

**С.В.Ващенко, Б.Н.Маймур, В.И.Петренко, К.В.Баюл, А.Ю.Худяков,  
Н.А.Солодкая, Э.Б.Прокудина**

**ИССЛЕДОВАНИЕ УСЛОВИЙ И МЕХАНИЗМОВ ФОРМИРОВАНИЯ  
ПРОЧНОСТНЫХ СВЯЗЕЙ В ПРЕССОВКАХ ПРИ БРИКЕТИРОВАНИИ  
МЕЛКОФРАКЦИОННЫХ ШИХТОВЫХ МАТЕРИАЛОВ**

*Институт черной металлургии им. З.И. Некрасова НАН Украины*

Разработана концептуальная модель процесса прессования мелкофракционных материалов. Выполнен анализ влияния различных факторов (структура и свойства частиц материала, его физико-механические свойства) на формирование прочностных связей, возникающих между частицами в процессе прессования (параметры уплотнения и межчастичное взаимодействие). Установлены зависимости пористости прессовок от интегрального показателя свойств - насыпной плотности - для четырех ранее сформированных групп систематизации материалов по их способности уплотняться. Полученные зависимости могут быть использованы для разработки методов оценки прочности прессовок из различных видов материалов.

**Ключевые слова:** мелкофракционные материалы, прессование, концептуальная модель, прочность прессовок, межчастичное взаимодействие

**Состояние вопроса и постановка задачи.** Эффективность металлургических процессов в значительной степени определяется качеством используемого сырья. Для каждого технологического процесса – доменного, сталеплавильного, производства ферросплавов и др. – формируются требования к характеристикам сырья, которые определяют его поведение на разных стадиях переработки, обеспечивают полноту протекания физических и химических процессов, предусмотренных металлургическим переделом. В связи с обеднением природных запасов металлургического сырья, как рудного, так и топливно-энергетического, в последние десятилетия все шире используются дополнительные сырьевые источники, в частности, брикеты из мелкофракционных сырьевых материалов и промышленных отходов.

Основным критерием выбора технологических режимов брикетирования является получение качественных брикетов, отвечающих требованиям, предъявляемым к металлургическому сырью. Одним из основных требований к брикетам является их высокая механическая прочность. Сырье должно противостоять ударным и истирающим нагрузкам, имеющим место непосредственно в металлургических агрегатах, а также при перевозках, перегрузках.

Изучение положений теории прессования дисперсных систем, анализ литературных источников, в которых представлены исследования как в области порошковой металлургии, так и в области брикетирования, показывают, что в настоящее время существует многообразие мнений о

природе и характере прочностных связей, образующихся в компактном теле в процессе уплотнения. На сегодняшний день нет научно-обоснованных способов оптимизации условий получения компактного продукта с необходимыми прочностными характеристиками, не установлены закономерности влияния различных факторов на процессы межчастичного взаимодействия и формирования прочностных связей и, как следствие, отсутствуют корректные математические модели оценки прочности прессовок. Для создания методов объективной оценки прочностных характеристик прессовок необходимо разработать единые и непротиворечивые количественные критерии роста прочности прессовок в процессе уплотнения. Разработка методов прогнозирования и количественной оценки прочности прессовок из различных видов материалов на разных стадиях уплотнения позволит в дальнейшем реализовать возможность управления процессом получения брикетов, усовершенствовать технологические процессы их производства, повысить эффективность работы прессового оборудования.

**Методика экспериментальных исследований.** Проанализировав основные литературные данные о методах аналитического описания роста прочностных характеристик в процессе консолидации дисперсных материалов, можно сказать, что решение этой задачи не представляется возможным без проведения экспериментальных исследований. Для разработки таких методов необходимо изучить механизм формирования прочных связей в брикете, различные процессы, протекающие при прессовании мелкофракционных шихт, экспериментальным путем получить достаточный объем данных, анализ и обобщение которых позволит установить общие закономерности и зависимости, характеризующие эти процессы.

Создание теоретических методов оценки механической прочности с учетом механизмов формирования прочностных связей, свойств шихтовых материалов и параметров нагружения является актуальной задачей. Для ее решения необходим последовательный, поэтапный подход к учету влияния как отдельных факторов, так и их сочетаний на процесс упрочнения брикетов. В данной работе изучены две схемы межчастичного взаимодействия: «частица+частица»; «частица+вода+частица», без участия специальных связующих веществ. Первая схема межчастичного взаимодействия предполагает изучение механизма формирования прочных брикетов из сухих материалов ( $W = 0\%$ ), что позволит оценить силы механического сцепления, а также межатомного и межмолекулярного взаимодействия при различных параметрах нагружения, в первую очередь, за счет влияния свойств частицы. Вторая схема межчастичного взаимодействия предполагает введение в исследуемые материалы определенного количества влаги, что позволит учесть влияние сил межатомного и межмолекулярного взаимодействия.

Для проведения экспериментальных исследований выбраны

материалы таким образом, чтобы был представлен весь спектр свойств как частиц вещества, так и сыпучего материала.

