

УДК 53.084.823

ПРОГРЕССИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ ДАВЛЕНИЕМ ПОРОШКОВЫХ И ПОРИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ

Рамиль Госманович Гиматов⁽¹⁾, Булат Рашитович Зиннатов⁽²⁾, Александр Анатольевич Евстигнеев⁽³⁾

*Студент 2 курса⁽¹⁾, студент 2 курса⁽²⁾, студент 2 курса⁽³⁾
кафедра «Материаловедение и обработка металлов давлением»
Ульяновский государственный технический университет*

*Научный руководители: В.Н. Кокорин⁽¹⁾, Н.А. Сезов⁽²⁾
доктор технических наук, профессор кафедры «Материаловедение и обработка металлов давлением»⁽¹⁾,
аспирант кафедры «Материаловедение и обработка металлов давлением»⁽²⁾*

Технология производства высокоплотных заготовок и деталей в отраслях народного производства

Характерной тенденцией современного промышленного производства является создание новых машин и механизмов с высокими рабочими параметрами на основе использования заготовок и деталей с соответствующим уровнем технологических и потребительских свойств.

Основным потребителем высокоплотных заготовок и деталей являются отрасли автомобилестроения, машиностроения, прокатки и ряд других. Высокоплотные механические смеси могут применяться в качестве исходных заготовок при изготовлении металлопроката, при получении изделий типа «фольга», в процессах интенсивного пластического деформирования (формообразования) по схемам динамического горячего прессования (ДГП), гидроштамповки, холодной объемной штамповки (ХОШ); в качестве брикетов (вторичное сырье) в процессах промышленного рециклинга твердых техногенных отходов металлургических комбинатов; в качестве деталей конструкционного назначения.

Функциональное назначение, конструктивные требования, а также характер и величина эксплуатационной нагрузки определяют уровень остаточной пористости, что детерминировано оказывает влияние на потребительскую стоимость изделия.

Обозначения: О – отливка; ОД – обработка давлением; П – прокат; СК – сварная или комбинированная; ПМ – порошковая металлургия; () – исключаются; * – любой (равноприоритетность видов).

Установлено соотношение величин относительных уровней допустимых напряжений для материала заготовок в зависимости от способа их изготовления. Отмечается, что плотность (по пористости) заготовок, полученных использованием методов порошковой металлургии, выше, чем плотность отливок, полученных большинством традиционных способов литья.

Прочность материала детали при изгибе, кручении и т. д. прямо связана с его плотностью: чем плотнее материал, тем выше его прочностные свойства.

Однако, прочность заготовок, полученных порошковой металлургией (ПМ), в среднем меньше литых, что объясняется влиянием пористой структуры материала. Очевидно, с целью повышения эксплуатационных характеристик заготовок и деталей,

полученных ПМ, целесообразно использовать прогрессивные технологии прессования, благоприятно влияющие на структуру металла. Так, $\sigma_{изг}$ материала заготовок, полученным горячим изостатическим прессованием (ГИП), в 1,2...1,5 раза выше, чем у отливок.

В настоящее время потребительским рынком высокоплотных изделий востребованы детали плотностью, приближенной к теоретической; заготовки – плотностью 0,95...0,97; брикеты – плотностью $\geq 2,5$ г/см³ (ГОСТ 2787-85 «Металлы черные вторичные. Общие технические условия»).

Дальнейший рост объемов изготовления деталей на основе порошковых материалов, по оценке Международной федерации порошковой металлургии MPIF, будет определяться освоением производства новых науко- и трудоемких видов порошковых изделий (прежде всего высокоплотных) и внедрением новых прогрессивных технологических процессов.

Машиностроительная отрасль

Детали конструкционного назначения являются наиболее распространенным видом продукции порошковой металлургии. Учитывая технологическую минимизацию отходов, они имеют минимальную себестоимость.

Основным потребителем порошковых деталей в настоящее время является автомобильная промышленность.

