

УДК 621.762

## МЕХАНИКА ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ ПРОКАТЫВАЕМЫХ В ТОЛСТОМ СЛОЕ МАТЕРИАЛОВ

Докт. техн. наук, проф. ЛОЖЕЧНИКОВ Е. Б., асп. ГАВРИЛЕНЯ А. К.

Белорусский национальный технический университет

Находящийся между встречно вращающимися валками материал испытывает с ними силовое взаимодействие, определяемое граничными условиями, а также его физическими свойствами и состоянием. Твердые тела размером  $H \leq D_b(1 - \cos\alpha) + h_n$  (рис. 1), определяемым диаметром валков и углом захвата  $\alpha \leq \varphi_T$  ( $\varphi_T$  – угол трения), вовлекаются в валки и обжимаются до размера  $h_n$  [1]. При достаточном ресурсе деформационных возможностей они сохраняют свою целостность, в противном случае – разрушаются до связносыпучего состояния. Прокатка металла и порошка с целью его уплотнения и формования в длинномерные заготовки применяется в металлургии; размол кусковых и сыпучих материалов – в химической и пищевой промышленности, производстве строительных материалов, металлургии, галургии, при обогащении полезных ископаемых, гранулировании полуфабрикатов и других процессах. Обработка давлением прокаткой реализуется в прокатных станах, валковых, ролликоольцевых и конусных мельницах [1–3].

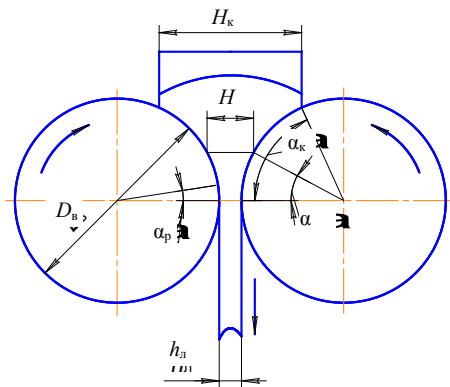


Рис. 1. Угловые параметры прокатываемого порошка:  $\alpha_k$  – угол контакта;  $\alpha$  – то же захвата;  $\alpha_p$  – то же прокатки

Различие физических и механических свойств твердых компактных и порошковых связносыпучих материалов предопределило существенные отличия условий и механизма их обработки давлением прокаткой. Порошки по своему определению представляют массу частиц размером не более 1 мм. Частицы размером более 1 мм принято считать гранулами [4]. Каждая из частиц в массе порошков и гранул находится с окружающими их частицами в контактном взаимодействии, определяемом критерием прочности Мора – Кулона – математическим описанием криволинейной огибающей кругов Мора (рис. 2):

$$\tau_n = \sigma_n \operatorname{tg}\varphi + c = (\sigma_n + \sigma_c) \operatorname{tg}\varphi, \quad (1)$$

где  $\sigma_n$  и  $\tau_n$  – нормальное и касательное напряжения к поверхностям сдвига;  $\varphi$  и  $c$  – соответственно угол межчастичного трения и сцепления частиц;  $\sigma_c$  – напряжение разрыва контактов между частицами [5, 6].

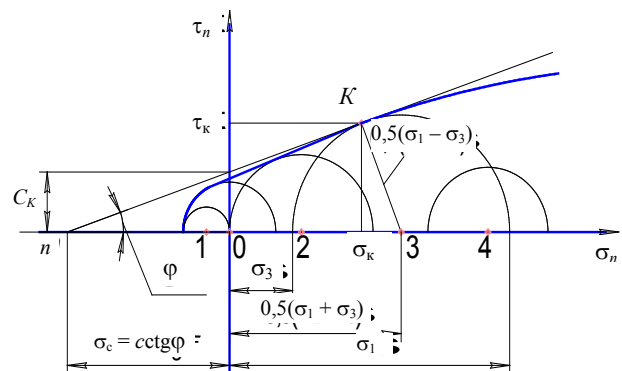


Рис. 2. Диаграмма кругов предельного состояния Мора: 0 – чистый сдвиг,  $\tau_n = c$ ; 1 – одноосное растяжение,  $\sigma_n = \sigma_1$ ; 2 – одноосное сжатие,  $\sigma_n = -\sigma_1$ ; 3 – двухосное сжатие; 4 – двухосное сжатие без сдвига

