

УДК 621.926.32+531

к.т.н. Власенко Д. А.  
(ДонГТУ, г. Алчевск, ЛНР)

## ОБОСНОВАНИЕ КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ОДНОВАЛКОВОЙ ДРОБИЛКИ ЖЕЛЕЗОРУДНОГО АГЛОМЕРАТА С ШЕВРОННЫМ РАСПОЛОЖЕНИЕМ ЗУБЬЕВ ЗВЁЗДОЧЕК РОТОРА

*В работе предложен способ аналитического обоснования основных конструктивных параметров роторной одновалковой зубчатой дробилки доменного железорудного агломерата. С помощью основных законов общей механики и механики твердых тел обоснованы математические закономерности для определения величины свободного проникновения пирога агломерата в рабочую зону ротора одновалковой дробилки, усилий, действующих в зоне контактного взаимодействия зубьев звёздочки с поверхностью агломерационного спёка, напряжения в «опасном» сечении аглопирога, возникающего в процессе его дробления, в зависимости от угла их взаимного контакта и угла наклона рабочей поверхности приемного стола. Обосновано использование роторов с шевронным расположением зубьев звёздочек на роторе в процессе дробления агломерата. На основании сравнительного анализа полученных результатов с помощью полученных зависимостей предложены рациональные конструктивные параметры одновалковой дробилки в процессе дробления железорудного агломерата в условиях агломерационного цеха Филиала № 12 ЗАО «Внешторгсервис», позволяющие повысить эффективность процесса дробления и снизить содержание некондиционных фракций агломерата в доменной шихте.*

**Ключевые слова:** агломерат, дробление, одновалковая дробилка, шевронное расположение зубьев звёздочек, угол контакта, угол наклона приемного стола, сила контактного взаимодействия, напряжения.

**Проблема и ее связь с научными и практическими задачами.** Агломерация является заключительной операцией в комплексе мероприятий по подготовке железных руд к доменной плавке. Главная цель агломерационного производства состоит в том, чтобы превратить мелкий рудный концентрат в более крупные куски — агломерат, использование которого в доменной плавке обеспечивает формирование слоя шихты хорошей газопроницаемости, что является обязательным условием эффективной и высокопроизводительной работы доменной печи [1].

На последнем этапе процесса спекания аглопирог необходимо раздробить на отдельные куски. Для этих целей на большинстве ведущих металлургических предприятий применяют роторные одновалковые зубчатые дробилки [1–3]. Наиболее серьезным их недостатком является переизмельчение агломерата, в результате чего наряду с крупными кусками требуемых

размеров образуется большое количество мелких зерен — 0...5 мм, что снижает выход годного агломерата и негативно влияет на производительность агломашин и технологические показатели доменных печей. Образование мелочи возникает вследствие раздавливания значительной части агломерата лопастями о приемный стол и колосники, а не разламывания пирога относительно его консольной части [3]. При этом наблюдается значительный износ торцевой поверхности зубьев ротора.

Однако от наличия в доменной шихте особо крупных кусков также необходимо избавляться по причине их невысокой прочности при транспортировке и перегрузках, а также из-за того, что они могут создать проблемы при загрузке в доменную печь, особенно в тех печах, где используются бесконусные загрузочные устройства.

Желательно при дроблении агломерата разрушать его не с помощью наложения сжимающих нагрузок, а с использованием

изгиба и растяжения, так как для хрупких материалов предел прочности (критическое напряжение) на сжатие  $\sigma_{сж}$  на один, а то и на несколько порядков выше, чем пределы прочности на изгиб  $\sigma_u$  и растяжение  $\sigma_p$ , что обеспечит снижение нагрузок на рабочие органы дробилки и привод.

**Постановка задачи.** Задачами данной научно-исследовательской работы являются аналитическое исследование и обоснование закономерностей основных параметров при математическом моделировании контактного взаимодействия зуба звёздочки ротора одновалковой дробилки с агломерационным спёком на основании основных положений общей механики и механики деформируемых твердых тел: величины свободного проникновения пирога агломерата в рабочую зону одновалковой дробилки; усилия, действующего в зоне контактного взаимодействия лопасти звёздочки с агломерационным спёком; напряжения в «опасном» сечении излома аглопирога, возникающего при его дроблении, в зависимости от угла контакта поверхности лопасти с поверхностью агломерационного спёка и угла наклона рабочей поверхности приемного стола, а также определение рациональных конструктивных параметров дробильной машины для повышения ее эффективности.

**Изложение материала и его результаты.** Для математического моделирования условий контактного взаимодействия лопасти звёздочки ротора дробилки с агломерационным пирогом в процессе его дробления необходимо определить следующие параметры данного процесса:

- величину свободного проникновения агломерационного пирога в рабочую зону ротора дробилки;
- усилие, действующее в зоне контактного взаимодействия лопасти звёздочки ротора с поверхностью аглоспёка;
- напряжение в сечении пирога, возникающее при его дроблении, в зависимости от угла контакта.

Для определения данных параметров приняты следующие допущения:

- материал ударной рабочей поверхности зуба звёздочки по отношению к материалу дробимого аглопирога — абсолютно твердый, неупругий;
- силами трения при взаимодействии рабочей поверхности лопасти ротора и поверхностью дробимого материала пренебрегаем (вследствие того, что углы контакта меньше угла трения скольжения агломерата по стали);
- условно принимаем, что при взаимном контакте отсутствует относительное движение поверхности звёздочки ротора по поверхности дробимого материала.

