процессы горения и сдвигового пластического деформирования продуктов горения с использованием тепла этой реакции. Такие методы, обеспечивающие синтез материала и изготовление изделий в одной установке, экономичны, создают возможность получения изделий нужного профиля и размера с минимальной затратой материала, просты в технологическом плане.

Практически процесс сдвигового высокотемпературного деформирования в СВС может использоваться в двух направлениях: первое («синтетическое») связано с получением порошков и их соединений, второе – с получением после СВС полуфабрикатов или готовых изделий. При развитии этих направлений возникла необходимость в теоретическом анализе тепловых и деформационных процессов в пористых порошковых материалах, что позволило правильно понять закономерности высокотемпературного уплотнения и формования изделий из этих материалов.

В статье рассмотрены различные аспекты развития метода СВС-экструзии для получения длинномерных изделий из порошков тугоплавких материалов, в котором сочетаются процессы горения и сдвигового пластического деформирования продуктов горения.

Статья написана благодаря поддержке РФФИ (грант № 98-03-32110а)

Особенности технологического процесса СВС-экструзии

Сущность СВС-экструзии заключается в проведении самораспространяющегося высокотемпературного синтеза целевого продукта с последующим выдавливанием горячего синтезированного материала через матрицу. Основные стадии процесса следующие.

Зажигание и горение шихтовой заготовки. Локальным тепловым импульсом длительностью ~1 с инициируется волна горения, которая распространяется по всей шихтовой заготовке. Время горения определяется его скоростью, а также высотой заготовки и составляет обычно несколько секунд. На этой стадии происходят синтез материала из исходных компонентов и первичные процессы структурообразования.

Дегазация и остывание сгоревшей заготовки. Заканчивается отвод выделяющихся при горении примесных газов, проходят процессы дореагирования и формирования структуры целевого продукта. Материал остывает (от температуры горения до температуры выдавливания). Температура выдавливания выбирается ниже точки плавления металла-связки, чтобы избежать при экструзии его объемного перераспределения по образцу. В то же время температура выдавливания должна соответствовать температуре максимальной пластичности материала. Длительность этой стадии определяется массой заготовки и составляет несколько секунд.

Уплотнение синтезированного материала. Под действием пресса продукт деформируется, что сопровождается закрытием макропор и продолжением структурообразования, связанного с изменением размеров зерен твердой основы.

Выдавливание заготовки через матрицу. Материал доуплотняется в конусной части матрицы и экструдированная заготовка выталкивается через нее, при этом форма и размеры получаемых изделий определяются конфигурацией выходного сечения матрицы. Скорость выдавливания, как и скорость уплотнения, задается скоростью плунжера пресса и зависит от реологических свойств материала.

Остывание готового изделия. Выдавливание прекращается при потере материалом пластичности в результате остывания (при этом невыдавленная часть материала образует пресс-остаток) или при его полном выдавливании. В экструдированном изделии завершаются процессы роста зерен, причем длительность последней стадии определяется размерами изделия и условиями теплообмена.

Оборудование для СВС-экструзии

При создании установки для СВС-экструзии был использован серийный гидравлический пресс, реконструкция которого позволила расширить диапазон рабочих скоростей ползуна. Пресс снабжен блоком автоматического управления, с помощью которого задается время иницирования, задержки прессования и выдержки под давлением. Для регистрации параметров процесса в целях определения оптимальных силовых и скоростных условий экструзии установка снабжена системой измерения давления и перемещения ползуна пресса с записью на шлейфовый осциллограф. Процесс получения изделий следующий. Предварительно спрессованную из исходной шихты и теплоизолированную с поверхности заготовку помещают в контейнер пресс-формы, в нижней части которой расположены конусная формирующая матрица и пуансон, а в верхней – крышка с устройством иницирования. Собранную таким образом пресс-форму устанавливают под плунжер пресса. С помощью вольфрамовой спирали по команде с блока управления выполняется поджиг. После остывания образца до температуры выдавливания по сигналу с блока управления включается пресс и осуществляются сначала прессование горячего синтезированного материала, а затем его экструзия через матрицу.