Восприятие связносыпучим материалом внешней нагрузки сопровождается ростом контактных напряжений между частицами, деформацией и увеличением поверхностей контактов. Это приводит к уменьшению его объема и увеличению плотности. Последнее можно описать выражением [3, 7]

$$\rho_{\sigma} = \rho_n + k p^m, \quad (2)$$

где  $\rho_n$  – насыпная плотность порошка;  $m$  и  $k$  – устанавливаемые экспериментально параметры, зависящие от свойств материала частиц порошка, способа нагружения (обработки) порошка и др.

С увеличением давления  $p$  и плотности  $\rho_{\sigma}$  порошка параметры  $c$  и  $\varphi$  изменяются (рис. 2): угол межчастичного трения уменьшается, а сцепление увеличивается. Это предопределяет отличие условий деформации связносыпучей среды от поликристаллического твердого тела, условие пластичности которого в главных напряжениях описывается формулой Сен-Венана – Трески [1]

$$\sigma_1^I - \sigma_3^I = \beta \sigma_s, \quad (3)$$

где  $\sigma_1^I$  и  $\sigma_3^I$  – большее и меньшее главные напряжения;  $\sigma_s$  – предел текучести материала;  $\beta = 1-1,15$  – коэффициент, учитывающий условия деформации.

Вытекающее из критерия прочности (1) соотношение компонент напряжений деформируемой связносыпучей среды описывается выражениями [5, 6]:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\sigma_x}{\sigma_y} \right\} &= \sigma(1 \pm \sin \varphi \cos 2\delta) - \sigma_c; \\ \tau_{xy} &= \sigma \sin \varphi \sin 2\delta, \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

где  $\sigma = 0,5(\sigma_1 + \sigma_3)$  – среднее напряжение;  $\delta$  – направление большего главного напряжения относительно базовой оси координат в двумерном пространстве.

Из образованного между осью абсцисс  $\sigma_n$  и касательной к огибающей кругов Мора прямоугольного треугольника  $n3K$  с меньшим, противолежащим углу  $\varphi$  катетом  $0,5(\sigma_1 - \sigma_3)$  вытекает условие пластичности (предельное состоя-

ние) связносыпучей среды в главных напряжениях

$$\sigma_1 - \sigma_3 = (\sigma_1 + \sigma_3) \sin \varphi + 2c \cos \varphi. \quad (5)$$

Следовательно, в отличие от компактных тел условие пластичности связносыпучих определяется не только свойствами обрабатываемого материала  $\sigma_s$ ,  $\varphi$  и  $c$ , но и величиной возникающего в нем меньшего главного напряжения. Поскольку с увеличением давления и плотности обрабатываемого связносыпучего материала до компактного состояния угол его межчастичного трения уменьшается до нуля  $\varphi \rightarrow 0$ , а  $2c \rightarrow \sigma_s$ , выражение (5) приобретает физический смысл и значение (3), т. е. (5) можно рассматривать как обобщенное условие пластичности для компактных твердых и порошковых материалов, состоящих из твердых частиц.

Вследствие того, что прочность сцепления обрабатываемых в холодную частиц порошка обычно меньше прочности материала частиц, механизм деформации и уплотнения порошка условно подразделяют на три следующих по мере уплотнения стадии. В начале нагружения преобладает структурная деформация – деформация за счет взаимного перемещения частиц порошка с уменьшением объема в результате их более плотной упаковки. Вторая стадия характеризуется сочетанием структурной деформации и возрастающей пластической деформацией частиц. При дальнейшем росте внешней нагрузки деформация и незначительное уплотнение порошкового тела происходят в основном за счет пластической деформации составляющих его частиц.

