

В. Т. ШМУРАДКО, С. М. УШЕРЕНКО,
А. А. АНДРУШЕВИЧ, НИИ ИП С ОП

The article is devoted to the problem of manufacture of refractory capsules of increased endurance out of difficult-to-extrude alloy powders made by impulse action method.

ПРИМЕНЕНИЕ ИМПУЛЬСНЫХ МЕТОДОВ НАГРУЖЕНИЯ В ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА ОГНЕУПОРНЫХ ТИГЛЕЙ

УДК 621.791.76:621.7044.2

В металлургии и литейном производстве для плавки металлов и их сплавов широко применяются огнеупорные тигли, получаемые набивным способом, либо комбинированные, у которых лицевой рабочий слой оформляется вставным металлоустойчивым стаканом, зафутерованным в формовочную огнеупорную массу. Традиционный выбор набивной массы для изготовления тиглей осуществляется с позиции ее химической стойкости на основе рядов активности оксидов. Однако такие тигли малоэффективны в эксплуатации из-за низкой термостойкости и металлоустойчивости, сложности их взаимозаменяемости до начала разрушения, т. е. до наступления "порога эрозии" и, как следствие, неудовлетворительного качества выплавляемых сплавов. Керамические материалы по своим термодинамическим и химическим свойствам обладают относительно небольшим доэрозионным периодом. В связи с этим возникает техническая задача о быстротенности тигля, о его работе и замене как головного изделия. Такой подход становится одним из определяющих приемов в приготовлении особо чистых сплавов.

В НИИ импульсных процессов с опытным производством продолжают исследования в области создания и повышения эксплуатационных свойств огнеупорных тиглей и технической керамики. Практика показала, что при получении чистых металлов и сплавов главную роль играют специфика конструкции плавильных печей, применяемый класс огнеупоров, вид формы для кристаллизации расплава и особенно плавильные тигли, являющиеся определяющим звеном в получении высококачественных материалов.

Высокотемпературные керамические материалы широко используются в различных областях техники при воздействии агрессивных сред, термических, механических, электрических нагрузок, а в ряде случаев являются единственно возможным условием решения таких проблем. Для получения керамических специальных изделий с высоким уровнем физико-механических свойств в первую очередь необходимо решить систему задач по установлению взаимосвязи в треугольнике "состав—структура—свойство" при использовании наиболее оптималь-

ных технологических приемов передела порошковых материалов [5].

Когда исходный композиционный химический состав материала задан, для реализации его высоких эксплуатационных свойств необходимо в применяемой технологии обеспечить выполнение трех основных требований: во-первых, создать высокий уровень дефектности в кристаллической структуре порошкового материала, выражающейся в его последующей активной спекаемости; во-вторых, сформировать в порошковом теле изделия такую исходную макроструктуру, которая обеспечит требуемые значения плотности и ее распределение по объему; и, в-третьих, установить правильный подход в определении режимов спекания (с учетом диаграмм состояния), при которых формируется базовая микроструктура материала, обеспечивающая требуемые свойства материала, в частности пористость (плотность), прочность, термо- и трещиностойкость, металлоустойчивость, модуль Вейбула.

С этой целью были разработаны материалы и на их основе огнеупорные тигли, обладающие повышенными термостойкостью и металлоустойчивостью [5]. Материал тиглей представляет собой корундо-муллитовую композицию.

Новые технологические процессы, реализуемые с применением импульсных методов нагружения (взрывное прессование порошковых материалов [1, 2], взрывное легирование инструментальных сталей [3], взрывная штамповка [4] с применением в качестве энергоносителя метателесных и бризантных взрывчатых веществ (ВВ) и т. д.), занимают важное место в материалообработке благодаря серьезным технико-экономическим, энергетическим и эксплуатационным достоинствам и преимуществам, высокому качеству получаемой продукции. Следует добавить энергетические выгоды, простоту конструкций и средств технологического оснащения. Выделяемая энергия при взрыве и создаваемые при этом высокие давления 1—50 ГПа направленно используются для создания специальных материалов и изделий из них, которые трудно или невозможно получить на традиционном оборудовании.

