

Ж.И. Кузбаков¹

¹Актюбинский региональный государственный университет им. К.Жубанова,
г. Актобе, Казахстан

ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНАЯ ДЕЗИНТЕГРАЦИЯ ФЕРРОМАТЕРИАЛОВ

Аннотация. Способы разрушения твердых материалов являются основой технологии дробления и фракционирования при подготовке сырья к металлургическому переделу. Для снижения энергоемкости дробления, направляемый в зев дробилки материала можно предварительно обработать так, чтобы перевести его в напряженное состояние или снизить его прочность. Дробление подготовленного материала требует меньше механической энергии, поэтому энергоемкость измельчения уменьшается, уменьшается износ дробящих плит и снижаются нагрузки на узлы и элементы машины. Для интенсификации и совершенствования процесса дробления высокопрочных слитков металла (феррохрома) предложена технологическая линия для производства ферросплавов, на которую получен инновационный патент Республики Казахстан. Для повышения прочности слитка углеродистого феррохрома термическое воздействие заключается в равномерном охлаждении слитка металла по всему объему.

Ключевые слова: ферроматериалы, дробление, способ разрушения, энергоемкость, разливка ферросплавов, термическое воздействие, слиток.

• • •

Түйіндеме. Қатты материалдарды бұзу әдістері шикізаттарды металлургиялық қайта өңдеуге дайындық кезінде ұсату және сұрыптау технологиясының негізі болып табылады. Ұсатуға арналған материалды ұсатқыштың қабылдағыш саңлауына бағыттағанда, оны алдын ала өңдеп кернеулі жағдайға аударып, беріктілігін төмендетуге болады. Дайындалған материалды өңдеу механикалық энергияны аз қажет етеді, сондықтан ұсату процесінің энергосыйымдылығы төмендейді, ұсатуға арналған жұмыс тақтайшаларының шығыны азаяды және машинаның бөлшектері мен элементтеріне аз жүктеме түседі. Беріктілігі өте жоғары металдың (феррохромды) ұсату процесін жетілдіруге, ырықтандыруға бағытталған ферроқорытпа өндірісіне арналған технологиялық желі ұсынылған. Оған Қазақстан Республикасының инновация-

лық патенті берілген. Жоғарғы көміртекті феррохром құймасының беріктілігін жоғарылату үшін термиялық әсер ету дегеніміз, ол металл құймасын барлық көлемі бойынша бірқалыпты суыту.

Түйінді сөздер: ферроматериалдар, ұсату, қирату әдісі, энергосыйымдылық, ферроқорытпаларды құю, термиялық әсер ету, құйма.

• • •

Abstract. The methods of destruction of solid materials are the basis of the crushing and fractionation technology in the preparation of raw materials for the metallurgical transformation. In order to reduce the energy intensity of crushing, the material fed to the crusher can be pretreated in such a way as to bring it into a stressed state or reduce its strength. The crushing of the prepared material requires less mechanical energy, so the energy intensity of grinding decreases, as well as the wear of the crushing plates. Loads on the machine nodes and components decrease. To intensify and improve the process of crushing high-strength ingots of metal (ferrochrome), the author proposed a technological line for the production of ferroalloys, to which the innovative patent of the Republic of Kazakhstan was obtained. In order to increase the strength of the ingot of carbon ferrochromium, it is necessary to thermally influence the uniform cooling of the ingot of the metal throughout its volume.

Keywords: ferromaterials, crushing, method of destruction, energy intensity, ferroalloy casting, thermal im-pact, ingot.

Введение. Производственный процесс получения ферроматериалов включает три последовательные стадии: подготовка шихтовых материалов, выплавка ферросплавов и разделка готовых сплавов. При этом подготовка шихты и разделка ферросплавов имеют много общего в плане использования дробильного и сортировочного оборудования, а также технологического требования-выделения в ходе переработки однородной фракционированной продукции с ограничением содержания некондиционных мелких фракций [1,2]. Способы разрушения твердых материалов являются основой технологии дробления и фракционирования при подготовке сырья к металлургическому переделу. В свою очередь они влияют на все последующие технологии получения металла и на экономику предприятия в целом [3,4]. В настоящее время переработка ферросплавного сырья и продуктов плавки осуществляется на предприятиях и заключается в дроблении слитков металла щековыми дробилками и отсеивании некондиционных фракций на грохотах. По суще-

ствующей технологии процесс разливки и разделки слитков феррохрома является энергоемким и продолжительным во времени.