При этом для определения предельно возможных параметров контактного взаимодействия принимается изотропность разрушаемого материала.

Для определения основных параметров процесса контактного взаимодействия лопасти звёздочки ротора зубчатой роторной дробилки с агломерационным спёком использовалась математическая модель, основанная на основных законах общей механики и механики деформируемого твердого тела [4, 5].

Схематичное отображение процесса дробления агломерационного пирога в роторной одновалковой дробилке на стадии первичного наложения разрушающих усилий представлена на рисунке 1.

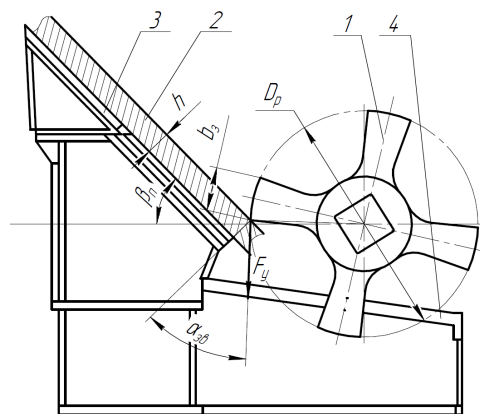


Рисунок 1 Схема первой стадии процесса дробления агломерата в одновалковой зубчатой дробилке

Весь процесс можно разделить на несколько этапов (рис. 1):

– движение аглопирога 2 по поверхности приемного стола 3;

– контактное взаимодействие агломерационного спека с зубьями 1 при проникновении в рабочее пространство ротора, в процессе которого происходит первая стадия его дробления;

– контакт при дроблении кусков агломерата между зубьями звёздочек и поверхностью колосников 4 — вторая стадия дробления.

Для определения величины проникновения аглопирога в рабочую зону лопастей ротора дробилки воспользуемся вторым законом Ньютона (дифференциальным законом механического движения) [4]. Согласно этому закону, линейное движение аглоспека относительно поверхности приемного стола будет описываться следующим уравнением

$$\ddot{a} - g(\sin \beta_n - \mu_a \cos \beta_n) = 0, \quad (1)$$

где  $\ddot{a}$  — ускорение поступательного движения агломерационного пирога относительно поверхности приемного стола,  $\text{м/с}^2$ ;  $g$  — ускорение свободного падения,  $\text{м/с}^2$ ;  $\beta_n$  — угол наклона поверхности приемного стола относительно горизонтали, град;  $\mu_a$  — коэффициент трения скольжения агломерата по стали.

Стандартная процедура решения данного типа дифференциальных уравнений методом интегрирования по частям [6] (для заданных начальных условий при значении  $t=0$ : расстояние, пройденное аглопирогом —  $a=0$ , скорость движения спека —  $\dot{a}=0$ ) дает следующий результат

$$a = \frac{g(\sin \beta_n - \mu_a \cos \beta_n)t^2}{2}, \quad (2)$$

где  $a$  — расстояние, которое пройдет аглоспек за время  $t$  ( $t'$ ) в рабочем пространстве дробилки, м.

Для определения времени  $t$  необходимо рассмотреть процесс выгрузки аглопирога со спекательных тележек агломерационной

машины в рабочее пространство дробилки. В процессе движения паллет аглоспек сбрасывается с них и скользит по приемному столу, при этом за счет шевронного [7] расположения лопастей звёздочек ротора относительно оси вращения (рис. 2) аглоспек упирается в торцевую часть двух или трех зубьев ротора и останавливает свое дальнейшее перемещение в дробилку.

После этого начинается его поэтапное (от одного ряда зубьев звёздочек к другому) проникновение в рабочую зону ротора, определяемое закономерностью (2). В процессе движения край агломерата подвергается разрушению очередной парой лопастей.

Таким образом, в дробилке в случае использования ротора с шевронным расположением зубьев звёздочек на роторе достигается многократное наложение разрушающих нагрузок на аглопирог.

При такой конструкции время свободного движения аглоспека в рабочее пространство дробилки между зубьями соседних звёздочек при их шевронном расположении можно определить по следующим зависимостям:

– для роторов с нечетным количеством звёздочек [7] при их шевронном расположении

$$t = \frac{15 \left( (1 - N_{зв}) b_з + 4\pi^2 D_p \right)}{\pi^2 D_p n_p n_з (N_{зв} - 1)}, \quad (3)$$

где  $N_{зв}$  — количество звёздочек, установленных на валу ротора дробилки;  $b_з$  — длина торцевой поверхности зуба звёздочки, м;  $D_p$  — рабочий диаметр внешней грани звёздочек ротора, м;  $n_p$  — число оборотов вращения ротора в минуту,  $\text{мин}^{-1}$ ;  $n_з$  — количество зубьев на одной звёздочке, установленной на роторе;

– для роторов с четным количеством звёздочек [7]

$$t' = \frac{15 \left( (2 - N_{зв}) b_з + 4\pi^2 D_p \right)}{\pi^2 D_p n_p n_з (N_{зв} - 2)}. \quad (4)$$

На следующем этапе математического моделирования первой стадии дробления агломерата требуется определить усилие, возникающее при контактном взаимодействии лопастей звёздочек ротора дробилки с поверхностью аглопирога при определенных условиях.