В большинстве промышленных стран (70...85)% конечной продукции ПМ составляют детали для автомобиля. Потребителем продукции ПМ является также аэродинамическая техника, общее машиностроение, бытовая техника. Мировой объем продаж порошковых деталей вырос с 3,8 миллиардов долларов (1994 год), до 5,5 миллиардов долларов (1998 год).

На диаграмме (рис. 1.3.) представлено использования изделий из порошковых материалов по отраслям в промышленно развитых странах мира. Следует отметить, процент использования изделий из порошковых материалов в РФ существенно отстает от США и стран ЕС.

Развитие порошковой металлургии основывается в значительной мере на разработке и использовании новых прогрессивных технологий консолидации дисперсных металлов, направленных на существенную минимизацию остаточной пористости и создание благоприятной структуры материала.

При этом потребность промышленности в конструкционных деталях составляет более 60% всей потребности в металлопорошковых изделиях. Наиболее распространенным видом порошковой продукции конструкционного назначения, используемой в машино- и автомобилестроении, являются детали на стальной основе (углеродистые и легированные) общего назначения.

Порошковые конструкционные детали должны обладать высокой плотностью и прочностью, приближающимися к плотности и прочности деталей, изготовленных из проката и литья. Использование рациональных технологий уплотнения порошков позволило повысить плотность наиболее распространенных порошковых материалов (на железной основе) до 7,4 г/см³, благодаря чему существенно расширилось их использование.

Чем выше требования по прочности, тем ниже допустимый уровень пористости детали. По степени загруженности и, соответственно, по пористости детали, полученные из металлических конструкционных материалов, заменяющие традиционные стали и чугуны, делятся на четыре группы

Отрасль черной металлургии

По последним данным отходы сталеплавильного производства образуются практически на всех технологических участках, начиная с производства чугуна (включая транспортировку и подготовку сырьевых материалов) и кончая чистовой обработкой металлопроката (на станах холодной и горячей прокатки).

По последним данным мировое производство стали составляет порядка 800 млн. тонн в год. При этом реализуются два основных метода плавки:

- 1) выплавка на базе руды;
- 2) выплавка на базе скрапа (различной массовой доли).

Общее потребление металлических руд в странах ЕС-15, по данным Европейского агентства окружающей среды, составило около 220 млн. тонн в 2001 году, при этом внутренняя добыча металлических руд снизилась с 150 млн. тонн (1971 год) до 43 млн. тонн (2001 год).

Металлами с наибольшим потреблением в странах ЕС-15 являются, в основном, стали и чугуны.

Процессы добычи рудных ископаемых часто угрожают природным ландшафтам, а отходы добычи - самый крупный поток добычи ископаемых в Европе.

Рециклинг техногенных отходов является наиболее выгодным способом продления жизненного цикла металлов. Он экономит первичное сырье и снижает объем добычи сырой металлической руды и негативное воздействие (в процессе добычи) на окружающую среду.

При мировом производстве стали 800 млн. тонн в год 300 млн. тонн выплавляется на базе скрапа (и в основном первичного лома). В связи с возрастающим дефицитом первичного скрапа, расширение производства стали и чугуна представляется возможным лишь при использовании перспективных технологий глубокой переработки и утилизации собственных техногенных отходов (железосодержащие отходы доменного и конвертерного производств, окалина производств прокатки листа имеют в своем составе до 65% приведенного содержания железа, что свидетельствует об их высокой металлургической ценности (так, на конец 90-х годов XX в. на ОАО «Северсталь» в сутки изымалось из металлооборота 800 тонн конвертерной пыли, до 200 тонн прокатной окалины).