Цель работы – снижение энергоемкости дробления высокопрочных слитков ферроматериалов и некондиционной фракции (отходов) при измельчении углеродистых ферроматериалов, повышение эксплуатационной надежности дробильного оборудования.

Теория, материалы и методы исследования. Для разрушения твердых материалов применяются различные виды энергии и соответствующие разрушающие инструменты и машины, различные технологии. Несмотря на многообразие технологий, механизм разрушения един – это образование и рост трещин. Все способы разрушения рассмотрены с единых энергетических позиций. Для каждого способа разрушения имеются механизм подвода и преобразования энергии, принципы построения техники и технологии, расчет оптимальных параметров [5]. Нередко требуется сохранить твердое тело в целостности, не разрушенным, и для этого необходимо решить обратную задачу, т. е. определить условия, при которых, имеющиеся в твердом теле трещины не должны расти, сохранить равновесное состояние. В этом случае необходимо определять максимальный уровень воздействия на твердое тело, с учетом его физических свойств, при котором равновесное состояние трещин не нарушается и соответственно выбрать технику и технологию [6].

Для снижения энергоемкости дробления, направляемый в зев дробилки материал, можно предварительно обработать так, чтобы перевести его в напряженное состояние или снизить его прочность. Дробление подготовленного материала требует меньше механической энергии, поэтому энергоемкость измельчения уменьшается, при этом уменьшается износ дробящих плит и снижаются нагрузки на узлы и элементы машины [7- 9].

Наиболее просто осуществить предварительную термическую обработку. Материал, подвергаемый к дроблению можно обработать по двум режимам. Равномерно, когда весь кусок слитка обрабатывается до одинаковой температуры, и неравномерно, когда обрабатывается часть (поверхность) куска (резкое охлаждение поверхности слитка хладагентом) [10]. При неравномерной термической обработке, часть куска слитка расширяется и растягивает не нагретую часть, т.е. поверхность слитка (тепло выводится из слитка с высокой тем-

пературой нагрева $\sim 500^\circ\text{C}$), где возникают и прорастают трещины и прочность слитка уменьшается, что и дает возможность снизить энергоемкость дробления, снизить нагрузки на детали машины

Нагретая часть слитка производит работу при тепловом расширении

$$A = \frac{1}{2} a^2 T^2 V_0 E_0, \quad (1)$$

где a – линейный коэффициент теплового расширения;

T – температура нагретой части;

V_0 – объем материала, где концентрируется тепло.

$$T = \frac{N t}{c m V_0}, \quad (2)$$

$N = g D^2$ – мощность, переданная охлажденной части слитка,

g – удельная плотность излучения,

t – время нагревания охлажденной части,

c – удельная теплоемкость материала,

m – плотность материала,

V_0 – объем нагретой части куска слитка.

Примем, что

$$V_0 = D^2 \sqrt{\pi a t}, \quad (3)$$

где D – размер куска слитка.

С учетом V_0 (3)

$$T = \frac{g \sqrt{t}}{\sqrt{\pi \lambda c m}}, \quad (4)$$

где λ – удельная теплопроводность слитка металла.

Если нагретый слиток не охлаждать, то он работу не производит, поэтому необходимо охлаждать только части куска слитка, т.е. его поверхность, равная $D\sigma$. Из уравнения $D\sigma = \sqrt{\pi a t}$ определим время нагревания охлажденной части:

$$t = \frac{D^2 \sigma^2}{\pi a} \quad (5)$$

Применив значения V_0 (3) и (4), получается, что нагретая часть куска слитка производит работу:

$$A_T = \frac{a^2 E g^2 D^5 b \sigma^3}{6(1-2\mu)\pi^2 \lambda^2}. \quad (6)$$

Для дробления куска слитка требуется энергия

$$\mathcal{E} = \frac{\sigma^2 k S L}{E \eta_m}, \quad (7)$$

где σ – предел прочности материала на растяжение;

L – параметр дробления;

η_m – к.п.д. механического разрушения;

S – вновь образованная поверхность.