К достоинствам импульсных технологий следует отнести и то, что во время взрыва и его развития в материалах возникают и протекают такие процессы, как активация и упрочнение, кумуляция и аномальное сверхглубокое проникновение частиц в преграду, структурные и фазовые превращения. Степень и уровень действия указанных явлений зависят от вида источника энергии, способа его преобразования и передачи в зону нагружаемого объекта.

Как с научной, так и с практической точки зрения наиболее развитыми и перспективными методами взрывного нагружения порошковых материалов в используемых импульсных технологиях являются методы гидродинамического прессования (ГДП), гидровзрывного прессования (ГВП) и наземного взрывного прессования (ВП).

Технологический подход к уплотнению и формообразованию тугоплавких и труднопрессуемых порошковых материалов с применением энергии взрывчатых веществ (ВВ) связан с тем, что импульс давления продуктов горения метательных ВВ (пороха) и продуктов детонации бризантных ВВ (ударная волна) заменяет силовую часть прессового оборудования, обеспечивая требуемое силовое воздействие на относительно большую площадь порошковых тел в течение нескольких миллисекунд.

Задачи импульсной обработки порошковых материалов в НИИ ИП с ОП решаются с использованием разработанных установок – гидродинамических машин (ГДМ-160, ГДМ-190, ГДМ-350) и установок гидровзрывного прессования (УГП-120/20, УГП-180/30, УГП-300М), принципиальные схемы которых представлены на рис. 1, 2.

Для данных классов установок в качестве энергоносителя применяются метательные и бризантные ВВ, в качестве рабочей передающей среды (ПС) – техническая вода. Процесс гидровзрывного прессования при формовании крупногабаритных изделий реализуется с помощью бассейнов, микробассейнов и разовых бассейнов. Наземное взрывное прессование порошковых материалов бризантными ВВ осуществляется ударными волнами через жесткий металлический пуансон.

Меня исходные параметры прессования (заряд ВВ, его массу и геометрию, дистанцию взрыва, характеристики передающей среды), заранее просчитывая оптимальные динамические параметры прессования (давление, время), достигаются заранее прогнозируемые свойства и качество получаемых изделий.

К настоящему времени накоплен значительный опыт применения взрывного нагружения для решения таких задач, как импульсное прессование керамических и огнеупорных труднопрессуемых порошковых материалов метательными и бризантными ВВ, ударно-волновой синтез и структурообразование с использованием высоких давлений, ударно-волновая активация порошков, а также в проектирова-

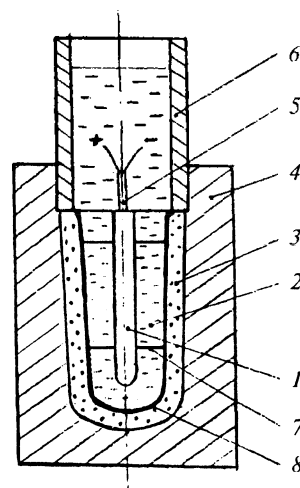


Рис. 1. Схема установки гидровзрывного прессования тиглей: 1 – заряд БВВ; 2 – жидкая ПС; 3 – порошковое тело; 4 – матрица; 5 – электродетонатор; 6 – съемный микробассейн; 7 – кольцо центрирующее; 8 – оболочка

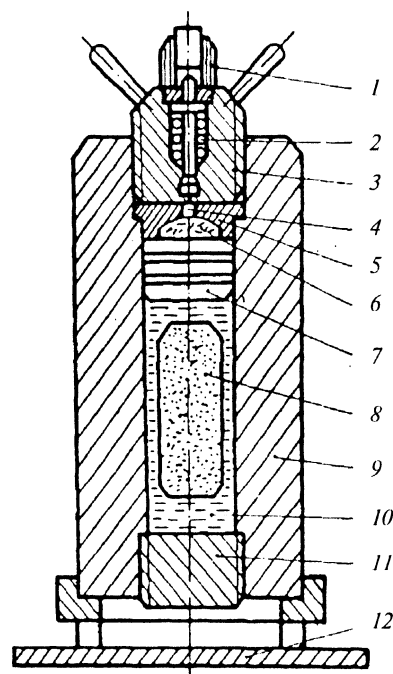


Рис. 2. Схема гидродинамической машины: 1 – ударный механизм; 2 – пружина; 3 – верхняя крышка; 4 – капсюль-воспламенитель; 5 – гильза; 6 – заряд пороха; 7 – поршень; 8 – прессуемая заготовка; 9 – корпус; 10 – рабочая среда; 11 – нижняя крышка; 12 – опора

нии и создании гидродинамических машин и установок гидровзрывного прессования.