Поскольку сцепление частиц уплотненного в холодную порошка меньше прочности его частиц ( $2c \leq \sigma_s$ ), условие (5) свидетельствует о возможности деформации ранее уплотненного порошка внешним нагружением, меньшим предшествующей обработки при условии снижения меньшего главного напряжения  $\sigma_3$ , следовательно, и среднего  $\sigma$ . В этом случае структурная деформация вызывает разрыв ранее образовавшихся и создание новых контактов между частицами, площадь и прочность сцепления которых определяются действующими между ними напряжениями. При малых величинах  $\sigma_3$ , например при одноосном действии сосредоточенной нагрузки, ранее уплотненное

из порошка тело разуплотняется с возможностью его разрушения в порошок, размер частиц которого меньше исходного. Последнее является следствием их предшествующей обработки давлением в условиях интенсивных сдвигов по пересекающимся поверхностям скольжения.

Вследствие того, что частицы порошка представляют твердые тела, пластическая деформация с разрушением которых наступает при разности главных напряжений, описываемых условием (3), такая же разность главных напряжений должна быть в массе этих частиц, представляющих обрабатываемый давлением порошок, условия деформации которых зависят от величины среднего напряжения, что вытекает из условия (5). Подстановкой значений разности главных напряжений из (3) в (5) определена величина среднего напряжения, вызывающего деформацию и разрушение частиц ( $\beta = 1$ ):

$$\sigma = (\sigma_s - 2c \cos \varphi) v_\sigma / 2 \sin \varphi. \quad (6)$$

Введенная в числитель (6) величина относительной плотности порошка  $v_\sigma = \rho_\sigma / \rho$ , где  $\rho$  – плотность (удельный вес) материала частиц, учитывает реальную площадь сечения порошка. При этом большее главное напряжение, вызывающее согласно (2) уплотнение порошка до  $\rho_\sigma$  (внешнее давление  $p$  принято равным большему главному напряжению):

$$\sigma_1 = \sigma(1 + \sin \varphi) - \sigma_c. \quad (7)$$

Из изложенного следуют особенности условий и процессов обработки давлением порошков в валках. Сыпучесть исходного материала предопределяет отсутствие на входе в валки «жесткого конца», что обуславливает необходимость постоянного заднего подпора порошка на валки, который, как правило, реализуется гравитационными силами при вертикальной или под углом к горизонту направлении прокатки (рис. 1). Для повышения плотности и интенсивности захвата порошка валками применяют принудительный подпор, например, шнековыми питателями. Межвалковое пространство должно быть ограничено бункером с плотно прилегающими к бочке валков щеками. Ограничиваемый бункером угол контакта порошка с валками  $\alpha_k$  может достигать величины  $2\pi$ . Многочисленные эксперименты показали, что уменьшение угла контакта до некоторой

величины  $\alpha$ , принятой за угол захвата, при всех прочих равных условиях не оказывает влияния ни на толщину  $h$ , ни на плотность  $\rho_n$  прокатанной ленты [3, 8]. Из этого следует, что в межвалковом пространстве за пределами определяемого углом  $\alpha$  сечения захвата  $H$  структурная деформация порошка происходит без увеличения его плотности, а силовое взаимодействие его с валками ограничено реакцией на задний подпор. При углах контакта, меньших угла захвата, величина которого находится в пределах  $28\text{--}32^\circ$ , уменьшение или увеличение угла контакта приводит к снижению или повышению плотности и толщины порошкового проката. Изменение толщины при этом является следствием изменения плотности проката, давлений на валки и распирающих валки сил  $P_v$ , упругодеформирующих рабочую клетку прокатного стана [3].

При постоянных условиях процесса изменение межвалкового зазора (толщины проката) практически не влияет на интенсивность захвата порошка валками, о чем свидетельствует согласуемая с условием постоянства массы прокатываемого порошка гиперболическая зависимость между плотностью и толщиной проката

$$h_n \rho_n \cong C_n \cong \text{const}. \quad (8)$$

Эксперименты прокатки с фиксированием рентгеновскими лучами состояния порошка в межвалковом пространстве показали (рис. 3), что, начиная с сечения захвата, деформация порошка сопровождается интенсивными сдвигами по пересекающимся поверхностям скольжения, периодически вырождающимися в поверхности (слои) разрывов скоростей и напряжений [3, 8]. Углы наклона этих линий к направлению прокатки свидетельствуют о том, что в сечении захвата направление большего главного напряжения перпендикулярно направлению прокатки. Подстановкой в выраженную в полярной координате  $\varphi_i$  известную зависимость главного направления  $\delta$  от параметров трения [5, 6]  $\delta = 2\varphi_i + \varphi_\tau + \arcsin(\sin \varphi_\tau / \sin \varphi)$  значения  $\delta = 0,5\pi$  и  $\varphi_i = 0,5\pi - \alpha_m$  (рис. 1) получена формула наибольшего возможного угла захвата порошка валками [3]

$$\alpha_m = 0,5(\varphi_T + \arcsin(\sin \varphi_T / \sin \varphi)). \quad (9)$$