Количество вводимой в шихту влаги для изучения влияния механизма формирования прочностных связей при схеме межчастичного взаимодействия «частица+вода+частица» выбрано исходя из следующих условий:

- необходимо, чтобы вводимой влаги было достаточно для полного и равномерного смачивания поверхности частиц во всем объеме порции мелкофракционного материала;

- влага не должна выдавливаться на поверхность прессовки в процессе прессования при применяемой в экспериментах максимальной нагрузке;

- количество влаги выбирается исходя из одинакового объемного соотношения материала и воды для всех шихт.

Экспериментальным путем был осуществлен подбор количества вводимой влаги - 6 % для всех исследуемых материалов.

Для установления связей прочностных характеристик с параметрами нагружения выбраны давления прессования и параметры нагружения порций исследуемых материалов и шихт – 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 110 МПа. Выбор максимального значения давления прессования основывался на том, что, как показывает опыт брикетирования различных шихтовых материалов, давление 110 МПа является достаточным для получения брикетов, удовлетворяющих требованиям различных металлургических переделов. После каждого нагружения выполнялись замеры параметров уплотнения и прочности прессовок на сжатие.

В качестве оценочного показателя прочности прессовок была выбрана прочность при сжатии. При выборе прочности на сжатие в качестве показателя прочности прессовок исходили из того, что эта характеристика в наибольшей степени определяется прочностью частиц прессуемого материала и прочностью связей между ними. Определяемые при технологической оценке брикетов прочность на сбрасывание и истираемость в данном случае менее показательные, т.к. на их значения влияют форма, размер и масса, состояние поверхности образцов.

Возникновение прочностных связей в брикетах определяется силами механического, межатомного и межмолекулярного сцепления частиц. Их величина в значительной степени зависит от контактной поверхности частиц. В процессе формирования брикета по мере увеличения нагружения прессуемого материала величина контактной поверхности взаимодействия частиц изменяется. Для изучения влияния величины развития контактной поверхности на возникновение прочностных связей в объеме прессовки, в качестве характеристики, отражающей изменение контактной поверхности в процессе прессования, принята пористость прессовки, т.к. пористость характеризует сближение и плотность упаковки частиц в объеме прессовки, деформацию и разрушение частиц под действием приложенного давления, т.е. процессы, при которых

формируется и изменяется контактная поверхность.

**Экспериментальные исследования и анализ полученных результатов.** Для анализа факторов, влияющих на условия формирования и развития прочностных связей, проведены экспериментальные исследования и получен массив данных, которые были обобщены, систематизированы и представлены в виде таблиц и графиков (табл. 1 - 2, рис. 1 - 3).

Проведенный на основе экспериментальных данных взаимно-корреляционный анализ взаимосвязи факторов и их влияния на прочность прессовок не позволил получить корректные критерии качественной и количественной оценки повышения прочностных характеристик дисперсного материала в процессе уплотнения. Это объясняется неоднозначностью и противоречивостью влияния отдельных исследуемых факторов, что подтверждает изучение литературных источников [1-9]. Так, например, чем прочнее частица материала, тем прочнее будет конгломерат таких частиц, образовавшийся под действием приложенного давления. Однако, с другой стороны, чем выше твердость и прочность частицы, тем больше давление прессования, необходимое для создания условий формирования прочных связей [2-3].

Таким образом, выполненные экспериментальные исследования на материалах с широким спектром изменения свойств показали, что структура и прочность прессовок существенным образом зависят от характеристик и состояния уплотняемого материала (табл. 1 и 2). Однако попытка в данной работе, как и в рассмотренных литературных источниках, выполнить анализ влияния совокупности всех известных факторов на величину прочности прессовок не позволила получить объективные решения и разработать на их основе аналитическую модель определения прочностных характеристик, справедливую для различных условий уплотнения материалов с изменяющимися компонентным составом, структурой и физико-механическими свойствами. Дальнейшие разработки корректных методов математической оценки прочности прессовок невозможны без осознания сложного комплекса процессов, определяющих возникновение прочностных связей в объеме сформированного в процессе прессования компактного тела.

Для получения достоверной модели формирования прочностных связей в дисперсных системах в процессе уплотнения предложен новый концептуальный подход, заключающийся в формализации совокупности факторов (структура и свойства частиц уплотняемого материала, его физико-механические свойства, параметры уплотнения и межчастичного взаимодействия) на базе анализа их роли и степени влияния на механизм образования межчастичных связей, на создание условий для протекания процессов, определяющих тот или иной механизм межчастичного взаимодействия.

Таблица 1. Факторы, определяющие прочность прессовок при раздавливании (сухие материалы – W=0%).