Нами проведен анализ техногенных отходов производств: 1) ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат»; 2) ОАО «Северсталь»; 3) ОАО «Носта» (Новотроицкий металлургический комбинат). Основными твердыми техногенными железосодержащими отходами этих предприятий являются: 1) Пыль доменная (система газоочисток); 2) Пыль конвертерная (система газоочисток). Как правило, железосодержащая пыль либо сухая, либо влажная (влажность $W=(8...10)\%$ масс. доли); 3) Окалина прокатная (система отстойников) может находиться в состояниях: а) пастообразное, б) твердое. Содержание железа составляет: $Fe - \square = 45...60\%$.

В металлургическом производстве при плавке стали (чугуна) использование отходов пунктов 1,2,3 в исходном составе в качестве вторичного сырья исключено, т. к. резко увеличивается «уход металла» (тонкодисперсного и окисленного) в шлаки; устанавливается высокая поверхностная плотность засыпаемой завалочной массы (корка), что резко ухудшает газодинамические (продуваемость) условия плавки: уменьшается производительность печи; значительно увеличивается продолжительность завалки; существенно увеличивается трудоемкость транспортирования пылевидной шихты.

Как показывает анализ гранулометрического состава шламовых отходов черной металлургии, твердая фаза пылевидных железосодержащих материалов вполне сопоставима с гранулометрическим составом отечественных и зарубежных порошков.

Рядом авторов отмечается высокая потребительская ценность брикетов как продукта утилизации тонкодисперсных отходов черной металлургии на переплав в качестве вторичного металло сырья. При этом процессы брикетирования (прессования) шламов технологичны, поскольку качество брикетов несущественно зависит от гранулометрического состава и влажности исходного материала.

Для достижения высоких технико-экономических показателей шахтной плавки брикеты должны удовлетворять следующим требованиям: высокая механическая прочность для обеспечения сопротивления нагрузке, возникающей при их транспортировке от брикетировочного пресса к шихтовые вагоны и загрузке в печь не должен превышать 10 %.

Альтернативные способы получения высокоплотных заготовок и деталей

Детали конструкционного назначения являются наиболее распространенными видами продукции порошковой металлургии. В настоящее время разработано большое количество технологических схем получения плотных заготовок и деталей, обладающих высоким уровнем технологических и эксплуатационных свойств.

Выбор метода производства порошковых (пористых) заготовок и деталей зависит от их типоразмеров, требований к уровню физико-механических свойств, размерной точности.

Номенклатура заготовок и деталей, полученных формованием и спеканием из порошков на основе железа, с использованием традиционных технологий ограничена из-за невозможности обеспечения высоких механических свойств деталей, имеющих существенный уровень остаточной пористости.

Перспективный рост промышленного производства определил необходимость изыскания специальных методов повышения комплекса механических свойств порошковых деталей.

Определяющей причиной низких механических свойств спеченных изделий является остаточная пористость. Наиболее существенно она проявляется в снижении прочности и вязкости разрушения материалов на основе ОЦК-металлов, обладающих низким сопротивлением распространению трещин.

Таким образом, необходимо организовать процесс деформирования таким образом, чтобы без изменения требуемой точности конечных размеров изделия, задаваемых пресс-формой, в уплотнении принимали участие развитые пластические деформации, интенсивность которых была бы достаточна при превалировании деформационного упрочнения над возвратом.

Теорией и практикой деформирования металлических порошковых материалов были найдены два принципиально разных пути решения этой задачи, а именно:

1. Организация последовательности операций – деформирование порошка в пресс-форме и его спекание. Варианты, получившие применение, различались уровнем приложения нагрузки и нагрева: горячее статическое или динамическое прессование + спекание; импульсное прессование без внешнего подогрева + спекание.

Среди импульсных методов прессования наибольшее распространение получило прессование взрывом (или гидравлическим ударом) и магнитно-импульсное. При этом отмечается интенсификация процесса последующего спекания.

2. Совмещение процессов деформации и спекания: горячее изостатическое прессование, изотермическая штамповка в замкнутый объем (пресс-форму). Интенсификация данных способов реализуется за счет формирования фрагментарной структуры, например, за счет циклического нагружения, прессования в условиях сверхпластичности и т. д.