Конструктивно гидродинамическая машина напоминает гидростат, где вместо насоса высокого давления и мультипликатора для сжатия жидкости в рабочей камере используется заряд пороха, при горении которого в замкнутом объеме рабочая жидкость и находящееся в ней порошковое тело сжимаются подвижным разделительным поршнем. Другой характерной особенностью ГДМ является отсутствие уплотнений для герметизации рабочей камеры, связанное с кратковременным импульсным характером нагружения порошкового тела, до-

статочным по времени и величине давления для создания в нем соответствующих плотностей и структурных изменений в материале.

Простота конструкций винтовых ГДМ не требует дополнительных средств технологического оснащения. В то же время ГДМ рамного типа позволяет механизировать операции гидродинамического прессования, обеспечивает высокую производительность процесса, простоту и надежность в эксплуатации, безопасность обслуживания. Машина работает в полуавтоматическом режиме.

Перспективным технологическим направлением среди импульсных методов прессования, разработанным в НИИ ИП с ОП, позволяющим реализовать ударно-волновое нагружение порошковых тел при получении качественных изделий с прогнозируемой структурой и свойствами, является метод прессования энергией бризантных ВВ через жидкие передающие среды — метод гидровзрывного прессования, который характеризуется длительностью импульса, многоциклическостью нагружения порошкового материала в период одного взрывного цикла, ударными волнами — падающими и отраженными, пульсирующими продуктами детонации в жидкой ПС и гидропотоком [6].

Отличительной чертой гидровзрывного нагружения по отношению к другим методам прессования — гидродинамическому и взрывному прессованию бризантными ВВ является то, что этот метод интегрирует в себе их основные особенности механизма нагружения порошковых тел.

Низкая стоимость ВВ, возможность развивать высокие давления (0,1–2 ГПа при ГДП, 0,3–10 ГПа при ГВП и 1–100 ГПа при наземном ВП), минимальные затраты на подготовку и формообразование изделий, и, наконец, реальная перспектива постоянного улучшения структурных и эксплуатационных свойств материалов при ударно-волновой обработке, особенно при создании новых спецматериалов — все это целенаправленно стимулирует развитие импульсных методов нагружения.

Закономерным этапом развития гидродинамического и гидровзрывного методов прессования является переход от универсальных машин и установок к созданию специализированных и автоматизированных комплексов на имеющейся базе, ориентированных на производство определенной номенклатуры изделий из спецматериалов, в частности, изделий металлургического назначения — тиглей и погружных разливочных стаканов, блок стаканов-дозаторов, коллекторов, фурм и т. д. из оксидных, карбидных, графитосодержащих, нитридных порошковых материалов и композиций на их основе.

Полученные методом гидродинамического прессования тигли (рис. 3) успешно эксплуатируются в индукционных литевых установках (емкостью до 50 см³) при отливке зубных протезов из кобальт-хромовых и нержавеющей сплавов. Температура эксплуатации изделий составляет 1400–1600°С при

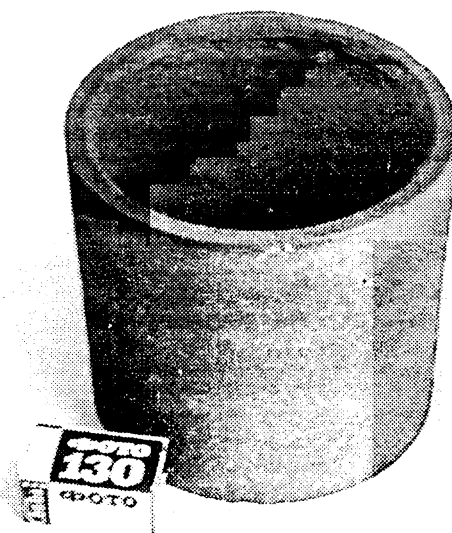


Рис. 3. Тигель, полученный гидровзрывным прессованием

времени плавления сплавов 30–40 с, стойкость тиглей — 35–40 теплосмен. Относительная плотность материала соответствовала 70–75%, а плотность внутреннего слоя изделия пограничного с расплавом на глубине 3 мм была выше на 7–9% по отношению к плотности периферийной поверхности тигля.