	Исследуемые шихтовые материалы	Твердость частиц по минералогической шкале Мооса	Твердость частиц по Бринеллю (НВ), МПа	Предел текучести, МПа	Предел прочности при сжатии, МПа	Модуль упругости, МПа	Пикнетрическая плотность материала ( $\rho_{плнк}$ ), $\times 10^3$ кг/м <sup>3</sup>	Средний диаметр частиц ( $d_{ср}$ ), мм	Насыпная плотность шихты ( $\rho_0$ ), $\times 10^3$ кг/м <sup>3</sup>	Пористость шихты (П), %	Коэффициент уплотнения при 110 МПа	Пористость прессовки при 110 МПа (П), %	Прочность прессовок при 110 МПа, кг/образец
1	Чугунная стружка	4	600	120	200	90000	7.4	2.5	1.92	74.01	1.95	49.35	3100
2	Прокатная окалина	5	-	-	-	5000	5.15	2.5	1.23	76.08	-	-	-
3	SiMn	-	-	-	102	-	6.48	1	2.87	55.65	-	-	-
4	Ильменитовый концентрат	6	750	436	576	117500	4.42	0.25	2.17	50.9	-	-	-
5	Известь гашеная	3,5	160	15	50	26000	2.21	0.25	0.45	77.42	3.09	30.14	1640
6	Флюоритовый концентрат	4	-	-	116	75800	3.18	0.25	1.61	49.28	-	-	-
7	Алюминиевая стружка (форма – пластинки)	2,75	175	65	-	70000	2.71	1.5	0.78	71.22	-	-	-
8	Алюминиевая стружка (форма – спиральки)	2,75	175	65	-	70000	2.71	2.5	0.4	85.24	-	-	-
9	Графит	1	390	-	30	6000	2.23	0.25	0.57	74.62	-	-	-
10	Угольный штыб	0,5	-	-	7	2000	1.45	1	0.88	39.66	-	-	-
11	Торф низинный	-	-	-	-	1500	1.7	1.5	0.65	61.53	-	-	-
12	Лигнит	-	-	-	-	1500	1.3	1	0.67	48.23	-	-	-

Таблица 2. Факторы, определяющие прочность прессовок при раздавливании (влажные материалы – W=6%).

	Твердость частиц по минералогической шкале Мооса	Твердость частиц по Бринеллю (НВ), МПа	Предел текучести, МПа	Предел прочности при сжатии, МПа	Модуль упругости, МПа	Пикнометрическая плотность материала ( $\rho_{\text{пикном}}$ ), $\times 10^3$ кг/м <sup>3</sup>	Средний диаметр частиц ( $d_{\text{ср}}$ ), мм	Насыпная плотность шихты ( $\rho_0$ ), $\times 10^3$ кг/м <sup>3</sup>	Пористость шихты (П), %	Коэффициент уплотнения при 110 МПа	Пористость прессовки при 110 МПа (П), %	Прочность прессовок при 110 МПа, кг/образец
1	Чугунная стружка	4	600	120	200	90000	2.5	1.6	79.08	2.66	44.3	3500
2	Прокатная окалина	5	-	-	-	5000	2.5	0.73	86.68	4.17	44.66	3500
3	SiMn	-	-	-	102	-	1	2.01	68.98	1.85	39.98	1345
4	Ильменитовый концентрат	6	750	436	576	117500	0.25	1.39	68.55	-	-	-
5	Известь гашеная	3,5	160	15	50	26000	0.25	0.51	76.92	3.63	11.25	2535
6	Флюоритовый концентрат	4	-	-	116	75800	0.25	1.18	62.89	1.78	34.12	380
7	Алюминиевая стружка (форма – пластинки)	2,75	175	65	-	70000	1.5	0.78	72.14	-	-	-
8	Алюминиевая стружка (форма – спиральки)	2,75	175	65	-	70000	2.5	0.4	85.71	-	-	-
9	Графит	1	390	-	30	6000	0.25	0.42	79.61	3.08	36.43	411
10	Угольный штыб	0,5	-	-	7	2000	1	0.82	50.3	1.84	8.96	375
11	Торф низинный	-	-	-	-	1500	1.5	0.63	55.32	1.98	10.92	1970
12	Лигнит	-	-	-	-	1500	1	0.71	49.65	1.85	6.24	1100

Исходя из базовых положений теории уплотнения дисперсных материалов, прочность прессовок определяется прочностью частиц и прочностью связей на их контактах, возникающих в процессе прессования. В зависимости от величины указанных характеристик разрушение прессовки может происходить, как за счет разрушения частицы, так и за счет разрыва связей межконтактного сцепления (рис.4).

