

НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК БЕЛАРУСИ
МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ
МИНИСТЕРСТВО ПРОМЫШЛЕННОСТИ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК БЕЛАРУСИ
БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ И ТЕХНОЛОГИИ СОЗДАНИЯ И ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ

III МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

(Минск, 15–17 октября 2008 г.)

Сборник материалов

В 4 книгах

Книга 3

**Новые технологии обработки
металлов давлением**

Библиотека БарГУ



0011 5455

Минск
ФТИ НАН Беларуси
2008

УДК [621.7.+621.9](082)

ББК 30.61я43

С 56

Редакционная коллегия:
С.А. Астапчик (гл. ред.),
А.И. Гордиенко (зам. гл. ред.),
А.П. Ласковнев (зам. гл. ред.),
К.В. Гришанович, Н.В. Райченко

Рецензенты:
акад., д-р. техн. наук П.А. Витязь
д-р техн. наук, проф. Н.В. Спиридонов

С 56

Современные методы и технологии создания и обработки материалов : III Меж-
дунар. науч.-техн. конф. (Минск, 15–17 октября 2008г.) : сб. материалов. В 4 кн.
Кн.3. Новые технологии обработки металлов давлением / ред. коллегия : С.А. Астап-
чик (гл. ред.) [и др.]. – Минск : ФТИ НАН Беларуси, 2008. – 191 с. : ил.
ISBN 978-985-6441-04-5

Показана роль академиков С.И. Губкина и А.В. Степаненко в становлении и развитии в
Республике и СССР методов, технологий и оборудования ОМД, вклад белорусской школы в науку о
формовании полуфабрикатов и изделий методами прессования,ковки, волочения, штамповки, вырубки
и т.п., в т.ч. с использованием импульсных нагрузок, ультразвука, магнитных и электрических полей и др.

Особый интерес представляют материалы по освоению новых технологий изготовления малоли-
стовых рессор, изготовления упругих элементов периодического профиля, формирования холодным пла-
стическим деформированием режущих сегментов сельхозтехники.

Приводятся свойства нанокomпозиционных материалов, полученных методом равноконально –
углового прессования, обсуждаются термоупругие фазовые переходы, инициированные акустическим
воздействием.

УДК [621.7.+621.9](082)
ББК 30.61я43

ISBN 978-985-6441-04-5 (кн. 3)

ISBN 978-985-6441-06-9

© Физико-технический институт
Национальной Академии Наук Беларуси, 2008

В.А. Клушин, В.И. Марусич, Е.В. Хрушев, А.Н. Ананчук. Штамп гибки ключей торцовых изогнутых.....	101
Л.А. Исаевич, В.А. Король, Д.М. Иваницкий, Г.В. Костенко, В.П. Белоус, В.И. Пушкиевич. Способ формообразования холодным пластическим деформированием режущих зубьев сегментов сельскохозяйственной техники.....	107
Л.А. Исаевич, Д.М. Иваницкий, М.И. Сидоренко, М.М. Малекян. Устранения уширения полосы переменной толщины роликовым волочением в процессе прокатки.....	112
Л.А. Исаевич, А.В. Шиманский, В.А. Гуринович, М.И. Сидоренко. Определение технологических параметров процесса формообразования фланца в трубных заготовках.....	117
А.В. Алифанов, А.М. Милокова. Изготовление биметаллической полосы методом совместного прессования.....	123
А.В. Алифанов, В.Г. Кантин, А.М. Милокова. Расчет усилий горячего выдавливания биметаллических метчиков.....	125
Л.С. Богинский, О.П. Реут, Б.Б. Хина, В.В. Саранцев. Получение износостойких деталей из тугоплавких материалов методом сухого изостатического прессования.....	129
В.М. Капцевич, Л.С. Богинский, И.В. Закревский, Д.И. Кривальцевич, Е.А. Маршина, Е.В. Алхименок. Исследование закономерности уплотнения пористых волокнистых материалов при радиальном методе прессования.....	134
В.В. Рубаник, В.В. Клубович, В.В. Рубаник м.л., О.Е. Рубаник, А.В. Шадурский. Термоупругие фазовые переходы, инициированные акустическим воздействием.....	139
В.В. Рубаник, А.Д. Шилин, В.В. Рубаник м.л. Ультразвуковая технология изготовления сегнето- и пьезокерамики.....	144
П.С. Зачепило, В.Н. Сакевич. Повышение эффективности ультразвукового эмульгирования подавлением ортокинетической коагуляции.....	150
А.Н. Давидович, В.С. Голубев, Г.Ф. Бетеня, Л.М. Давидович. Разработка и исследование технологии изготовления и упрочнения стрелчатых лап.....	153
Е.Б. Ложечников, А.К. Гавриленя, М.В. Кудин. Давление и энергия измельчения связно-сыпучих материалов.....	156
П.С. Овчинников, М.В. Кудин. Проектирование кривошипных валов кузнечно-прессовых машин.....	160
В.Т. Шмурадко, О.В. Роман, А.Ф. Ильющенко, В.И. Овчинников, А.В. Дроздов, А.Г. Тарасов. Физико-химические особенности технологии гетерофазных материалов. Импульсное формование.....	163
А.Р. Лученок, Г.В. Смирнов, А.А. Лученок, Н.В. Киришина. Исследование процесса получения поликомпонентных порошков материалов методом импульсного прессования и вакуумного спекания.....	172
В.М. Горохов, И.Н. Тарусов. Формирование свойств порошковых алюминиевых сплавов конструкционного и антифрикционного назначения в процессах активированного спекания, пластического деформирования и термообработки.....	176
В.С. Карпицкий, Ю.В. Карпицкий. Теоретические и экспериментальные исследования процесса прокатки с критическим рассогласованием окружных скоростей валков.....	181