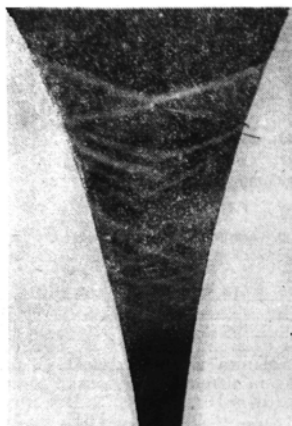


Рис. 3. Рентгенограмма очага деформации при прокатке

Установленное с помощью встроенной в валки прокатного стана точечной мессдозы распределение давлений по дуге захвата показало [3], что в области интенсивных сдвигов давления на валки незначительны и только, начиная с сечения, после которого поверхности пересекающихся разрывов на рис. 3 не проявляются, происходит резкий рост давлений, эпюра которых имеет близкую к треугольной форму с куполообразной вершиной – максимумом (рис. 4), определяющим плотность проката  $\rho_c$  в соответствии с (2). Длина дуги, соответствующая основанию эпюры давлений на валки, названа дугой прокатки:  $l_p = 0,5\alpha_p D_B$ , а угол  $\alpha_p$  – углом прокатки. Извлечение из валков недоката показывает, что вблизи соответствующего углу  $\alpha_p$  сечения порошок обычно уплотняется до состояния, способного сохранить форму, а его дальнейшее обжатие происходит в основном за счет деформации составляющих его частиц.

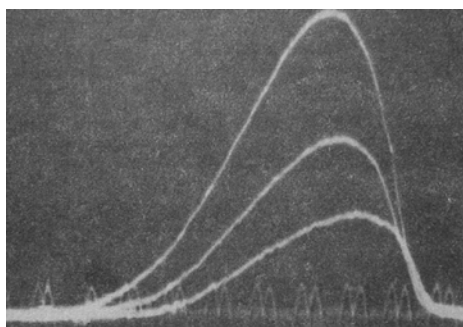


Рис. 4. Оциллограммы нормальных контактных напряжений при прокатке железного порошка в полосы разной плотности

Экспериментально установлено, что наибольшая толщина прокатываемых из порошков лент и полос при оптимальных условиях (направление прокатки, угол захвата, скорость прокатки) определяется диаметром бочки валков  $h \approx 0,01D_B$ . При этом в соответствии с (8) прокат имеет наименьшую обеспечивающую сохранение формы плотность.

Из этого следует второе условие уплотнения порошка в валках – зазор между валками не должен превышать  $0,01D_B$ .

Третьим условием прокатки порошков, обеспечивающим его уплотнение с деформацией и дроблением частиц, является то, что скорость прокатки не должна превышать разную для различных порошков верхнюю критическую скорость. Это обусловлено тем, что объем порошка на 2/3 и более состоит из пор, заполненных воздухом. При уплотнении объем пор уменьшается, а воздух выдавливается – фильтруется через поступающий в сечение захвата порошок, задерживая его движение. С увеличением скорости встречный движению порошка поток воздуха задерживает это движение, увеличивая объем пор. В результате масса захватываемого валками порошка уменьшается, что приводит к уменьшению параметра  $C_L$  (8). При превышении разной для различных порошков верхней критической скорости равномерность фильтрации воздуха через порошок нарушается. В межвалковом пространстве над и в сечении захвата образуются объемы псевдосжиженного порошка. Стабильность захвата и уплотнения порошка нарушается, из валков выходят отдельные куски уплотненного порошка (куски полос). При этом значительная его часть просыпается между валками, а рабочая клетка вследствие колебаний действующих между валками сил вибрирует.