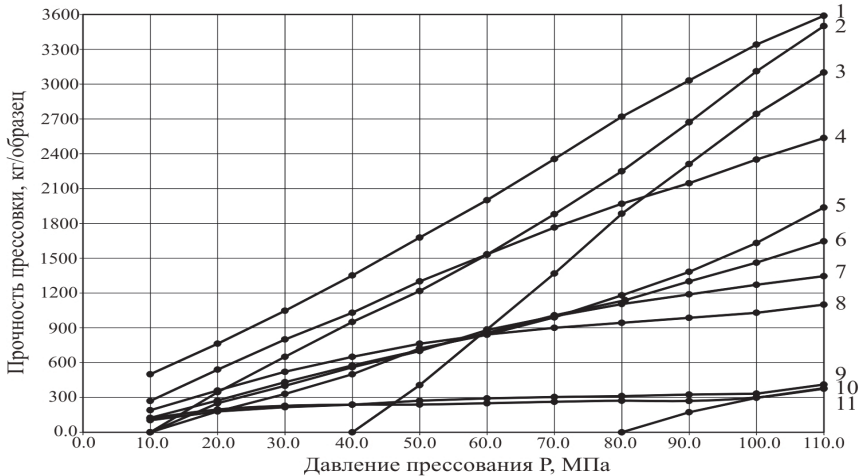


Рис.1. Зависимости прочности прессовок от давления прессования. 1 - прокатная окалина (W = 6 %); 2 - чугунная стружка (W = 6 %); 3 - чугунная стружка (W = 0 %); 4 - известь гашеная (W = 6 %); 5 - торф низинный (W = 6 %); 6 - известь гашеная (W = 0 %); 7 - SiMn (W = 6 %); 8 - лигнит (W = 6 %); 9 - графит (W = 6 %); 10 - угольный штыб (W = 6 %); 11 - флюоритовый концентрат (W = 6 %).

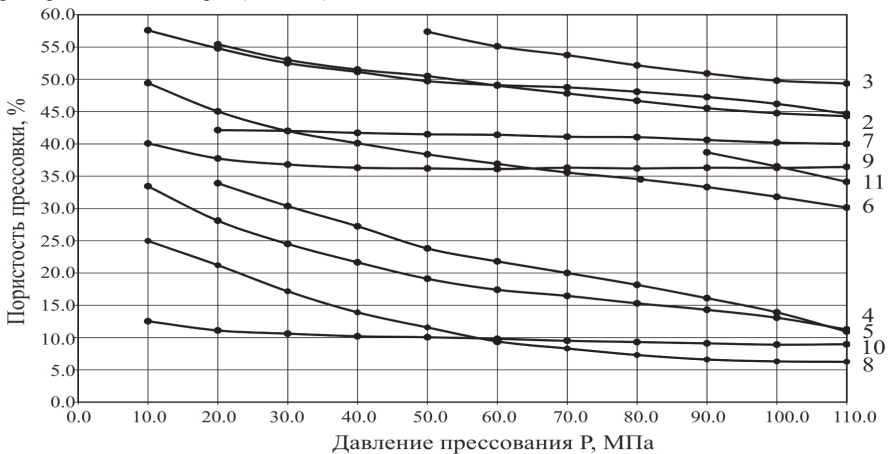


Рис.2. Зависимости пористости прессовок от давления прессования. (Обозначения приведены на рис.1).

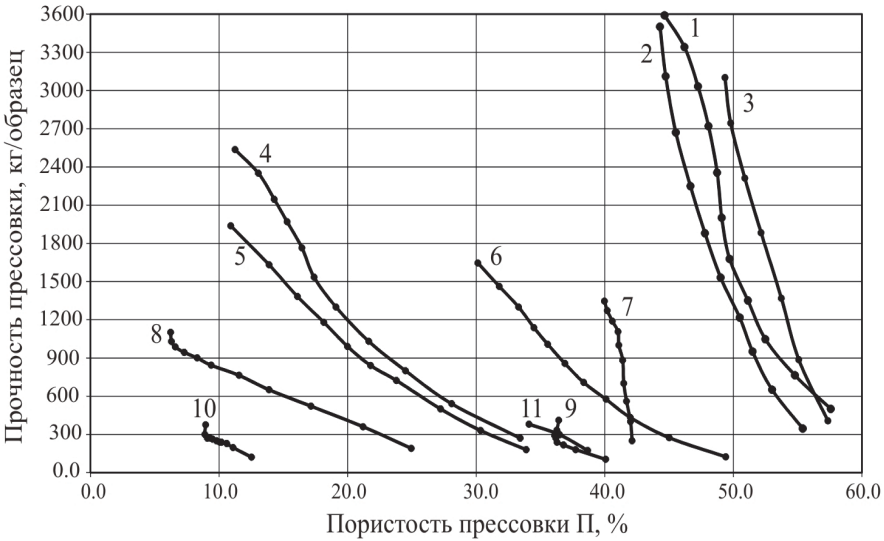


Рис.3. Зависимости прочности от пористости прессовок. (Обозначения приведены на рис.1).

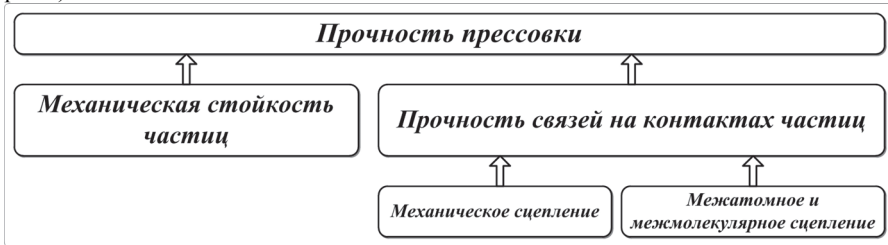


Рис.4. Схема формирования прочностных связей в прессовках

Представленная на рис.4 схема позволяет выполнить первичную формализацию факторов, влияющих на характеристики прочности прессовки, а именно, выделить группы факторов, определяющих механическую стойкость частицы, и факторов, способствующих развитию сил межчастичного сцепления.