ДАВЛЕНИЕ И ЭНЕРГИЯ ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ СВЯЗНО-СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ

Pressure and energy of crushing of loose materials. Physical and mechanical properties of firm compact and powder loose materials has predetermined essential differences of conditions and the mechanism of their processing by pressure of rolling.

Различие физических и механических свойств твердых компактных и порошковых связно-сыпучих материалов предопределило существенные отличия условий и механизма их обработки давлением. 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. 1):

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

где σ_n и τ_n – нормальное и касательное напряжения к поверхностям сдвига; φ и c – соответственно угол межчастичного трения и сцепление частиц; σ_c – напряжение разрыва контактов между частицами [1]:

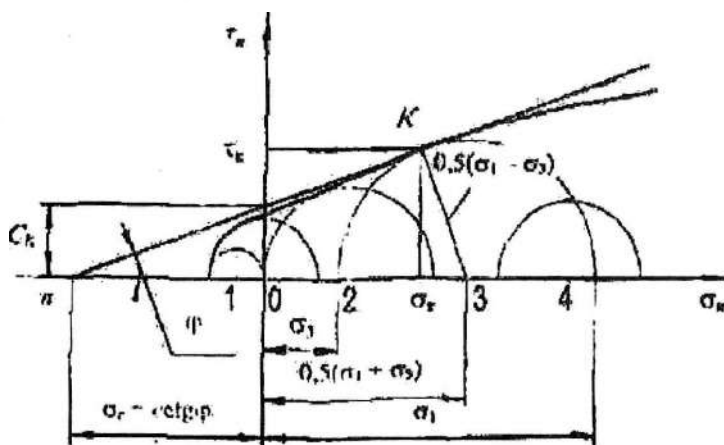


Рис. 1. Диаграмма кругов предельного состояния Мора: 0 – чистый сдвиг, $\tau_n = c$; 1 – одноосное растяжение, $\sigma_n = -\sigma_1$; 2 – одноосное сжатие, $\sigma_n = \sigma_1$; 3 – двухосное сжатие; 4 – двухосное сжатие без сдвига

Восприятие связно-сыпучим 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 [2]:

$$\rho_\sigma = \rho_H + k p^m, \quad (2)$$

где ρ_H – 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 ρ_σ порошка параметры c и φ изменяются (рис. 1): угол межчастичного трения уменьшается, а сцепление увеличивается. Это предопределяет отличие условий деформации связно-сыпучей среды от поликристаллического твердого тела, условие пластичности которого в главных напряжениях описывается формулой Сен-Венана-Трески [3]:

$$\sigma_1^{\frac{1}{2}} - \sigma_3^{\frac{1}{2}} = \beta \sigma_s, \quad (3)$$

где $\sigma_1^{\frac{1}{2}}$ и $\sigma_3^{\frac{1}{2}}$ – большее и меньшее главные напряжения; σ_s – предел текучести материала; $\beta = 1-1,15$ – коэффициент, учитывающий условия деформации.