Как уже отмечалось, порошковые детали делятся на четыре группы по плотности (пористости). Чем выше требования по прочности и деформационной способности (требования для заготовок), тем меньше должна быть пористость металла

Рядом исследователей (Э. Фридрих, В. Шатт и др.) отмечается эффект уменьшения уровня усадки при спекании высокоплотных заготовок, что позволяет получать готовые детали с меньшим припуском (повышая размерную точность).

В настоящее время разработаны технологические процессы изготовления порошковых деталей на основе железа, обеспечивающие прочность на разрыв до 100 кгс/мм².

Радомысльским И. Д. проведена классификация деталей и технологий по эксплуатационным и механическим свойствам конструктивных порошковых деталей общего назначения на основе железа.

Механические свойства деталей из железного порошка в зависимости от технологии изготовления (и соответственно, относительной пористости). Наиболее часто используемой схемой нагружения при прессовании порошков является их уплотнение в жестких закрытых прессформах. Применение прессования с подвижной матрицей позволяет существенно интенсифицировать процесс уплотнения. Теория и технология данной схемы уплотнения рассмотрены в работах Овчинникова А.Г., Дмитриева А.М. и др.

Рассматривая возможность увеличения прочности порошковых тел, М.Ю. Бальшиным, С.С. Кипарисовым, Г.А. Либенсоном и др. отмечаются три этапа прессования. Следует отметить, при максимальном давлении (третий этап) существенно сказывается упрочнение металла, вследствие чего интенсивность роста прочности брикета снижается.

Высокие давления прессования с одновременным появлением интенсивного упругого последствия при выталкивании деталей из пресс-формы приводят к тому, что при некоторой величине давления ($q \geq 700 \dots 1000 \text{ МПа}$) разрушающие упругие силы превосходят прочность прессовок, и возникают расслойные трещины. Применение горячего изостатического прессования (и гидростатического) позволяет получить остаточную пористость до (1...3) % и одновременно повысить прочность на изгиб.

Существующие технологии реализации ГИП являются дорогостоящими, требуют использования оболочек для капсулирования порошков.

В середине 20-го века проведены систематические исследования закономерностей горячего прессования как за рубежом (Германия, Польша, США), так и в СССР.

С целью получения практически беспористых порошковых изделий представляется перспективным использование процесса динамического горячего прессования (ДГП), разработанного в Новочеркасском государственном техническом университете Дорофеевым Ю. Г. Уплотнение нагретой пористой заготовки происходит практически при отсутствии внешнего трения, при этом металл заготовки на первом этапе деформирования перемещается в условиях его свободной осадки, а затем при возникновении поверхностного контакта со стенками матрицы продольное смещение относительно стенок матрицы отсутствует. В работе приводится технологический регламент деформирования пористой заготовки по схеме ДГП при изготовлении реверсивной паразитной шестерни автомобиля модели Citroën. Установлено, для снижения остаточной пористости до уровня менее 1% необходима температура нагрева заготовки 1100°C и давление прессования $\geq 1000 \text{ МПа}$. С помощью термодпары, смонтированной в центр заготовки, было установлено, что время, необходимое для достижения температуры штамповки, составляет 14 мин., из которых 5 мин. затрачиваются на разогрев металла в интервале температур 1080...1120°C.

В работе отмечается образование остаточной пористости, не превышающей 1%, при обработке ДГП пористых заготовок (25...30%) путем нагрева их в среде водорода при 750...1100°C в течение 3-12 мин и последующей деформации.

Характерными дефектами заготовок и деталей, полученными ДГП, являются поверхностные микротрещины и поры.

Консолидация порошка при горячем прессовании связана с пластической деформацией, развитыми диффузионными процессами. В работах ряда исследователей (И.Д. Либенсон, М.А. Лопатин) приводятся технологические регламенты уплотнения, при которых получается малопористая порошковая структура ($II \leq 1.2\%$) в течение времени нагружения 10–30 мин.