Под механической стойкостью подразумевается способность частицы выдерживать механические нагрузки, не разрушаясь в процессе раздавливания прессовки. Она характеризуется [10-13]:

- прочностью частицы – способностью сопротивляться разрушению, показателем которой является предел прочности при сжатии;
- твёрдостью – способностью материала сопротивляться вдавливанию в него другого материала;
- пластичностью – способностью материала получать остаточные деформации без разрушения, ее показателем является предел текучести.



Как видно из таблицы 1, наибольшее значение предела прочности частицы у ильменитового концентрата – 576 МПа, у которого наивысшие значения твердости – 750НВ и предела текучести – 436 МПа. Наименьшая величина предела прочности частицы у гашеной извести – 50 МПа, у которой твердость – 160НВ и предел текучести – 15 МПа. Необходимость учета значимости каждого из указанных свойств подтверждается на примере чугунной стружки, у которой достаточно высокий показатель твердости – 600НВ, но сравнительно низкое значение предела текучести – 120 МПа, т.е. возможны различные комбинации и сочетания характеристик и по-разному проявляется их влияние на конечную прочность прессовок. Таким образом, механические свойства частицы прессуемого материала можно рассматривать как одну из выделенных групп факторов, которые обеспечивают способность выдерживать внешние нагрузки, т.е. напрямую влияют на прочность прессовок.

Следующая выделенная группа содержит совокупность факторов, влияющих на развитие и величину прочностных связей на контактах частиц. Формирование прочностных связей между частицами представляет собой сложный комплекс механических и физических процессов межчастичного взаимодействия. Определение характера и величины этих связей невозможно без изучения механизмов их образования: механическое сцепление; межатомное сцепление.

Формирование прессовки происходит в результате сближения частиц в процессе уплотнения под действием давления прессования. По мере нагружения происходит перемещение частиц и их плотная упаковка в объеме прессовки, изменение формы и размеров в результате упругой и пластической деформации, а также разрушения частиц. За счет изгибов, поворотов и переплетения между собой осуществляется механическое сцепление частиц. Межатомное сцепление происходит в результате тесного сближения частиц на расстояния, при которых создаются условия для проявления сил электростатического притяжения (силы Ван-дер-Ваальса) на образовавшихся физических контактах атомов или молекул [14, 15]. Этот механизм межчастичного сцепления известен как адгезия, когезия и аутогезия.

Следующим этапом формализации факторов, влияющих на прочностные характеристики прессовок, является выделение группы факторов, определяющих условия развития указанных выше механизмов образования межчастичных связей, и группы факторов, определяющих величину силы межчастичного сцепления. Необходимым условием для активации каждого из указанных механизмов межчастичного сцепления является формирование контактов частиц и увеличение контактной поверхности в процессе уплотнения под действием приложенного давления прессования. Суммарная контактная поверхность частиц характеризуется площадью и количеством образованных контактов. В качестве показателя, отражающего изменение величины контактной поверхности, принята пористость прессовки.

Снижение пористости прессовки отражает рост суммарной контактной поверхности. Наглядным примером такой связи является изменение пористости при прессовании сухой чугунной стружки (начальная пористость  $P_0 - 74,01\%$ , конечная пористость  $P - 49,35\%$ ), что позволяет достичь высоких показателем прочности – 3100 кг/образец (табл.1, рис.1).

Давление прессования является основным фактором, определяющим сближение частиц и рост контактной поверхности за счет уменьшения пористости. На рис.2 представлены зависимости пористости от давления прессования для исследуемых материалов. Сравнительный анализ графиков, представленных на рис.1 и 2 показывает, что для всех материалов с увеличением давления прессования наблюдается снижение пористости и увеличение прочности прессовок. Однако интенсивность изменения этих показателей у разных материалов значительно отличается. Так, для достижения одной и той же прочности прессовок – 1300 кг/образец из извести гашеной с влажностью  $W = 6\%$  необходимо давление прессования 50 МПа, а из извести с влажностью  $W = 0\%$  – 90 МПа, при этом их пористость  $P$  равна соответственно  $\sim 19\%$  и  $\sim 34\%$ , а коэффициент уплотнения  $K_v$  соответственно – 3,3 и 2,9. Это объясняется различной способностью материала изменяться в объеме в процессе прессования - уплотняемостью, а также состоянием контактной поверхности частиц.