Вытекающее из критерия прочности (1) соотношение компонент напряжений деформируемой связно-сыпучей среды описывается выражениями [1]:

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

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

Из образованного между осью абсцисс σ_x и касательной к огибающей кругов Мора прямоугольного треугольника $n3K$ с меньшим, противолежащим углу φ катетом $0,5(\sigma_1 + \sigma_3)$ вытекает условие пластичности (предельное состояние) связно-сыпучей 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 связно-сыпучих определяется не только свойствами обрабатываемого материала σ_c , φ и c , но и величиной возникающего в нем меньшего главного напряжения. Поскольку с увеличением давления и плотности обрабатываемого связно-сыпучего материала до компактного состояния угол его межчастичного трения уменьшается до нуля $\varphi \rightarrow 0$, а $2c \rightarrow \sigma_c$, 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 ($2c \leq \sigma_c$), условие (5) свидетельствует о возможности деформации ранее уплотненного порошка внешним натруженным, меньшим предшествующей обработки при условии снижения меньшего главного напряжения σ_3 , а следовательно, и среднего σ . 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 σ_c , например при одноосном действии сосредоточенной нагрузки, ранее уплотненное из порошка тело разуплотняется с возможностью его разрушения в порошок, размер частиц которого меньше исходного, что является следствием его предшествующей обработки давлением.

Вследствие того, что частицы порошка представляют твердые тела, пластическая деформация и разрушение которых наступает при разности главных напряжений, описываемом условием (3), такая же разность главных напряжений должна быть в массе этих частиц, представленных обрабатываемый давлением порошок, условия деформации которых зависит от величины среднего напряжения, что вытекает из условия (5).

Поскольку структурная деформация порошка и пластическая деформация материала составляющих его частиц возможны при равенстве левых, а следовательно, и правых частей (3) и (5), их совместным решением определяется среднее напряжение [4]:

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

где v_s – относительная плотность порошка, учитывающая реальную площадь сечения пористого тела под давлением, соответствующим большему главному напряжению $\sigma_1 = \sigma(1 + \sin \varphi) - \sigma_c$, что вытекает из (2) и (4).

В результате силового взаимодействия с размольными телами и между собой частицы измельчаемого материала испытывают упругую, а затем пластическую деформацию до разрушения на более мелкие частицы. Многократность этого взаимодействия обуславливает наклеп, образование и развитие в материале частиц микро- и макродефектов, что приводит к их разрушению при контактных и внутренних напряжениях, меньших предела прочности. Удельная энергоёмкость процесса измельчения определяется при этом материалом частиц, состоянием их поверхности, рациональностью способа и конструкции размольного устройства, степенью измельчения (отношения размеров частиц до и после измельчения) и многими другими факторами. С уменьшением размеров частиц удельная энергоёмкость их измельчения возрастает, и по достижении размеров d_0 , минимальных для конкретных материалов, способов и условий процесса, измельчение прекращается. Вследствие насыщения избыточной энергией в высокодисперсных порошках с размерами частиц, близкими к d_0 , возможен обратный процесс – гранулирование частиц, а в случае смесей разных по составу порошков – химическое взаимодействие с образованием твердых растворов и соединений.

Для уменьшения энергозатрат и повышения дисперсности продуктов измельчения эффективно использование последовательно изменяющихся способов и средств размола, например, сначала ударного, а затем истирающе-раздавливающего действий. Анализ результатов теоретических и экспериментальных исследований дает основание моделировать зависимость удельной энергоёмкости измельчения n_3 от размеров частиц порошка d_k гиперболической функцией [5]:

$$n_3(d_k - d_0)^a = E_3 \approx 0,5 C_3^2, \quad (7)$$

где E_3 – параметр, зависящий от свойств и состояния материала, способа, режима и условий процесса измельчения; a – параметр, учитывающий возможную несимметричность графического изображения приведенных на рис. 2 функции (7) для разных способов измельчения одного и того же материала $C_{31} > C_{32} > C_{33} = 0$, $d_{01} > d_{02} > d_{03} = 0$ и $a = 1$.