Применение вибрации при прессовании позволяет снизить требуемое давление в десятки раз. Вибрация разрушает образующиеся арки и мостики и увеличивает подвижность частиц, что в совокупности интенсифицирует процесс уплотнения, при этом плотность укладки достигает >95% от теоретической.

Экспериментально установлено, что порошковая дискретная среда при наложении вибрационного возмущения приобретает свойства вязкой жидкости. Наиболее эффективно применение вибрации при уплотнении малопластичных материалов (получены прессовки 65 – 85 % от теоретической плотности). Применение вибрационного прессования при консолидации пластичных порошков позволяет получить однородную поровую структуру, прежде всего у торцов брикета. В технологии вибрационного прессования проводится рекомендация по увлажнению порошка водой или 5% -ным раствором глицерина в метаноле с целью исключения потерь порошка мелкой пылевидной фракции. Оптимальное количество увлажняющей жидкости определяется химсоставом порошка и его гранулометрическим составом и находится в пределах от 6 до 20 % (масс. доли).

Повышение относительной плотности механической смеси при вибрационной укладке порошка не линейно определяет повышение прочности брикета, т. к. при вибрации изменяется лишь число контактов между частицами, а не характер их, как при статическом прессовании. Поэтому часто наряду со значительным уплотнением порошковой среды не достигается уровень прочности, который соответствует той же плотности укладки частиц при статическом прессовании.

Теоретические и экспериментальные исследования Ждановича Г. М., Крупина Л. В., Романа О. В., Аруначалама В. С. и др. показали большое значение ударноволновой активации металлических порошков при использовании методов импульсного формирования, позволяющие получение больших плотностей формовки ($\rho_{\text{отн.}}$ приближена к теоретической). Многочисленные работы, выполненные в Белорусском политехническом институте и Московском институте стали и сплавов по исследованию свойств и структуры брикетов из железного порошка, позволили установить, что прочность при сжатии, ударная вязкость, твердость и степень искажения кристаллической решетки (плотность дислокаций, микродеформации решетки) существенно выше для брикетов, полученных импульсным (взрывным) прессованием, чем для брикетов той же плотности, полученных при статическом нагружении. Это объясняется влиянием давлений и температур, развивающихся в зонах контактов частиц, которые приводят к образованию металлической связи типа сварки, обладающей высоким сопротивлением сдвигу контактов частиц порошкового тела.

Особенностью импульсного формования (и значительных скоростей нагружения) является увеличение доли упругих деформаций межчастичных контактов; на 40–50% увеличивается упругое последствие по сравнению со статическим формованием, что существенно снижает размерную точность изделий и ограничивает технологические возможности.

Получение изделий с равномерной плотностью, длина которых существенно превосходит их ширину при малой толщине, наиболее эффективно с использованием непрерывного метода формования – прокаткой порошков.

Прокаткой порошков можно получить как беспористый металлопрокат с использованием упрощенного процесса металлургии (минуя традиционные операции), так детали и заготовки различного назначения.

Процесс прокатки можно рассматривать как непрерывное прессование, начинающееся в очаге деформации и кончающееся на выходе ленты из зазора между валками.

В одной из первых отечественных работ по теории процесса Аксёнов Г. И. показал, что прокатка порошка в полосу во многом отличается от прокатки компактных металлов. Для осуществления непрерывности процесса прокатки необходимо согласовать линейную скорость движения порошка со скоростью вращения валков.

Плотность прокатной ленты зависит от насыпной плотности порошка, радиуса вала, угла захвата, толщины ленты и определяется уравнением : .

Теоретические и экспериментальные исследования прокатки порошков представлены в работах Ложечкина Е. Б., Виноградова Г. А., Каташинского В. П., Григорьева А. К., Рудского А. И., Цеменко В. Н. и т.д. Установлено, на процесс уплотнения при прокатке оказывает влияние воздух, находящийся в порах между частицами порошка.