Так, например, экспериментальные данные показывают, что высокая уплотняемость прокатной окалины с влажностью  $W = 6\%$  (коэффициент уплотнения при давлении прессования 110 МПа –  $K_{v110} = 4,17$ ) способствует снижению пористости  $P$  с 86,68% до 44,66% и получению прессовок с прочностью 3500 кг/образец, в то время как в том же диапазоне давлений в процессе прессования отсева силикомарганца, характеризующегося низкой уплотняемостью ( $K_{v110} = 1,85$ ), пористость изменилась незначительно – с 68,98% до 40% при этом прочность прессовки составила 1350 кг/образец. Как видно из рис.1-2, чем больше способность материала к активному изменению своего объема в процессе прессования ( $K_{v110}$ ), тем более интенсивно будет снижаться пористость прессовки и, соответственно, увеличиваться площадь контакта частиц. Таким образом, анализ экспериментальных данных показал, что уплотняемость материала согласно предложенной формализации является фактором, определяющим рост контактной поверхности, т.е. влияющим на формирование условий для сцепления частиц между собой.

К этой группе факторов, которые непосредственно влияют на величину контактной поверхности, также относятся показатели состояния контактной поверхности частиц – шероховатость, неровность, твердость. В материалах, у которых поверхность частиц имеет большое количество неровностей с повышенной твердостью, сложно добиться площади контакта, достаточной для возникновения прочных связей, так как в процессе прессования при физическом соприкосновении контактирующих тел твердый поверхностный слой практически не деформируется, невозможно достичь плотного сопряжения частиц по их границам.

Следующим этапом формализации факторов является выделение факторов, определяющих уплотняемость материала. В работах, выполненных сотрудниками ИЧМ [16-18], показано, что поведение материалов в процессе уплотнения определяется совокупностью взаимосвязанных свойств, изменение каждого из которых может привести к изменению остальных, исследовано влияние физико-механических характеристик, как сыпучего материала, так и частиц, из которых он состоит, на уплотняемость. Результаты экспериментальных исследований и выполненный на их основе факторный анализ показали, что насыпная плотность ( $\rho_0$ ) является характеристикой, отражающей изменения всех других свойств, влияющих на показатель уплотняемости. Это позволило обосновано выбрать насыпную плотность в качестве интегрального показателя, отражающего влияние совокупности свойств на процесс уплотнения. На основе аналитических методов исследования взаимосвязи свойств материалов и оценки их влияния на уплотняемость предложена систематизация шихтовых материалов по их способности уплотняться. На основании анализа свойств исследуемых шихт в качестве показателя, определяющего распределение шихт по группам систематизации, принята пикнометрическая плотность ( $\rho_{\text{пикн}}$ ). Исходя из изложенного, в качестве факторов, определяющих уплотняемость, может использоваться насыпная ( $\rho_0$ ) и пикнометрическая ( $\rho_{\text{пикн}}$ ) плотности [17]. Как следует из экспериментальных данных (табл.1-2), материалы с низкой насыпной и пикнометрической плотностью имеют более высокие показатели уплотнения. Так, например, у чугуной стружки ( $W=0\%$ ,  $\rho_0 = 1,92 \times 10^3 \text{ кг/м}^3$ ,  $\rho_{\text{пикн}} = 7,4 \times 10^3 \text{ кг/м}^3$ ) характеристики уплотнения  $K_y = 1,95$ ,  $\Pi = 49,35\%$ , а у извести гашеной ( $W=0\%$ ,  $\rho_0 = 0,45 \times 10^3 \text{ кг/м}^3$ ,  $\rho_{\text{пикн}} = 2,21 \times 10^3 \text{ кг/м}^3$ ) характеристики уплотнения  $K_y = 3,09$ ,  $\Pi = 30,14\%$ .

Дальнейшая формализация факторов предусматривает выделение группы факторов, определяющих механизм образования прочностных связей и их величину. Механическое сцепление определяется свойствами частиц материала: сложной формой (спиралевидной, игольчатой и т.д.); шероховатой поверхностью, с большим количеством неровностей; высокой твердостью поверхностного слоя; повышенной пластичностью.

Сложная форма частиц способствует многоуровневому переплетению частиц даже при минимальных давлениях прессования. Неровность и высокая твердость негативным образом влияют на развитие контактной поверхности, но, в то же время, высокая абразивность поверхности частиц будет способствовать механическому сцеплению. Повышенная пластичность материала позволяет активизировать наибольшее количество контактных поверхностей в структуре межконтактных связей и сохранить их в объеме прессовки после снятия нагрузки. Пример активного проявления механического сцепления получен на прессовках из алюминиевой стружки, т.к. частицы данного материала имеют сложную форму и обладают повышенной пластичностью.

Процессы межатомного и межмолекулярного сцепления протекают при

следующих схемах межчастичного взаимодействия: «частица+частица», «частица+жидкая фаза+частица». Как для сухого, так и для влажного материала, величина сил электростатического притяжения определяется величиной заряда и массой атомов, а также межатомным расстоянием [1, 14, 15].

Как говорилось ранее, контакт твердых поверхностей осуществляется либо непосредственно, либо через тонкие пленки жидкой фазы. Введение влаги в прессуемые материалы и развитие адгезионных процессов влияет, как на развитие контактной поверхности, так и на величину сил межатомного сцепления. Формирование довольно значительной площади контакта обусловлено способностью жидкости копировать рельеф твердой поверхности.