Для этого необходимо воспользоваться принципом, предложенным Даламбером [8], условием которого является равновесное состояние нулевого значения главных векторов и моментов действующих внешних сил при их равновесии.

Для определения условий контакта лопастей звёздочки ротора одновалковой

дробилки с агломерационным спёком на рисунке 3 представлена схема действующих на него сил в процессе дробления.

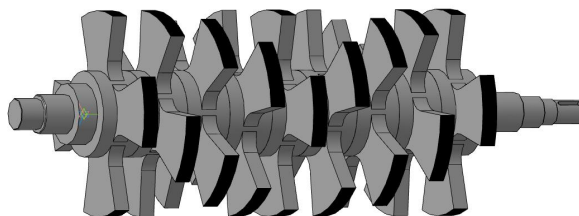


Рисунок 2 Ротор одновалковой зубчатой дробилки с шевронным расположением зубьев звёздочек на валу

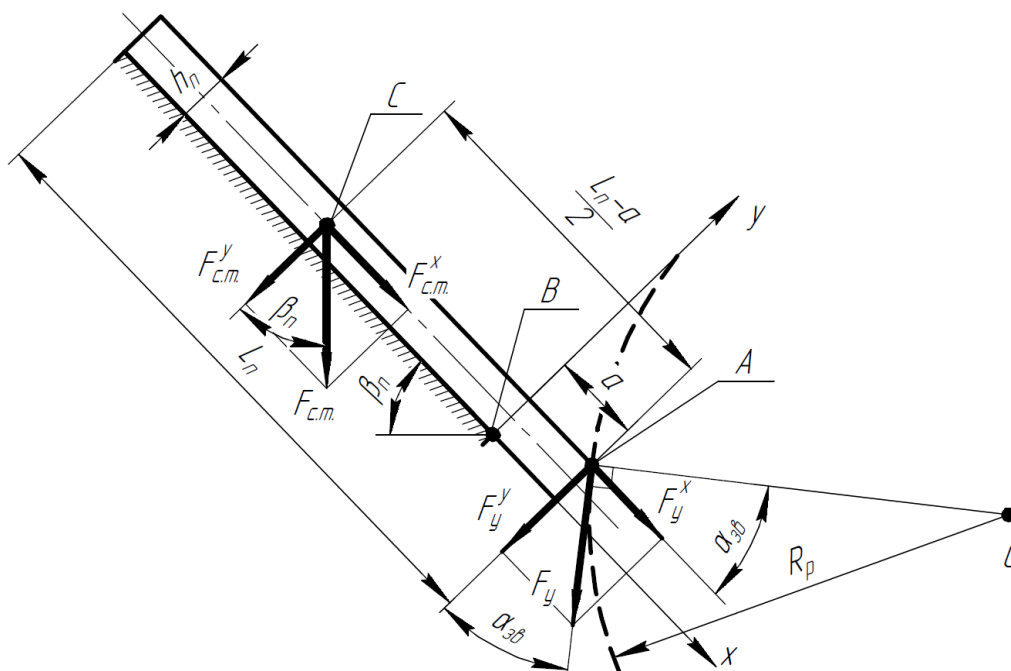


Рисунок 3 Расчетная схема для определения основных параметров контактного взаимодействия рабочей поверхности зубьев одновалковой дробилки с дробимым пирогом агломерата

В данном случае на агломерационный пирог действуют сила тяжести  $F_{c.m.}$  в точке  $C$  и сила  $F_y$ , возникающая при взаимодействии зубьев звёздочек с поверхностью аглопирога в точке их контактного взаимодействия  $A$ .

Расстояние проникновения в рабочее пространство дробилки аглопирога при предварительных расчетах оказалось (при

различных условиях взаимного контакта) на порядок меньше, чем значение длины самого пирога агломерата на поверхности приемного стола, и составило 0,04...0,08 м. При таких условиях силой тяжести выступающей части аглопирога над консольной частью приемного стола можно пренебречь.

Рассмотрим равновесие моментов действующих внешних сил относительно точки  $B$  (точка основания «опасного» сечения

при предполагаемом разрушении разламыванием агломерационного пирога)

$$F_{cm} \cos \beta_n \left( \frac{L_n - a}{2} \right) - F_{cm} \sin \beta_n \frac{h_n}{2} - F_y a \cos \alpha_{3\theta} - F_y h \sin \alpha_{3\theta} = 0, \quad (5)$$

где  $L_n$  — текущая длина агломерационного пирога (в процессе дробления длина аглоспёка уменьшается вследствие его продвижения в рабочее пространство ротора), м;  $a$  — расстояние от точки взаимного контакта зубьев ротора с поверхностью пирога до сечения его излома (нижней грани приемного стола), м;  $h_n$  — высота спёка, м;  $\alpha_{3\theta}$  — угол между поверхностью лопасти и поверхностью аглопирога при их взаимном контакте (рис. 1, 3), град.