Такое распределение плотности в материале по сечению изделия можно получить только по схеме обжатия порошка на формообразующей оправке с применением высокоэнергетических методов импульсного нагружения. На самой начальной стадии прессования формируется пограничная зона рабочей поверхности тигля глубиной до 3 мм с повышенными эксплуатационными характеристиками, плавно изменяющимися от внутренней поверхности к наружной. В процессе прессования пограничная зона, в дальнейшем рабочая и контактная с расплавом, сформированная в теле изделия, приближается по своим свойствам к защитным покрытиям, обеспечивающим на начальной и конечной стадиях эксплуатации повышенные коррозионно-эрозионные и термостойкие (35–40 плавильных циклов) характеристики тиглей. После выработки своего плавильного ресурса вследствие термоударного усталостного старения и в силу увеличивающейся пористости в сторону периферийной зоны в изделии активизируются коррозионно-эрозионные процессы. На первой стадии идет процесс проникновения в тело тигля расплава за счет межчастичной кристаллитной коррозии материала. На второй стадии происходит вымывание дисперсных микрочастиц материала расплавом при воздействии на него эрозионного механизма износа, что приводит к появлению в расплаве неметаллических включений, снижающих качество отливок. Следует отметить, что коррозионно-эрозионные процессы происходят почти одновременно, но только с той разницей, что коррозионные явления наиболее активны на начальной стадии, а эрозионные — превалируют в

последующие моменты времени, причем после опрделенного количества термоциклов с расплавами.

Дальнейшие исследования по повышению металлоустойчивости огнеупорных материалов проводились на корундо-муллито-карборундовых тиглях с ресурсом работы 40—45 плавильных циклов. Анализ показал, что наиболее простым способом повышения коррозионно-эрозионной стойкости огнеупорных материалов, содержащих алюмосиликаты, является условие введения в материал соединений, которые образовали бы термодинамически устойчивые силикатные структуры и одновременно вели к уплотнению и упрочнению изделия. Такими соединениями являются оксиды редкоземельных металлов, вводимые по всему объему материала изделия [7—9].

Однако повышение плотности и модуля упругости материала, работающего в режиме резкого температурно-временного циклирования, явно приводит к снижению термостойкости изделий. В связи с этим необходим новый материаловедческий подход при проектировании тиглей:

- тигель должен представлять собой композит, состоящий из термостойкого металлоустойчивого высокоплотного покрытия, обеспечивающего высокую коррозионно-эрозионную стойкость рабочей поверхности и прочного, относительно пористого, термостойкого корпуса, определяющего стабильную работу покрытия до начала активного эрозионного износа его рабочей поверхности;
- материал корпуса тигля должен обладать достаточной механической прочностью, чтобы выдерживать статическую нагрузку металлического расплава, а также выполнять функцию теплоизолятора в конструкции изделия.

При установленном материале покрытия и материале основы (корпуса) изделия была успешно реализована импульсная технология формообразования двухслойных тиглей. Долговечность двухслойной конструкции тигля в среднем увеличилась в 2 раза.

За основу металлоустойчивого покрытия был принят корундовый огнеупор в α -форме с модифицирующими добавками оксидов циркония, кремния и оксидов редкоземельных элементов. Оценка термодинамической стойкости покрытий тиглей проводилась для жаропрочных сплавов на никелевой основе марки ЖС 26 и ВЖЛ 12У с учетом активности углерода, растворенного в расплаве, параметров взаимодействия расплав-керамика в интервале температур 1450—1600°C. Химическая стойкость огнеупорной керамики определялась методом масс-спектрального анализа. Изменения характера взаимодействия в процессе плавки, эрозионная стойкость тигля и покрытия оценивались на основе анализа изменения угла смачиваемости методом лежащей капли в процессе изотермической выдержки. Износ поверхности тигля определялся на основе натуральных испытаний по изменению количества уносимой массы материала при эксплуатации методом пост-

роения интегральных и дифференциальных кривых разрушения рабочей поверхности.