Рассмотрим влияние влаги на примере получения прессовок из гашеной извести и чугунной стружки. При введении 6% воды в сухие материалы увеличивается величина межатомного и межмолекулярного сцепления, о чем свидетельствует увеличение прочности прессовок, полученных при 110 МПа (известь гашеная –  $W=0\%$  - 1640 кг/образец;  $W=6\%$  - 2535 кг/образец; чугунная стружка –  $W=0\%$  - 3100 кг/образец;  $W=6\%$  - 3500 кг/образец).

Выполненный анализ факторов, определяющих прочностные характеристики прессовок, и их формализация по характеру и степени влияния, позволил создать многофакторные модели формирования прочностных связей в прессовках за счет механического (рис. 5) и межатомного сцепления (рис. 6). Представленные модели позволяют учесть многочисленные факторы, их сложные взаимосвязи и отражают характер их влияния на процессы межчастичного сцепления. Формализация факторов по их роли и значению в создании условий для образования и развития прочностных сил позволяет учесть неоднозначность и противоречивость их влияния. В условиях отсутствия точных и реализуемых на практике математических решений оценки прочности прессовок модельное представление является простым и общедоступным.

Разработанные модели отражают принятый в работе подход к созданию методов прогнозирования и оценки прочностных характеристик прессовок, основанный на изучении и понимании сложных механизмов и процессов формирования прочностных связей в прессовках с учетом влияния различных факторов, характеризующих условия прессования, физико-механические и технологические свойства прессуемых материалов. Данные модели отражают обобщенное представление о последовательности влияния различных факторов на возникновение сил сцепления, взаимосвязи этих факторов между собой, а также о доминирующих факторах, определяющих развитие конкретных механизмов межчастичного взаимодействия.

Дальнейшее развитие выполненных исследований заключается в разработке локальных моделей, отражающих воздействие на формирование прочностных связей как отдельных факторов, так и их совместное влияние в различных сочетаниях. К таким комбинациям относятся, в первую очередь, давление прессования, свойства шихтовых материалов, вид и количество связующих добавок.

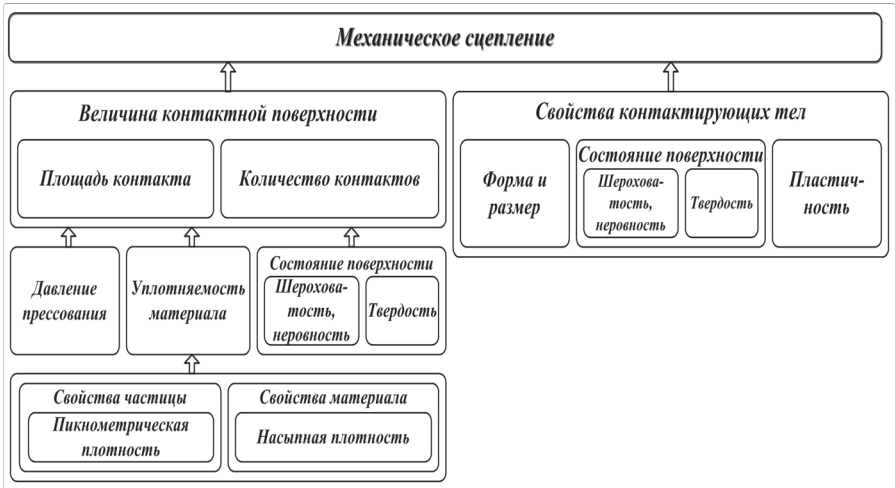


Рис. 5. Структура многофакторной модели формирования прочностных связей за счет механического сцепления



Рис. 6. Структура многофакторной модели формирования прочностных связей за счет межатомного и межмолекулярного сцепления

**Заключение.** Модельное представление позволяет учесть связи большого количества факторов, определяющих прочностные показатели прессовок, разнохарактерность их влияния, создает условия для выделения наиболее значимых параметров и их взаимосвязей, обосновано выбрать комплексные показатели и определить оценочные количественные критерии прочности. Полученные авторами результаты открывают новые возможности

в разработке аналитических методов прогнозирования и количественной оценки прочности прессовок из различных видов материалов на разных стадиях уплотнения, на основе моделирования составов шихт, получать брикеты необходимой прочности, отвечающих требованиям к металлургическому сырью.