При этом необходимо учитывать, что сила тяжести аглоспёка определяется следующим образом

$$F_{cm} = B_n (L_n - a) \rho_a g h_n, \quad (6)$$

где  $B_n$  — ширина пирога, м;  $\rho_a$  — объемная плотность агломерата, кг/м<sup>3</sup>.

Решение уравнения (5) относительно силы  $F_y$  с учетом зависимости (6) выглядит следующим образом

$$F_y = B_n (L_n - a) \rho_a g h_n \times \frac{[(a - L_n) \cos \beta_n - h_n \sin \beta_n]}{2(a \cos \alpha_{3\theta} + h_n \sin \alpha_{3\theta})}. \quad (7)$$

Из анализа составляющих зависимости (7), основанного на практическом опыте, следует, что имеются конструктивно-технологические параметры, менять которые в существующих условиях реального агломерационного производства нецелесообразно: они обусловлены требованиями технологического процесса, и осуществить их без существенных конструктивных изменений агломашины невозможно.

К таким параметрам относятся:

– ширина агломерационного пирога (ширина колосниковой решетки агломерационной тележки);

– высота спёка (обусловлена требованиями технологического процесса).

Таким образом, основными факторами, влияющими на усилия, возникающие при контакте зуба с агломератом, которыми можно оперировать, являются:

– угол контактного взаимодействия поверхности лопасти звёздочки ротора с поверхностью аглоспёка;

– угол наклона поверхности приемного стола относительно горизонтали.

Для проведения дальнейших математических расчетов при определении основных параметров контактного взаимодействия поверхности лопастей ротора дробилки с аглопирогом использовались следующие технико-эксплуатационные характеристики агломашины и самой дробилки: ширина аглоспёка — 2,8 м, высота аглопирога (среднее значение высоты слоя шихты на агломашине Филиала № 12 ЗАО «Внешторгсервис») — 0,35 м, длина агломерационного спёка при входе в рабочее пространство ротора дробилки — 1 м, объемная плотность агломерата — 3500 кг/м<sup>3</sup> [9].

На рисунке 4 отображены графические зависимости усилий, действующих на аглопирог в процессе взаимодействия с поверхностью зубьев ротора, при определённых углах контакта  $\alpha_{3\theta}$ .

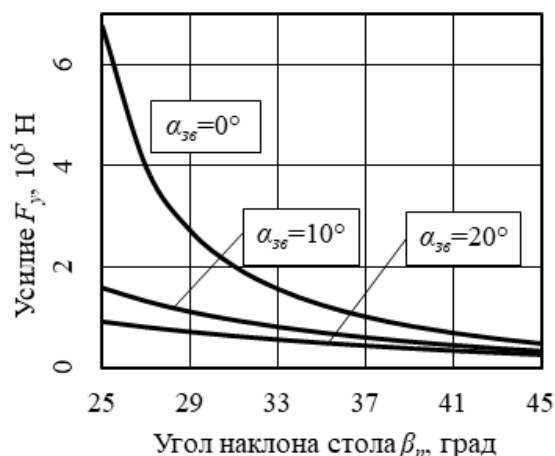


Рисунок 4 Графики зависимостей усилий, действующих на аглопирог, от угла наклона приемного стола

На рисунке 5 отображены графические зависимости усилий, действующих на аглопирог при взаимодействии с зубьями ротора, при различных углах наклона приемного стола  $\beta_n$ .

Из анализа графических зависимостей очевидно, что при увеличении угла наклона поверхности приемного стола существенно уменьшается усилие, действующее на аглопирог при его дроблении, а при уменьшении угла контакта рабочей поверхности с аглопирогом оно резко возрастает, причем характер изменения коэффициента их пропорциональности и в первом, и во втором случае соответствует приращению степенной функции.

На основании полученных результатов напрашивается естественный вывод относительно данного аналитического исследования: для реализации наибольших разрушающих усилий в процессе дробления аглопирог необходимо стремиться к значениям угла контакта с зубьями звездочек, близким к нулю, а значение угла наклона приемного стола максимально приблизить к величине угла трения скольжения агломерата по стали.

На следующем этапе математического моделирования следует определить напряжения, возникающие в «опасном» сечении агломерационного спёка перпендикулярно поверхности приемного стола, а также при какой остаточной длине пирога  $L_n$  будет обеспечиваться его дробление за счет разламывания. Для этого воспользуемся основными положениями механики деформируемого твердого тела [5].

Изначально разложим действующую на аглопирог силу  $F_y$  на две составляющие: проекцию на ось  $x$ , направленную вдоль вектора движения аглоспёка, —  $F_y^x$  и ее проекцию на ось  $y$  —  $F_y^y$  (рис. 3).

При таком виде нагружения агломерационный пирог испытывает прямой поперечный изгиб от силы  $F_y^y$  и внецентренное растяжение от силы  $F_y^x$ .