Сопоставление результатов проведенных исследований позволило установить, что:

- металлоустойчивость материала тигля не может быть в достаточной степени оценена только его химической стойкостью, а является комплексной характеристикой, включающей в себя термодинамическую стойкость компонентов керамики, керамические показатели рабочей поверхности и конструктивные особенности тигля;
- за критерий химической стойкости тигля недостаточно принимать только термодинамическую стойкость компонентов огнеупорной керамики;
- все промышленные тигли обладают относительно коротким доэрозионным периодом службы, после чего начинается разрушение рабочей поверхности, характер которого определяется механизмом взаимодействия пары расплав—керамика;
- эрозионная стойкость тигля с покрытием возрастает в 2,0—2,5 раза.

Кроме того, при разработке технологии изготовления одно- и двухслойных тиглей особое внимание следует уделять способам формирования корпуса тигля и созданию на его рабочей поверхности металлоустойчивого покрытия.

Эффективными и технологичными методами создания одно- и двухслойных термостойких и металлоустойчивых тиглей с покрытиями по сравнению с традиционными способами являются методы импульсного прессования с применением бризантных и метательных взрывчатых веществ. Емкость производимых тиглей находится в диапазоне 50—500 см³.

Выводы

Основные этапы технологии керамических материалов и производства из них огнеупорных тиглей с повышенными термостойкостью и металлоустойчивостью тесно связаны с установлением взаимосвязи в треугольной системе "состав—структура—свойство".

Наиболее прогрессивными технологическими приемами формования одно- и двухслойных тиглей с повышенными эксплуатационными свойствами являются импульсные методы нагружения порошковых тел через жидкие передающие среды с применением бризантных и метательных взрывчатых веществ.

К перспективным материалам для индукционной плавки кобальт-хромовых и нержавеющей сплавов следует отнести корундо-муллито-карборундовые композиционные составы при производстве огнеупорных тиглей. Их эксплуатационная стойкость составила 40—45 плавильных циклов. Дальнейшее повышение термостойкости в 1,5—2,0 раза и металлоустойчивости огнеупорных материалов достигается путем создания двухслойной конструкции тигля методом гидродинамического прессования. Увеличение металлоустойчивости рабоче-

го слоя изделий к воздействию расплавов жаропрочных сплавов на никелевой основе обеспечивается получением на внутренней поверхности тигля покрытия на базе корундового огнеупора в α -форме с модифицирующими добавками оксидов циркония, кремния и оксидов редкоземельных металлов.

Литература

1. Роман О. В. Импульсное прессование металлических порошков: Дис. ... д-р техн. наук. М., 1971.
2. Роман О. В., Мальцев А. А., Шмурадко В. Т. Прессование осесимметричных изделий гидровзрывным методом // Порошковая металлургия. Мн.: Выш. шк., 1978. Вып. 2. С. 3–6.
3. Ушеренко С. М. Особенности взаимодействия потока микрочастиц с металлами и создание процесса объемного упрочнения инструментальных материалов: Дис. ... д-р техн. наук. Мн., 1998.
4. Импульсная обработка металлов давлением // Под ред. В. К. Борисевича. М.: Машиностроение, 1977.
5. Ушеренко С. М., Овчинников В. И., Шмурадко В. Т., Киришина Н. В. Керамический материал на основе реакционно-связанного нитрида кремния для огнеупорных тиглей // Литье и металлургия. 2000. № 2. С. 26–30.
6. Пихтовников Р. В., Хохлов Б. А. Безбассейновая листовая штамповка взрывом. Харьков: "Прапор", 1972.
7. Третьяков Ю. Д. Химия нестехиметрических оксидов. М.: Изд-во МГУ, 1974.
8. Найдич Ю. В. Контактные явления в металлических расплавах. Киев: Наукова думка, 1972.
9. Bryson V. I. // Refractories J. 1971. Vol. 46, N 6–7. P. 9.