Г. А. Аксёновым предложены экспериментальные кривые уплотняемости для ряда материалов. Он выделяет три стадии уплотнения: первая стадия наблюдается при относительной плотности до 0,5...0,6; вторая — 0,6...0,8; третья при $\rho_{отн} \geq 0,8...0,85$, которая связана с объемной деформацией. Можно отметить отличие характера кривых уплотнения пластичных порошков при прокатке, по сравнению с уплотнением в замкнутых пресс-формах, здесь, прежде всего, отсутствует ярко выраженная восходящая экстремальная ветвь третьего этапа.

В работах отечественных и зарубежных исследователей предлагается перед прокаткой порошок увлажнять для повышения текучести и прессуемости (степень увлажнения составляет 35%). Следует отметить, что в исследованиях не приводятся данные о величине массовой доли основной (образующей) фазы структуры механической смеси и заполняющей (жидкости). Порошок поступает в дозирующее устройство, которое с помощью вибрации частотой 200...400 колеб./с обеспечивает равномерную подачу его в валки. Скорость прокатки равна 0,75 м/мин.

При промышленной реализации получения лент практически беспористой структуры Шатт В. рекомендует технологическую цепочку: прокатку порошка со спеканием сырой ленты и последующую уплотняющую холодную прокатку с промежуточными отжигами. Получение металлопроката из порошка имеет преимущества, заключающиеся в сокращении числа переходов при изготовлении тонких лент и листов (до 2,5 мм); к недостаткам следует отнести эффект расслоения при прокатке толстого материала ($S > 2,5$ мм) вследствие неравномерности напряженно-деформированного состояния порошкового тела в очаге уплотнения.

В условиях массового и крупносерийного производства тонких плоских заготовок эффективно применение дискретной прокатки.

Прокатка осуществляется в валках, один из которых имеет гладкую поверхность, а на поверхности второго вала выполнены выступающие вставки (прокатка осуществляется в наклонном направлении).

Существенным недостатком прокатки порошков является ограничение по толщине (толщина прокатываемого материала не превышает 1% от диаметра валков).

Процессы экструдирования (мундштучного прессования) металлических порошков были рассмотрены в работах Шапиро С. С., Брохина И. С., Гольдберга З. А., Злобина Г. П.

В процессе уплотнения используются пластифицированные смеси (оптимальное количество влаги в смеси составляет 6...10%). Пористость получаемых после выдавливания деталей и заготовок близка к нулю (при минимальной степени обжатия смеси относительная плотность не менее 90%). После формования заготовки подвергают сушке (при необходимости спеканию).

Данный процесс характеризуется образованием отдельных конгломерированных слоев материала, отличающихся по плотности и напряженному состоянию, что служит причиной дефектов структуры.

Анализ научной литературы не выявил сколько-нибудь законченных исследований процессов интенсивного уплотнения и структурообразования механических смесей теоретической плотности с использованием структурных фаз различного агрегатного состояния. Результаты известных исследований, в которых при уплотнении дисперсных железосодержащих материалов используется жидкая фаза нельзя распространять на процессы получения практически беспористых структур с приложением высоких давлений. Нами установлено, что введение жидкости малой вязкости (например, воды, ацетона) в количестве 10...15% масс.доли позволяет получать высокоплотные детали с остаточной пористостью, не превышающей 3%, что позволит использовать данную технологию для изготовления сильнонагруженных изделий машиностроительного назначения. Можно предположить, что именно процессы «схлопывания» пор при транспортировании жидкости и растворенного в ней воздуха, моделируя сдвиговые деформации и образуя значительные контактные поверхности будут доминировать при формировании качества изделий. Поэтому явления структурообразования при интенсивном уплотнении увлажненных механических систем следует рассмотреть особенно внимательно.