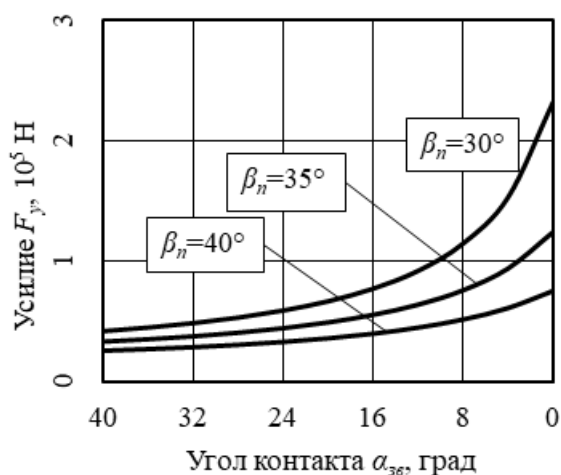


Рисунок 5 Графики зависимостей усилий, действующих на аглопирог, от угла контакта с поверхностью зубьев ротора

Согласно общепринятым постулатам основных положений механики деформируемых твердых тел [5], нормальное напряжение, возникающее в «опасном» сечении предполагаемого излома агломерационного пирога, перпендикулярном поверхности приемного стола, в районе точки  $B$  (рис. 3), определяется по следующим зависимостям [10]:

– напряжение при изгибе от силы  $F_y^y$

$$\sigma_u = \frac{F_y^y a}{W_z}, \quad (8)$$

где  $W_z$  — осевой момент сопротивления поперечного сечения агломерационного спёка [10],  $\text{м}^3$ ;

– напряжение при внецентренном растяжении агломерационного спёка сечения в точке  $B$  от силы  $F_y^x$

$$\sigma_{вр} = F_y^x \left( \frac{1}{B_n h_n} + \frac{h_n^2}{4J_z} \right), \quad (9)$$

где  $J_z$  — полярный момент сопротивления поперечного сечения агломерационного пирога [10],  $\text{м}^4$ .

Тогда суммарное напряжение, возникающее в процессе дробления в «опасном»

сечении аглопирога с основанием в точке  $B$  (рис. 3), с учетом закономерностей (2, 7–9) будет определяться как

$$\sigma_n = \frac{(L_n - a) \rho_a g}{h_n (\tan \alpha_{36} h_n + a)} \times \\ \times [\cos \beta_n (L_n - a - h_n \sin \beta_n)] \times \\ \times [3a + 2h_n \tan \alpha_{36}]. \quad (10)$$

При этом необходимо рассмотреть влияние величины угла контакта лопастей звёздочек ротора с поверхностью агломерационного спёка на величину напряжений, возникающих в «опасном» сечении, при угле наклона поверхности приемного стола, близкого к максимальному значению угла трения скольжения агломерата по стали ( $\mu_a = 0,5$  [11]) —  $\beta_n = 30^\circ$  (рис. 6). При таком расположении приемного стола обеспечивается стабильный сход по его поверхности агломерата в рабочее пространство дробилки, что, как оговаривалось выше, позволяет добиться для данных условий процесса дробления наибольших значений усилия  $F_y$ .

При этом в очередной раз подтверждается, что при минимальных углах контакта зубьев со спёком обеспечиваются наилучшие условия для процесса дробления разламыванием.

Проанализируем значения напряжений в «опасном» сечении агломерационного пирога при уменьшении длины спёка в процессе его дробления (рис. 7).

Из анализа графической зависимости следует, что при достижении аглоспёком определенной длины процесс дробления разламыванием прекращается и аглопирог опрокидывается относительно точки  $B$  (рис. 3). Это объясняется тем, что уменьшается его сила тяжести, а соответственно, и сила  $F_y$ . Вследствие этого напряжение, возникающее в «опасном» сечении, при определенной остаточной длине окажется меньше, чем предел прочности.

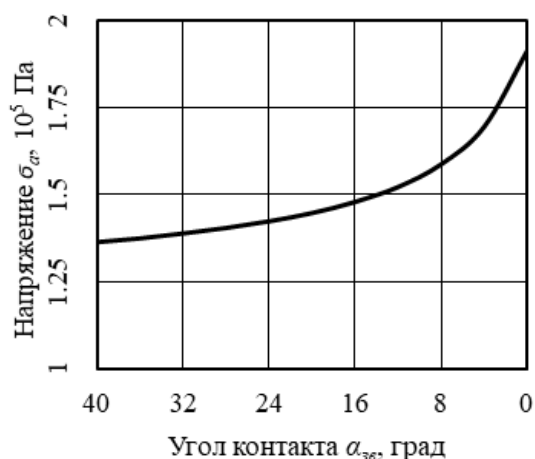


Рисунок 6 График зависимости напряжений, возникающих в «опасном» сечении, от угла контакта с поверхностью зубьев ротора

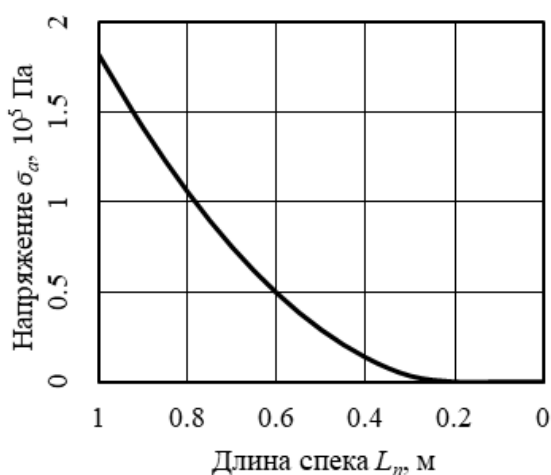


Рисунок 7 График зависимости напряжений, возникающих в «опасном» сечении, от остаточной длины спёка

Следующим этапом является определение степени влияния прочности агломерата на эффективность применения данного способа наложения нагрузок на аглоспёк.