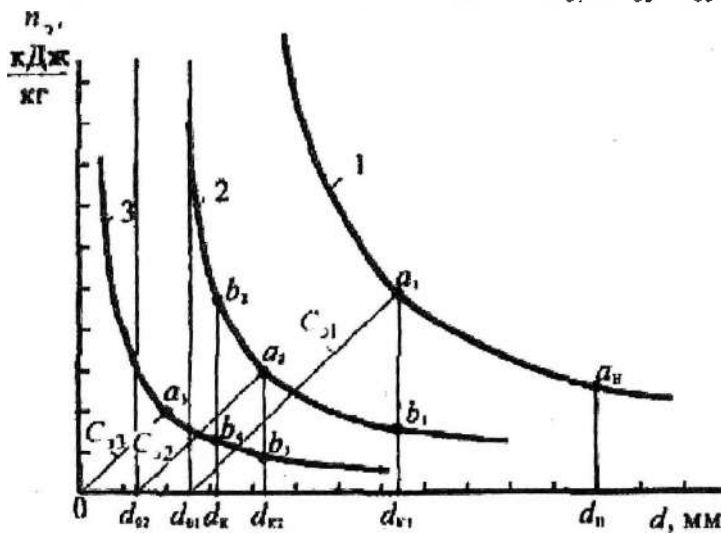


Рис. 2. Зависимость удельной энергии измельчения порошка от размеров его частиц d

Для нахождения параметров E_3 и C_3 и построения графиков зависимости удельной энергоёмкости измельчения от размеров частиц необходимо выполнить пилотные эксперименты измельчения определенной массы Q материала с фиксированием через определенное время среднего размера частиц (гранулометрический состав) до d_1 и после d_2 измельчения и расход энергии за время t измельчения ($A_3 = Nt$ кДж; кВт·час). Тогда удельная энергоёмкость этапа измельчения, при котором средний размер частиц

уменьшается с d_1 до d_2 $\Delta n = A_3/Q$. По установленным экспериментами удельной энергоемкости этапа измельчения $\Delta n = n_{32} - n_{31}$ и предельно достижимого в исследуемом измельчителе минимального размера частиц d_0 материала, принимаемого за координату смещенной полуоси (асимптоты), устанавливается координата точки графика удельной энергоемкости измельчения, соответствующая на оси абсцисс $d_c = 0,5(d_1 + d_2)$.

Для получения расчетной формулы координаты n_{3c} дифференцируем выражение (7) по двум переменным n_{31} и d_1 , приняв $a=1$

$$n_{3c} \Delta d + d_c n_3 - \Delta d n_3 = 0, \quad (8)$$

и находим

$$n_{3c} = \Delta n_3 (d_0 - d) / a \cdot \Delta d, \quad (9)$$

Расчетами по (7) определяется значение постоянных для конкретных устройств и материалов E_3 и C_3 , и с использованием рассчитанных координат строится график удельной энергоемкости измельчения.

Использование графиков удельной энергоемкости измельчения позволяет принимать обоснованные решения о последовательности способов, обеспечивающей энергоэкономичное измельчение частиц порошка до требуемых размеров. Так, например, для измельчения порошка с начального размера частиц d_n до размера d_k из рис. 2 следует, что по способу, соответствующему кривой 1, невозможно измельчение материала до размера частиц d_k . Для достижения требуемого размера частиц d_k (степени размола d_n/d_k) необходимо использовать измельчитель с другим механизмом и режимом силового воздействия на материал, например, описываемый кривой 2. При этом с точки зрения возможностей и удельных энергозатрат целесообразно по способу 1 проводить измельчение до размеров частиц $\approx d_{k1}$, а затем по способу, описываемому кривой 2, обеспечивающему возможность получения порошка требуемой дисперсности d_k с общими удельными затратами энергии, равными сумме проекций дуг $a_n a_1$ и $b_1 b_2$ на ось ординат. Из рис. 2 очевидно, что удельные энергозатраты можно уменьшить при использовании трех измельчителей. При этом во втором измельчителе целесообразно проводить измельчение до размеров частиц d_{k2} . Тогда общие удельные энергозатраты будут равны сумме проекций на ось ординат дуг $a_n a_1$, $b_1 a_2$ и $b_2 b_4$, меньшей предыдущего варианта, а следовательно с меньшими затратами энергии.

Список использованных источников

1. Соколовский В.В. Статика сыпучей среды / В.В. Соколовский. – М.: Физматгиз, 1966 – 243с.
2. Ложечников Е.Б. Прокатка в порошковой металлургии / Е.Б. Ложечников. – М: Металлургия, 1987. – 185с.
3. Губкин СИ. Теория обработки металлов давлением / СИ. Губкина. – М.: Металлургиядат, 1947. – 532с.
4. Ложечников Е.Б. Механика измельчения прокатываемых в толстом слое материалов / Е.Б. Ложечников, А.К. Гавриленя // Вестник БНТУ – 2006, № 6 – С. 16–21.
5. Ложечников Е.Б. Выбор способов энергосберегающего измельчения порошков / Е.Б. Ложечников, А.К. Гавриленя // Горная механика. – 2008, № 2 – С. 24–27.