1. *Бальшин М.Ю.* Научные основы порошковой металлургии и металлургии волокна / М.Ю. Бальшин // М.: Металлургия, 1972. – С. 336.
2. *Ожогин В.В.* Взаимосвязь показателей механической прочности брикетированных материалов / В.В. Ожогин // Вісник Приазов. держ. техн. ун-ту: Зб. наук. пр. – Мариуполь: - 2006. – Вип. 16. – С. 17 – 21.
3. *Ожогин В.В.* Основы теории и технологии брикетирования измельченного металлургического сырья: Монография. / В.В. Ожогин // Мариуполь: ПГТУ, 2010. – С. 442.
4. *Цеменко В. Н.* Процесс порошковой металлургии. Теория и физические основы уплотнения порошковых материалов: учеб. пособие. / В.Н. Цеменко // СПб.: Изд. Политехн. ун-та, 2005. – С. 116.
5. *Теория и практика процесса прессования гетерофазных увлажненных механических смесей на основе железа* / В.Н.Кокорин, А.И.Рудской, В.И.Филимонови др. // Ульяновск: УлГТУ, 2012. – С. 236.
6. *Кипарисов С.С.* Порошковая металлургия / С.С. Кипарисов, Г.А. Либенсон // М.: Металлургия, 1991. – С. 432.
7. *Равич Б.М.* Брикетирование в цветной и черной металлургии / Б.М. Равич // М.: Металлургия, 1975. – С. 232.
8. *Елишевич А.Т.* Брикетирование полезных ископаемых / А.Т. Елишевич // М.: Недра, 1989. – С. 300.
9. *Джонс В. Д.* Основы порошковой металлургии. Прессование и спекание. / В. Д. Джонс // Издательство “Мир”, Москва, 1965.
10. *Гениев Г.А.* Теория установившегося движения сыпучей среды. Исследование прочности, пластичности и ползучести строительных материалов / Г.А. Гениев // Госстройиздат, (Сб. ЦНИИ МПС). - 1955.
11. *Панин В.Е.* Современные проблемы пластичности и прочности твёрдых сред / В.Е. Панин // Изв. вузов. Физика, 1998. – №1. – С. 7–32.
12. *Диагностика металлических порошков* / В.Я. Буланов, Л.И. Кватер [и др.] // М.: Наука. – 1983.
13. *Иванько А.А.* Твердость. Справочник: под редакцией члена-корреспондента АН УССР Г.В. Самсонова / А.А. Иванько // К.: Наукова думка, 1968.
14. *Зимон А.Д.* Аутогезия сыпучих материалов / А.Д. Зимон, Е.И. Андрианов // М.: Металлургия, 1978. – С. 288.
15. *Славинский М.П.* Физико-химические свойства элементов: переработал, дополнил и подготовил к печати доц. канд. техн. наук А.Е. Вол / М.П. Славинский // М.: Металлургиздат, 1952.
16. *Ващенко С.В., Муравьева И.Г.* Классификация мелкофракционных сырьевых материалов и отходов металлургической промышленности // VII Міжнародна науково-технічна студентська конференція “Молода академія 2011”. Збірка тез. – Дніпропетровськ 2011.

17. *Разработка* методического подхода к определению уплотняемости прессуемых шихт с учетом их свойств. / С. В. Ващенко, Б. Н. Маймур, В. И. Петренко, И. Г. Муравьева // «Научные вести. Современные проблемы металлургии». – Днепропетровск: НМетАУ – 2011. – Вып. 14. – С. 85–92.
18. *Ващенко С.В.* Разработка аналитического метода прогнозирования и оценки сопротивления шихт сжатию с учетом их свойств. / С.В. Ващенко, Б.Н. Маймур, В.И. Петренко, И.Г. Муравьева // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных трудов. – Выпуск 4 (81). – Днепропетровск, 2012. – С. 3 – 10.

*Статья рекомендована к печати  
докт.техн.наук И.Ю.Приходько*

*С.В.Ващенко, Б.М.Маймур, В.І.Петренко, К.В.Баюл, О.Ю.Худяков,  
Н.О.Солодка, Е.Б.Прокудіна*

**Дослідження умов та механізмів формування міцнісних зв'язків у пресовках під час брикетування дрібнофракційних шихтових матеріалів**

Розроблено концептуальну модель процесу пресування дрібнофракційних матеріалів. Виконано аналіз впливу різних чинників (структура та властивості частинок матеріалу, його фізико-механічні властивості) на формування міцності зв'язків, що виникають між частинками у процесі пресування (параметри ущільнення та міжчасткової взаємодії). Встановлено залежності пористості пресовок від інтегрального показника властивостей (насіпна щільність) для чотирьох сформованих груп матеріалів за їх здатністю ущільнюватися. Отримані залежності може бути використано при розробці методів оцінювання міцності пресовок з різних видів матеріалів.

**Ключові слова:** дрібнофракційні матеріали, пресування, концептуальна модель, міцність пресовок, міжчасткова взаємодія

*S.V.Vaschenko, B.N.Maymur, V.I.Petrenko, K.V.Bayul, A.Yu.Khudyakov,  
N.A.Solodkaya, E.B.Prokudina*

**Research of the conditions and mechanisms of strength formation in compacts during briquetting of fine-fraction materials**

The developed conceptual model of the process of pressing small fraction of materials. The article shows the results of analysis of various factors (the structure and properties of the material particles and its physicommechanical properties) on the formation strength bonds between the particles arising during pressing (compaction parameters and the interparticle interaction). The dependencies of porosity compacts of the integral index properties (bulk density) for the four groups of materials formed by their ability to be compacted. Depending obtained can be used to develop methods for evaluating strength of compacts of different types of materials.

**Keywords:** small fraction materials, pressing, conceptual model, the strength of the compacts, the interparticle interaction