Согласно исследованиям, изложенным в работе [11], предел прочности агломерата на сжатие в горячем состоянии находится в пределах  $\sigma_a^c = 0,6 \dots 2,5$  МПа. Однако при этом необходимо учитывать то, что пределы прочности на изгиб  $\sigma_a^u$  и растяжение  $\sigma_a^p$ , зависящие от значений мо-

для Юнга  $E_a$  и коэффициента Пуассона  $\mu_a$ , для хрупких материалов значительно (в 10–20 раз) меньше [12–14]. Вследствие этого для предварительных расчетов с целью определения остаточной длины агломерационного спека, обеспечивающей разрушение аглопирога разламыванием, принимаем максимальное значение предела прочности агломерата на изгиб и растяжение  $\sigma_a = 0,1$  МПа.

Для определения остаточной длины агломерационного спека, при которой обеспечивается дробление разламыванием, воспользуемся зависимостью, полученной аналитическим решением формулы (10) в символьном виде относительно  $L_n$

$$L_n' = a + \frac{h_n \tan \beta_n}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{\frac{h_n^2 \tan^2 \beta_n + 4h_n \sigma_a (\tan \alpha_{зв} h_n + a)}{\cos \beta_n \rho_a g (3a + 2h_n \tan \alpha_{зв})}} \quad (11)$$

На рисунке 8 представлен график зависимости остаточной длины спека, при которой обеспечивается разрушение пирога разламыванием, от предела прочности агломерата для одновалковой дробилки типовой конструкции 1 (при  $\beta_n = 45^\circ$ ,  $\alpha_{зв} = 30^\circ$ ) и усовершенствованной 2 (при  $\beta_n = 35^\circ$ ,  $\alpha_{зв} = 0^\circ$ ).

Как видно из зависимостей на графиках, при типовой конструкции дробилки разрушение агломерационного спека разламыванием обеспечивается только при пределах прочности меньше  $\sigma_a = 0,07$  МПа. Остаточная длина аглопирога  $L_n$  в этом случае существенно меньше.

Для обоснования конструктивных параметров необходимо рассмотреть усовершенствованную схему дробилки с измененным углом наклона приемного стола, в которой поверхность приемного стола параллельна оси лопасти звездочки ротора, имеющей

трапецевидную форму с расширением от основания к хвостовой части, при ее взаимодействии с аглоспеком (рис. 9). Это обусловлено тем, что в процессе эксплуатации лопасти подвергаются износу и, соответственно, в дальнейшем угол контакта  $\alpha_{зв}$  будет уменьшаться, а такая конструкция позволит увеличить срок эксплуатации ротора с показателями угла  $\alpha_{зв}$ , близкими к нулю.

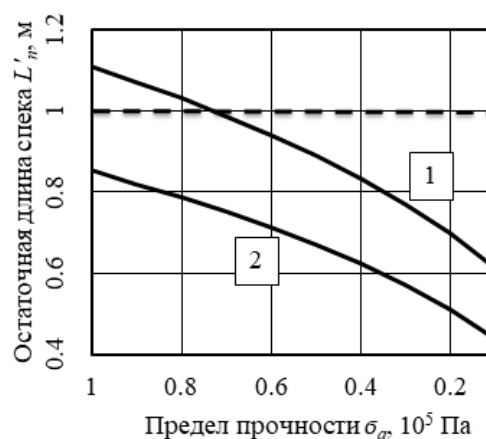


Рисунок 8 Графики зависимостей остаточной длины аглоспека, обеспечивающей разрушение пирога разламыванием, от предела прочности агломерата

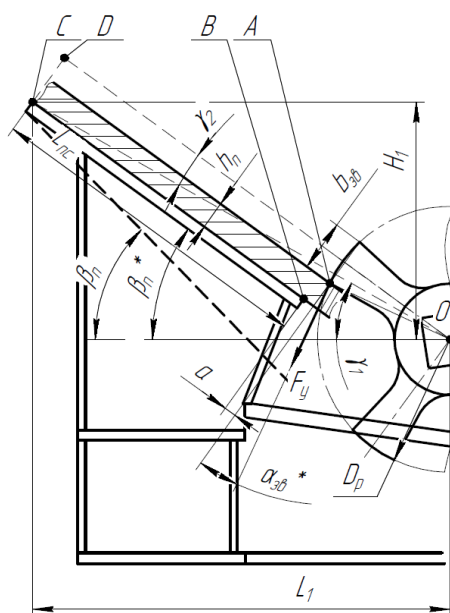


Рисунок 9 Расчетная схема одновалковой дробилки с измененным углом наклона приемного стола



Рассмотрим возможность модернизации дробилки в реальных производственных условиях процесса дробления агломерата, представленных на схеме (рис. 9), отгаликиваясь от конструктивных особенностей всей хвостовой части агломашины. Из производственного опыта следует, что расстояние от верхней точки приемного стола, зависящее от расположения хвостового радиуса агломашины и габаритов спекательных тележек, до оси вращения ротора дробилки по горизонтали  $H_1$  и расстояние от верхней точки рабочей поверхности приемного стола до оси вращения ротора по вертикали  $L_1$  изменять не представляется возможным, так как это приведет к существенной модернизации всего узла дробильной машины (привода, фундамента, металлоконструкций и т. д.) и, соответственно, требует значительных капиталовложений при реконструкции.