Оборудование для СВС-экструзии совершенствовалось в целях повышения его производительности и функциональных возможностей, а также улучшения качества получаемых изделий. Созданы устройства, обеспечивающие регулируемый нагрев заготовки и матрицы. Опробована схема процесса, реализующая сложный сдвиг в материале – совмещение поступательного и вращательного движений. Ведутся работы по получению из СВС-материалов изделий сложной формы. С этой целью продукты СВС-экструзии подвергаются дальнейшей переработке, например, методами поперечно-клиновой прокатки или индукционного плавления, что позволяет получать изделия с переменным сечением по длине.

Практические приложения СВС-экструзии

СВС-электроды

для электроискрового легирования

СВС-экструзия позволяет получать длинномерные изделия, что невозможно при использовании других методов силового компактирования. Наиболее разработанные по всем направлениям приложения СВС-экструзии – это получение электродов для электроискрового легирования. Это многофункциональные электроды диаметром 1–2 мм, длиной 30–40 мм, применяемые в автоматизированных установках для на-

Таблица 1

Характеристики электродов из сплавов СТИМ

Марка сплава	Твердая основа	Плотность, г/см	Средний размер зерна, мкм	Твердость, HRA
СТИМ-2/20Н	TiC	5,56	5-6	80,5
СТИМ-2/30Н	TiC	5,58	3-3,5	79
СТИМ-3/10Н	TiC-Cr ₂ C ₃	5,37	3-4	92
СТИМ-3/20Ст	TiC-Cr ₂ C ₃	5,6	2-4	90
СТИМ-4	TiB	4,2	1-2	86

несения коррозионно-, износо- и термостойких покрытий (10–100 мкм) на металлическую поверхность деталей и инструментов различного назначения. Наиболее часто используется метод электроискрового легирования, применяемый для локальной обработки рабочей поверхности в местах наибольшего износа, при этом достигается высокая прочность сцепления нанесенного материала с основой, отсутствует нагрев детали в процессе легирования.

Электроды получены из широкой гаммы твердосплавных материалов на основе карбидов и боридов, названных синтетическими твердосплавными инструментальными материалами (СТИМ). Состав и некоторые характеристики полученных электродов приведены в табл. 1.

Отработаны технологические режимы и найдены оптимальные параметры (время задержки, давление, скорость выдавливания, степень деформирования) процесса СВС-экструзии электродов. Исследованы свойства и микроструктура электродных материалов и нанесенных покрытий: толщина, сплошность, микротвердость, износо-, жаро- и коррозионно-стойкость.

Проведены испытания служебных характеристик покрытий, в том числе производственные испытания упрочненного инструмента, показавшие увеличение его стойкости в 2–10 раз (табл. 2). Получены также положительные результаты легирования медицинского инструмента. На базе хирургического отделения больницы НЦЧ (пос. Черноголовка) совместно с

Таблица 2

Результаты испытаний упрочненного инструмента

Инструмент	Материал			Повышение стойкости	Предприятие
	инструмента	электрода	обрабатываемый		
Концевая фреза	P6M5	СТИМ-2/20Н	35ХГСА	2,0	Завод "Коммунар", г.Москва
Протяжка	P18	СТИМ-2/20Н	30ХГСА	1,6-2,0	
Дисковая фреза:	P6M5	СТИМ-3/20Н	У8,ХВГ	1,5-2,5	Завод "Наука", г.Москва
		СТИМ-3/20Ст	У8,ХВГ	3,0-5,0	
		СТИМ-4	У8,ХВГ	2,0-3,5	
		СТИМ-2/30Н	У8ХВГ	3,0-4,0	
Концевая фреза	P6M5	СТИМ-4	ВТ8	1,5	Завод "Наука", г.Москва
		СТИМ-3/20Н	ВТ8	1,5	
		СТИМ-3/20Ст	ВТ8	1,5-2,0	
		СТИМ-2/30Н	ВТ8	1,5-2,0	
Протяжка	P18	СТИМ-3/20Ст	Сталь 45	1,9	СМПО, г.Самара
Сверло	P6M5	СТИМ-2/30Н	Сталь 40	1,3	ВНИТИ, г.Санкт-Петербург
Сверло	P6M5	СТИМ-2/20Н	АКМ	2,7	
		СТИМ-2/20Н	24Ш	2,0	
Концевая фреза	P6M5	СТИМ-2/20Н	АКМ	2,25	ВНИТИ, г.Санкт-Петербург
		СТИМ-2/20Н	24Ш	1,7	
Игла для волок	У8БН10	СТИМ-2/30Н	ВКЗМ	2,0-3,3	БМЗ, г.Жлобин, Белоруссия
Опорный нож	6ХВ2С	СТИМ-2/30Н	ВКЗМ	10-12	
Нож: для резки трубчатый фигурный	6ХВ2С	СТИМ-2/30Н	Стали Ст3,7	3-8	
		СТИМ-2/30Н		2,0-2,7	
		СТИМ-2/30Н		1,5-2,0	
Ролик	40ХНМФ	СТИМ-3/20Ст		1,5-2,0	НЦБПО, г.Нижневартовск
Долбежный резец	P18	СТИМ-3/20Ст	Сталь 45	10-13	