Высокая газонасыщенность порошков обуславливает сравнительно низкие скорости их прокатки, обычно не превышающие 0,1–0,2 м/с.

Оставшийся в порах прокатанных полос воздух находится под высоким давлением, что при прокатке толстых с высокой плотностью полос (5–7 мм) приводит за счет порового давления к их разрушению с характерными выстрелоподобными звуками. Это наблюдалось, например, при размоле в валках диаметром

600 мм отработанных формовочных смесей литейных производств [9].

Исходя из изложенного следует, что прокатываемый в валках порошок деформируется и уплотняется. При этом составляющие его частицы находятся в условиях всестороннего сжатия под давлениями, соотношения и величины которых определяются выражениями (4)–(6). При низких деформационных возможностях материала частицы порошка и вследствие дефектов обычно развитой их поверхности, являющихся концентраторами напряжений, частицы прокатываемого порошка разрушаются и уплотняются в полосы (ленты), которые согласно (2) и (5) деформируются, разуплотняются (дилатация) и разрушаются в порошок при их последующем нагружении в условиях, обеспечивающих более низкие значения контактных напряжений между частицами.

Непрерывность процесса и стабильность энергосилового воздействия на обрабатываемый в валках материал обуславливают сравнительно низкую удельную энергоёмкость размола при высокой производительности, определяемой параметром  $C_d$ , диаметром и длиной бочки валков  $B$  и скоростью прокатки  $v_d$ :  $Q = \rho_n h_n B v_d$ . Обрабатываемый в толстом слое материал имеет ограниченный с поверхностью бочки валков контакт, что уменьшает их износ и загрязнение продуктов размола даже при обработке таких сверхтвёрдых материалов, как диборид титана и нитрид алюминия [3, 10]. Стабильность энергосилового воздействия за проход прокатки материалов с гомогенной структурой предопределяет узкое поле рассеяния размеров частиц продуктов размола. При обработке давлением материалов с гетерогенной структурой, состоящих из разных по прочности и условиям деформации и разрушения компонентов, происходит избирательный размол менее прочных составляющих при сохранении размеров более прочных и пластичных. Более прочные, например, металлические частицы в деформируемой массе шлака (дисперсной матрице) находятся в условиях и напряжённом состоянии, соответствующем (4) и (5), но не условию их пластичности (3).

Базируясь на изложенных механизме и условиях обработки давлением прокатываемых порошков, разработан и реализован технологи-

ческий комплекс для избирательного размола металлургических шлаков, обеспечивающий выделение из них металлических составляющих в воздушно-проходном сепараторе. Технологический комплекс состоит из валковой мельницы (диаметр бочки валков – 600 мм) и разрушающей уплотнённую из продуктов размола полосу проходной молотковой мельницы. Валковая мельница установлена в сварной эстакаде над молотковой так, что в нее непрерывно поступает прокатанная полоса, ударами билл разрушаемая в порошок [11]. Процесс прокатки и размола происходит в непрерывном режиме. Продукты размола разделяются в воздушно-проходном сепараторе на крупную, металлосодержащую, и мелкую, очищенную от металла и пригодную для производства вяжущих материалов (цемента), фракции. Выход годного металла (латунь, бронза, черные металлы) из отделенной металлосодержащей фракции при контрольно-балансовых плавках доходит до 60–70 %, что свидетельствует об эффективности и перспективности описанной технологической схемы утилизации крупнотоннажных металлургических отходов.

## ВЫВОД

На основе результатов анализа условий деформации, уплотнения и разрушения связно-сыпучей среды (порошка) предложено аналитическое решение напряженно-деформированного состояния, обеспечивающего деформацию и разрушение составляющих ее частиц. Сформулированы условия и основные параметры измельчения порошков в валковых мельницах: обязательный задний подпор, ограничение скорости, соотношение толщины с диаметром бочки валков.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Целиков, А. И. Теория продольной прокатки / А. И. Целиков, Г. С. Никитин, С. Е. Рокотян. – М.: Metallurgy, 1980. – 320 с.
2. Сиденко, П. Л. Измельчение в химической промышленности / П. Л. Сиденко. – М.: Химия, 1968. – 382 с.
3. Ложечников, Е. Б. Прокатка в порошковой металлургии / Е. Б. Ложечников. – М.: Metallurgy, 1987. – 185 с.
4. Шведков, Е. Л. Словарь-справочник по порошковой металлургии / Е. Л. Шведков, Э. Т. Денисенко, И. И. Кавенский. – Киев: Наукова думка, 1982. – 272 с.