Производство брикетов

Процессы брикетирования по составу шихты можно условно разделить на пять групп:

1. Брикетирование руд черных и цветных металлов.
2. Брикетирование торфа.
3. Брикетирование угля.
4. Брикетирование отходов различных производств.
5. Брикетирование металлической стружки (окалины) и шлама.

Технологии брикетирования подразделяются на:

1. Холодное:
 - а) со связующими добавками;
 - б) без связующих добавок.
2. Горячее (до 1050 °С).

Пузановым В. П., Кобелевым В. А. приведены данные сравнительной характеристики процессов структурообразования [38]. В настоящее время необходимость повышения качества продукции в сталеплавильном и ферросплавном производствах требует использования прогрессивных процессов окомковывания с целью повышения прочностных и эксплуатационных свойств брикетов. Согласно данным Дашкевича Я. И. и др., требуемая прочность брикетов на раздавливание должна быть не менее 90 кг/брикет; при этом выход мелочи класса $\square$ 5 мм (отсев) после перевозки и перевалки должен быть не более 10-15%.

Процессы брикетирования четвертой и пятой групп широко используются в промышленном производстве Германии, Венгрии, Польши, Румынии, США, Японии, Франции.

Разработкой теоретических и прикладных основ брикетирования занимались Равич Б. М., Носков В. А., Эйдельман Л. П. и др. Принципиальная схема брикетирования шихты приведена в работах Мащенко В. Н., Кобелева В. А. и др. Сущность брикетирования заключается в уплотнении исходной сыпучей шихты с приданием ей формы рабочего инструмента. Авторами работы используется понятие коэффициента уплотнения. При этом показано, что прочность брикетов зависит, главным образом, от давления прессования и применяемой смазки.

Для математического описания процесса формообразования брикетов в валковых прессах используются различные подходы. Одним из перспективных подходов является описанный Логиновым Ю. Н., Буркиным С. П. и Бабайковым Н. А. [42].

Исследованиями установлено, что напряжения, действующие на выделенной внутри шихты площадке, связаны зависимостью: $\tau = \phi(\sigma)$, где $\phi(\sigma)$ – непрерывная однозначная функция по σ . Разрушение слоя в области деформаций сопровождается выдавливанием шихты в сторону нагрузки, т. е. шихта находится в активном состоянии. Отмечается, что предельное равновесие шихты наступает при достижении некоторой малой деформации, при дальнейшем увеличении деформации – не меняется. Это позволяет схему процесса прессования с непрерывным давлением валков, когда деформация шихты непрерывно увеличивается, заменить статической схемой.

В условиях предельного равновесия рост давления зависит, главным образом, от свойств шихты, плотности материала брикета, внешнего и внутреннего трения, связности структуры. При больших деформациях к шихте применимы положения основных задач статики сыпучих тел.

В соответствии с принятой классификацией структурообразование может осуществляться с использованием как низкотемпературных, так и высокотемпературных жидких фаз (низкотемпературные жидкие фазы представлены различными связками на водной основе).

В качестве основного критерия классификации процесса структурообразования служит количество жидкой фазы. К первой группе Пузанов В. П., Кобелев В. Л. отнесли относительно сухие материалы с содержанием воды не более 5 %. Переработка данных материалов, по мнению авторов, осуществляется за счет брикетирования. Материалы, имеющие в своем составе от 5 до 25% несвязной воды, не рассмотрены как шихта для брикетирования, что противоречит как существующей практике брикетирования, так и результатам ряда исследований. Для повышения прочности брикетов рекомендованы добавки жидкого стекла в количестве 2,5% по массе. Введение в шихту силиката натрия позволит увеличить прочность брикетов на раздавливание на 26 %.