Гастроэнтерологическим центром МО РАН проведены испытания хирургического инструментария.

Экономическая эффективность может быть получена благодаря повышению срока службы детали с защитными покрытиями, более низкой стоимости одного СВС-электрода по сравнению с электродами, полученными методами порошковой металлургии, а также возможности замены дефицитных вольфрамосодержащих сплавов, использования рудного сырья и вовлечения в оборот вторичных ресурсов, экономии электроэнергии и трудозатрат. Используемый метод получения электродов является экологически чистым.

Потенциальными потребителями данной продукции могут быть предприятия машиностроительной, авиационной и химической промышленности. В частности, среди заказчиков этой продукции: АО «Авиа-стар» (г.Ульяновск), СМПО им. Фрунзе (г.Самара), ГОКБ «Горизонт» (г.Москва).

Прочие практические приложения СВС-экструзии

С широким кругом технических и исследовательских задач связана проблема создания нагревателей, рассчитанных на длительную эксплуатацию в агрессивных средах при температуре выше 1600°C. Большинство исследований в этой области было направлено на усовершенствование нагревателей на основе дисилицида молибдена в целях получения стабильных повышенных тепловых, электрофизических и эксплуатационных характеристик. Промышленная технология изготовления таких нагревателей включает в себя более 50 операций, она сложна, энергоемка и длительна по времени. Кроме того, входящие в состав существующих нагревателей бентонитовая глина и другие пластификаторы, необходимые на стадиях холодного мундштучного прессования и спекания, существенно снижают рабочую температуру нагревателя и вызывают высокотемпературную ползучесть.

Перспективность использования СВС-экструзии для получения нагревательных элементов обусловлена возможностью за десятки секунд (вместо часов) выполнять синтез материала из порошков исходных компонентов и формовать изделия заданного размера и формы. При этом существенно упрощается технология получения нагревателей, значительно снижаются энергозатраты и отпадает необходимость в сложном и дорогом оборудовании. Кроме того, при синтезе дисилицида молибдена и получении изделия в процессе СВС-экструзии не требуется пластификатор (бентонитовая глина), что позволяет существенно увеличить предельную рабочую температуру.

Испытания полученных нагревателей на специальном стенде показали их высокую работоспособность (до температуры 1830°C), при этом не наблюдалось явления высокотемпературной ползучести, практически не изменялись форма и размер образцов при кратковременном нагреве до температуры плавления составляющих компонентов (~2000°C). Предельно жесткие эксплуатационные испытания (быстрое термоциклирование с нагревом до предельной рабочей температуры) показали более высокую стойкость СВС-нагревателей по сравнению с промышленными образцами. В ходе испытаний электрофизические характеристики определялись методом электросопротивления. Значения удельного электросопротивления в диапазоне температур 20–1500°C превышают соответствующие значения для промышленных нагревателей, в том числе и изготовленных фирмой «Кантал» – мировым лидером в этой области. Незначительное изменение электросопротивления СВС-нагревателей при эксплуатации в области высоких температур свидетельствует об отсутствии быстротекущих процессов, выводящих нагреватели из строя, и об устойчивости образцов к воздействию больших энергетических нагрузок.