В этом случае добиться углов контакта, близких к нулю, возможно только за счет изменения угла наклона приемного стола таким образом, чтобы его поверхность была параллельна оси лопасти звёздочки при ее контакте с аглоспёком.

Рассмотрим расчетную схему, представленную на рисунке 9. Учитывая, что  $\tan \gamma_1 = \frac{H_1}{L_1}$ , а  $\sin \gamma_2 = \frac{b_{3\phi} + 2h_n}{2\sqrt{H_1^2 + L_1^2}}$ , тре-

буемый угол наклона приемного стола дробилки относительно горизонтали (при решении треугольника  $OCB$ ) для обеспечения условий взаимного контакта лопасти звёздочки ротора с поверхностью агломерационного пирога параллельно ее оси симметрии определяется как

$$\begin{aligned} \beta_n^* &= \gamma_1 + \gamma_2 = \\ &= \arctan \frac{H_1}{L_1} + \arcsin \frac{b_{3\phi} + 2h_n}{2\sqrt{H_1^2 + L_1^2}}. \end{aligned} \quad (12)$$

В то же время длину рабочей поверхности приемного стола  $L_{nc}$  при условиях,

описанных выше, можно найти по следующей зависимости

$$\begin{aligned} L_{nc} &= \\ &= \sqrt{H_1^2 + L_1^2} - \frac{b_{3\phi} + 2h_n}{4} - a - \frac{D_p}{2}. \end{aligned} \quad (13)$$

Для реализации данных усовершенствований в условиях дробления агломерата в одновалковой дробилке в агломерационном цехе Филиала № 12 ЗАО «Внешторгсервис» предлагается изменить значение угла наклона поверхности приемного стола с  $\beta_n = 45^\circ$  на  $\beta_n' = 35^\circ$  (рис. 9), при этом его длина (при  $H_1 = 1,15$  м и  $L_1 = 2,02$  м) составит  $L_{nc} = 1,61$  м, а угол контакта (для новой звёздочки) согласно зависимости (13) —  $\alpha_{3\phi}^* = 10^\circ$ . Это обусловлено тем, что в процессе дробления, как описывалось выше, лопасти подвергаются износу, и, соответственно, угол  $\alpha_{3\phi}$  будет изменяться, за счет чего можно увеличить срок эксплуатации звездочек при его значениях, близких к нулю. При этом для повышения срока эксплуатации ротора до замены звездочек угол  $\alpha_{3\phi}$  в дальнейшем можно регулировать изменением формы рабочей поверхности лопасти.

На основании предварительных расчетов определено, что при таких условиях контакта аглоспёка с поверхностью лопасти звёздочки в зависимости от предела прочности агломерата по сравнению с дробилкой, использующейся в условиях агломерационного цеха Филиала № 12 ЗАО «Внешторгсервис» в настоящее время, можно обеспечить:

- увеличение усилий  $F_y$ , действующих на агломерационный спёк при его дроблении, в 6–11 раз;
- повышение напряжений в «опасном» сечении  $\sigma_n$  в 2–3,3 раза;
- увеличение остаточной длины аглопирога  $L_n$ , обеспечивающей реализацию

дробления аглопирога за счет разламывания, на 30–40 %.

Это даст возможность увеличить долю агломерата, полученного в процессе дробления за счет разламывания его консольной части, а не раздавливания о поверхность приемного стола и колосники, тем самым повысить эффективность процесса дробления и снизить содержание мелкой фракции и кусков, размеры которых выйдут за допустимый «верхний» предел.

**Выводы и направление дальнейших исследований.** В ходе проведенных исследований определены следующие закономерности от угла взаимного контакта аглоспёка с лопастью звёздочки ротора и угла наклона поверхности приемного стола:

- величины свободного проникновения пирога агломерата в рабочую зону одновалковой дробилки;
- усилий, действующих в зоне контактного взаимодействия зубьев звёздочки с поверхностью агломерационного спёка;
- напряжений в «опасном» сечении пирога, возникающих в процессе его дробления;
- остаточной длины аглоспёка, обеспечивающей дробление агломерата разламыванием.

### Библиографический список

1. Коротич, В. И. *Агломерация рудных материалов [Текст]* / В. И. Коротич, Ю. А. Фролов, Т. Н. Бездежский. — Екатеринбург : ГОУ ВПО «УГТУ–УПИ», 2003. — 400 с.
2. *Механическое оборудование металлургических заводов. Механическое оборудование фабрик окускования и доменных цехов [Текст] : учеб. пособ. для вузов / В. М. Гребеник [и др.]. — К. : Выща школа, 1985. — 312 с.*
3. Власенко, Д. А. *Комплексный анализ особенностей эксплуатации дробильно-измельчительного оборудования в агломерационном производстве [Текст]* / Д. А. Власенко // *Инновационные перспективы Донбасса. Инновационные технологии проектирования, изготовления и эксплуатации промышленных машин и агрегатов.* — Донецк : ДонНТУ, 2019. — Т. 3 — С. 150–154.
4. Тарг, С. М. *Краткий курс теоретической механики [Текст]* / С. М. Тарг. — М. : Высшая школа, 2010. — 416 с.
5. Сивухин, Д. В. *Общий курс физики. Т. 1. Механика [Текст]* / Д. В. Сивухин. — [5-е изд.]. — М. : Физматлит, 2006. — 560 с.
6. Демидович, В. П. *Дифференциальные уравнения [Текст]* / В. П. Демидович, В. П. Моденов. — СПб. : Лань, 2008. — 288 с.
7. Пат. 196194 Российская Федерация, МПК В02С 4/00, В02С 4/28, В02С 4/30. *Ротор одновалковой зубчатой дробилки* / Д. А. Власенко, А. П. Жильцов, Э. П. Левченко, В. В. Мороз,