5. Соколовский, В. В. Статика сыпучей среды / В. В. Соколовский. – М.: Физматгиз, 1966. – 243 с.

6. Харр, М. Е. Основы теоретической механики грунтов / М. Е. Харр. – М.: Стройиздат, 1971. – 320 с.

7. Жданович, Г. М. Теория прессования металлических порошков / Г. М. Жданович. – М.: Metallurgia, 1968. – 268 с.

8. Виноградов, Г. А. Теория листовой прокатки металлических порошков и гранул / Г. А. Виноградов, В. П. Каташинский. – М.: Metallurgia, 1979. – 224 с.

9. Ложечников, Е. Б. Переработка промышленных

отходов в валковых мельницах / Е. Б. Ложечников, А. В. Бусел // Ресурсосберегающие и экологически чистые технологии. – Гродно, 1995. – Т. 1. – С. 165–170.

10. Способ получения тугоплавких порошковых продуктов: пат. RU N<sup>0</sup> 2163180 / В. Д. Жигарев, А. Г. Мержанов, Е. Б. Ложечников [и др.], 2001.

11. Ложечников, Е. Б. Технологический комплекс для размолла шлаков и компактирования извлекаемых из них металлов / Е. Б. Ложечников, В. С. Ласанкин, А. К. Гавриленя // Metallurgia. – 2005. – № 29. – С. 67–72.

Поступила 23.06.2006

УДК 534:629

## ВЫБОР РАЦИОНАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ МЕХАНИЗМОВ УРАВНОВЕШИВАНИЯ ЖАТКИ ЗЕРНОУБОРОЧНОГО КОМБАЙНА КЗС-7, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИХ КОПИРОВАНИЕ ЕЮ РЕЛЬЕФА ПОЧВЫ БЕЗ ГАЛОПИРОВАНИЯ

*Доктора техн. наук, профессора ШУРИНОВ В. А., КРАСНЕВСКИЙ Л. Г., инж. КАМКО А. И.,  
канд. техн. наук, доц. ГОМАН А. М., канд. техн. наук ЛЕВАНЦЕВИЧ М. А.*

*Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси*

Актуальной проблемой современного зерноуборочного комбайностроения является снижение потерь урожая при проведении уборочных работ. Известно, что эти потери, помимо биологических, складываются из нескольких основных источников, при этом почти половину из них составляют потери за жатвенной частью комбайна, что во многом обусловлено несовершенством систем копирования рельефа почвы жаткой комбайна [1–3].

В современных зерноуборочных машинах копирование рельефа почвы жаткой в продольном и поперечном направлениях осуществляют с помощью специальных механизмов, основными элементами которых являются копирующие устройства (опорные башмаки или колеса), закрепленные на жатке, шарнирно-рычажные звенья и уравнивающие жатку системы. По принципу действия уравнивающие системы подразделяют на механические, гидравлические и электрогидравлические. Из них наиболее широкое применение получили механические системы, основанные на использова-

нии шарнирно-рычажных звеньев с блоком уравнивающих пружин. Их важными преимуществами являются высокие быстродействие и надежность, в том числе и при неблагоприятных погодных условиях, простота обслуживания, технического ухода и ремонта [4]. Общим недостатком, присущим всем известным механизмам копирования, является то, что в процессе уборки урожая на неровных полях имеют место случаи возникновения эффекта галопирования, т. е. явления отрыва опорных башмаков жатки от почвы и их периодического ударного взаимодействия с гребнями поля. В результате срез растительной массы происходит только на гребнях поля, в то время как во впадинах стеблестой, в том числе и полеглый, остается не скошенным. Это приводит к значительному увеличению потерь зерна. Установлено, что эффект галопирования возникает при определенных скоростях движения комбайна.

В известных к настоящему времени публикациях [1–4] синтез и выбор оптимальных параметров звеньев механизмов копирования жа-