Среди других практических приложений СВС-экструзии можно выделить получение твердосплавных электродов для наплавки, винтовых заготовок режущего инструмента (сверл, фрез), инструмента для обработки камня, микровалков. Продолжаются работы по использованию отходов шлифования различных сталей для получения твердосплавных материалов и изделий из них. Были изготовлены микрофрезы для гравирования по стеклу, стойкость которых не уступает стойкости алмазного инструмента. Получены прутки из магнитно-абразивных материалов, которые можно успешно использовать в качестве зерна в шлифовальном обдирочном инструменте. Зерна могут быть сориентированы в круге наложением магнитного поля, что повышает производительность инструмента.

Достоинства СВС-экструзии, как метода получения длинномерных изделий из тугоплавких материалов, очевидны. Однако, кроме чисто технологических аспектов, были выявлены достоинства СВС-экструзии и как метода изучения процессов синтеза, структурообразования и высокотемпературной пластической деформации. В настоящее время трудно проследить все возможности СВС-экструзии как инструмента для изучения этих процессов, очевидно, он является эффективным сочетанием экспериментальных и теоретических методов.

Научные основы процесса

Для изучения процесса резкого остывания продуктов горения, приводящего к потере пластических свойств материала, были сформулированы тепловые модели СВС-прессования и СВС-экструзии. На основе этих моделей исследуются температурные поля, возникающие как в материале образца, так и в элементах пресс-оснастки. Такое исследование, с одной стороны, позволяет определять оптимальные параметры процесса и прогнозировать результаты эксперимента, а с другой – создает возможности расчета пресс-оснастки с учетом реальных условий осуществления процессов СВС-компактирования.

Для изучения процессов деформирования порошковых материалов в условиях СВС-компактирования и анализа неизотермического течения сжимаемых сред в различных зонах оборудования используются реодинамические модели, основные параметры которых – макроскопическая плотность, скорость и напряжения в материале. Эти модели являются более сложными по сравнению с ранее сформулированными тепловыми моделями, описывающими процессы остывания продуктов горения и их теплообмен с окружающей средой.

Основная задача теоретического рассмотрения в рамках реодинамических моделей: нахождение зависимости плотности пористого тела от приложенного давления – кинетики его уплотнения. При этом важно ответить на ряд практических вопросов:

- в каких качественно различных режимах происходит уплотнение порошковых сжимаемых сред;
- каково влияние теплового фактора на напряженно-деформируемое состояние прессуемой заготовки;
- в каких случаях материал уплотняется, но не выдавливается или, наоборот, выдавливается без уплотнения.

Важным моментом при разработке реодинамических моделей является выбор реологических уравнений. Отметим, что СВС-материалы – объект особый, с реологических позиций еще мало изученный.

Их специфические особенности по сравнению с объектами классической реологии исключают возможность применения известных схем и методов экспериментальной реологии, обуславливают необходимость заново определять вискозиметрические течения, реологические координаты, приборы и методики решения обратной задачи. Перечисленные задачи решаются одновременно с развитием приборной базы и накоплением экспериментальных данных, в том числе по динамике структурных превращений в процессе деформирования, что составляет содержание научного направления – высокотемпературной реологии СВС-материалов.

Преимущества СВС-экструзии

СВС-экструзия как метод получения длинномерных изделий из тугоплавких материалов имеет многие достоинства по сравнению с традиционными методами порошковой металлургии. Последние включают большое число операций (до 50), многие из которых сложны, энергоемки и длительны по времени (десятки часов). В отличие от известных методов порошковой металлургии метод СВС-экструзии требует меньше энергетических затрат, в нем значительно сокращено число технологических операций (до 5), время получения изделия сокращается до 10 с. Отметим, что само изделие изготавливается на одной установке в едином технологическом цикле, что сказывается на его стоимости и требует значительно меньше производственных площадей.

Еще одно преимущество метода связано с требованиями по чистоте и качеству исходных порошковых материалов. Для СВС-экструзии этот момент не столь ответственен, как в порошковой металлургии, поскольку процесс горения снижает эти требования.

Кроме чисто технологических аспектов, СВС-экструзию можно рассматривать как метод изучения процессов синтеза и высокотемпературной пластической деформации, механизм и динамику структурообразования в условиях внешних механических воздействий.

 **ЭКСПОЦЕНТР**

ЛЕСДРЕВМАШ - 98

7 - 11.09.98

7-я Международная выставка

«Машины, оборудование и приборы для лесной, целлюлозно-бумажной и деревообрабатывающей промышленности»