Исследовано влияние влажности, усилия прессования на прочностные характеристики. Влажность шихты изменяли от 3,5 до 12%. Установлено, что максимальная прочность брикетов получена при влажности $w=9,5-11,6\%$ объема. Однако, единая точка зрения на природу взаимодействия контактирующих объектов и тип связи, образовавшейся при уплотнении увлажненных металлических дискретных систем до сих пор не выработана. Это не позволяет выделить факторы, оказывающие доминирующее влияние на процесс консолидации гетерофазных механических систем и выработать практические рекомендации, направленные на интенсификацию уплотнения и структурирования.

На основе результатов исследований последних лет на ЗАО НПП «Волга-Экопром» была введена в эксплуатацию опытно-промышленная установка «Вита-Ш»

производительностью до 10 т/ч, на которой осуществлялась отработка технологии подготовки и брикетирования металлического шлама, образуемого рядом промышленных предприятий: ОАО «Северсталь», ОАО «Липецкий металлургический комбинат», ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат», ОАО «Носта», ОАО «Западно-Сибирский металлургический комбинат», ОАО «Саратовский подшипниковый завод» с целью выдачи регламента на промышленное проектирование промышленных производств. В настоящее время выполнен достаточно большой объем исследований по изучению процессов брикетирования железосодержащих дисперсных шламов с применением связующим на основе воды. Установлена оптимальная влажность шихты – 10-15% масс.доли.

Выводы

Основным потребителем высокоплотных заготовок и деталей являются отрасли автомобилестроения, машиностроения, прокатки и ряд других. Высокоплотные механические смеси могут применяться в качестве исходных заготовок при изготовлении металлопроката, при получении изделий типа «фольга», в процессах интенсивного пластического деформирования по схемам динамического горячего прессования, гидроштамповки, холодной объемной штамповки; в качестве брикетов (вторичное сырье) в процессах промышленного рециклинга твердых техногенных отходов металлургических комбинатов; в качестве деталей конструкционного назначения.

Функциональное назначение, конструктивные требования, а также характер и величина эксплуатационной нагрузки детерминировано определяются величиной остаточной пористости.

В настоящее время потребительским рынком высокоплотных изделий востребованы детали плотностью, приближенной к теоретической; заготовки – плотностью 0,95...0,97; брикеты из отходов черных металлов – плотностью $\geq 2,5$ г/см³.

Дальнейший рост объемов изготовления деталей на основе порошковых материалов, по оценке Международной федерации порошковой металлургии MPIF, будет определяться освоением производства новых науко- и трудоемких видов порошковых изделий (прежде всего высокоплотных) и внедрением новых прогрессивных технологических процессов.

Перспективный рост промышленного производства определил необходимость изыскания специальных методов повышения комплекса механических свойств порошковых деталей. Определяющей причиной низких механических свойств спеченных изделий является остаточная пористость.

Методы порошковой металлургии, а именно процессы компактирования порошковых железосодержащих материалов, позволяют получать механические плотноупакованные системы регламентированной структуры, при этом, следует отметить, что в настоящее время недостаточно развиты теория и практика образования структур теоретической плотности, имеющих прочные межчастичные диффузионные связи с образованием эффективного ювенильного контакта.

Анализ схем структурообразования высокоплотных изделий показал, что прямое использование схем традиционного деформирования вызывает появление дефектов, в основном, связанных с образованием перепрессовочных трещин, а также ограничение технологических возможностей при изготовлении деталей широкой гаммы типоразмеров и физико-механических свойств.

Теоретические работы в области консолидации и пластической деформации полидискретных гетерогенных трёхфазных механических систем, а также существующая практика получения структур теоретической плотности выявили необходимость

разработки концепции интенсивного уплотнения и структурообразования увлажненных дисперсных железосодержащих материалов при получении структур теоретической плотности на основе развития дискретно-корпускулярной и континуальной теорий консолидации дисперсных порошковых материалов и условий пластичности с привлечением механики сплошной среды.

Отсутствие моделей и разработок структурообразования при интенсивном уплотнении гетерофазных увлажненных механических смесей на основе металлических дисперсных материалов сдерживает его широкое применение в промышленности.