Выявлено существенное влияние данных параметров на эффективность процесса дробления агломерата в одновалковой дробилке.

Предложены зависимости для обоснования угла наклона приемного стола и его длины для конкретных конструктивно-технологических условий одновалковой дробилки.

Обоснована рациональность использования роторов с шевронным расположением зубьев звёздочек в процессе дробления агломерата.

Перспективным направлением исследования процесса дробления агломерата в одновалковой зубчатой дробилке является экспериментальное определение уточненных значений пределов прочности на сжатие, изгиб и растяжение для более точного математического описания изучения основных параметров процесса разрушения агломерата разламыванием в одновалковой дробилке.

В настоящее время такие работы проводятся в Донбасском государственном техническом университете с привязкой к условиям агломерационного цеха Филиала № 12 ЗАО «Внешторгсервис» в г. Алчевске.

А. С. Мяжков ; заявитель и патентообладатель Липецкий гос. техн. ун-т. — № 2019137708 ; заявл. 21–11–2019 ; опубл. 19–02–2020, бюл. № 5. — 6 с. : ил.

8. Курс теоретической механики [Текст]. Т. 1 / под ред. К. С. Колесникова. — М. : изд. МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2002. — 735 с.

9. Рябчиков, М. Ю. Модель разрушения металлургического агломерата [Текст] / М. Ю. Рябчиков // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. — М. : МИСиС. — 2016. — Т. 59. — № 3. — С. 159–166.

10. Сопротивление материалов с основами теории упругости и пластичности [Текст] / Г. С. Варданян [и др.]. — М. : Изд-во АСВ, 1995. — 573 с.

11. Борискин, И. К. Интенсивная механическая обработка агломерата. Теория, оборудование, технология [Текст] / И. К. Борискин, Г. А. Арыков, А. Н. Пыриков. — М. : МИСиС, 1998. — 248 с.

12. Нескоромных, В. В. Разрушение горных пород при проведении геологоразведочных работ [Текст] : учеб. пособ. / В. В. Нескоромных. — Красноярск : Сиб. федер. ун-т, 2015. — 396 с.

13. Что нужно знать о сопротивлении материалов [Текст] : учеб. пособ. / под ред. В. С. Жернакова. — М. : Машиностроение, 2001. — 276 с.

14. Литвинский, Г. Г. Развитие единой теории прочности и закономерности разрушения [Текст] / Г. Г. Литвинский // Сб. науч. трудов ДонГТУ. — Алчевск : ГОУ ВПО ЛНР «ДонГТУ», 2019. — Вып. 13 (56). — С. 5–18.

© Власенко Д. А.

*Рекомендована к печати к.т.н., проф., зав. каф. МЧМ ДонГТУ Куберским С. В., д.т.н., проф., зав. каф. АТ ЛНУ им. В. Даля Замотой Т. Н.*

Статья поступила в редакцию 26.05.20.

**PhD in Engineering Vlasenko D. A. (DonSTU, Alchevsk, LPR)**

#### **JUSTIFICATION OF DESIGN AND TECHNOLOGICAL PARAMETERS OF A SINGLE-ROLL CRUSHER OF IRON-ORE SINTER WITH A CHEVRON ARRANGEMENT OF ROTOR SPROCKET TEETH**

*The paper offers a method for analytical substantiation of the main design parameters of a single-roll rotary toothed crusher of a blast-furnace iron-ore sinter. Using the fundamental laws of general mechanics and mechanics of rigid bodies the mathematical patterns were justified to determine the amount of free penetration of sinter pie into the operating area of the rotor of single-roll crusher, forces acting in the zone of contact interaction of the sprocket teeth with the surface of sinter cake, stress in the “dangerous” section of sinter cake arising in the process of its crushing, depending on the angle of their mutual contact and the angle of operating surface of the receiving roll table. The use of rotors with a chevron arrangement of sprocket teeth on the rotor in the process of sinter crushing is justified. Based on a comparative analysis of the results obtained using the obtained dependencies, rational design parameters of a single-roll crusher in the process of crushing iron-ore sinter in the sinter shop of Branch № 12 CJSC “Vneshtorgservis” are proposed, which allow increasing the efficiency of crushing process and reducing the content of outsized sinter in the blast-furnace burden.*

**Key words:** sinter, crushing, single-roll crusher, chevron arrangement of sprocket teeth, contact angle, angle of inclination of the receiving roll table, force of contact interaction, stress.