Если $S = D^2 n$, где n – число вновь образованных поверхностей, поэтому

$$\mathcal{E} = \frac{\sigma^2 k L D^2 n}{E \eta_m}. \quad (8)$$

Доля энергии, полученной от нагретой части куска A_T / \mathcal{E} , применяя A (6) и \mathcal{E} (8), получим

$$\frac{A_T}{\mathcal{E}} = \frac{(A E g)^2 D^3 \sigma P^3 \eta_m}{6(1-2\mu)(\pi \lambda \sigma)^2 K L n}. \quad (9)$$

Из (9) следует, что обрабатывать целесообразно крупные куски (целый слиток) высокой прочности (н/у и с/у *FeCr*) и применять излучение высокой плотности, каковым является выделяемое тепло нагретым слитком (тепловое излучение) [11]. Равномерную термическую обработку разлитого слитка металла по всему объему можно обработать путем послойной разливки, т. е. методом «плавка на плавку». Охлажденный первый разлитый слой слитка будет охлаждать вновь разлитый слой, а два предыдущих разлитых слоя будут охлаждать только что разлитый третий слой и т. д. Число слоев, т. е. размер разлитого охлажденного слитка будет зависеть от размера приемного зева применяемого дробильного оборудования. Например, для дробилки с приемным зевом 400 x 900 мм, необходимо разлить три слоя по 100 мм каждый, т. е. размер загружаемого в зев дробилки металла составит ~ 300 мм.

При неравномерной термической обработке слитка металла снижение прочности материала возможно по следующим причинам:

– из-за различия коэффициентов теплового расширения элементов;

– из-за различия объемов зерен элементов.

Работа, получаемая от расширяющихся зерен элементов

$$A = \frac{(a_1^2 - a_2^2) \Gamma^2 E (D_1^3 - D_2^3)}{6(1 - 2\mu)}, \quad (10)$$

где a_1 коэффициент теплового расширения первого элемента;
 a_2 – коэффициент теплового расширения соседнего с первым, второго элемента;

D_1^3 и D_2^3 – объемы этих элементов;

E – среднее значение модуля Юнга материала.

Эта работа расходуется на разрыв связей соседних элементов по границе их соприкосновения:

$$W = \frac{\sigma^2 D^2 L}{E}, \quad (11)$$

где D – размер меньшего элемента.

Используя (1) и (2) получим уравнение закона сохранения энергии:

$$\frac{(a_1^2 - a_2^2) \Gamma^2 E (D_1^3 - D_2^3)}{6(1 - 2\mu)} = \frac{\sigma^2 D^2 L}{E}, \quad (12)$$

из которого определим температуру материала, при которой элементы разделяются по границе:

$$T = \left[\frac{6 \sigma^2 D^2 L (1 - 2\mu)}{E^2 (a_1^2 - a_2^2) E (D_1^3 - D_2^3)} \right]^{1/2}. \quad (13)$$

Из выражения (13) следует, что температура материала, при которой уменьшается ее прочность, будет меньше для более прочных материалов, при большой разности коэффициентов теплового расширения и объемов этих элементов. Для материалов с крупнозернистой структурой такой способ обработки может дать лучшие результаты, так как необходимая температура уменьшается как $1/\sqrt{D}$. Температура обработки материала определяет энергоемкость обработки материала:

$$q = c m T \quad (14)$$

Энергоемкость такой обработки получается более высокой, поскольку ослабление прочности происходит при температуре достаточно высокой от 400°C и выше.

При использовании обоих способов тепло рекуперировано разлитым материалом (металлом). Только это тепло необходимо использовать эффективно. При охлаждении разлитого слитка прочность высокоуглеродистого феррохрома повышается, что способствует при незначительном повышении энергоемкости дробления, снижению мелочи.

Охлажденные элементы слитка могут разрывать связи на границах нагретых и охлажденных элементов, что приводит к уменьшению прочности кусков слитка, уменьшается энергоемкость дробления и расход дробящих плит. Работа нагретых зерен элементов

$$A = \frac{a^2 T^2 D^3 E}{6(1 - 2\mu)}, \quad (15)$$

где D – размер нагретых зерен элементов.

Энергию, которая затрачивается на разрыв связей между зернами, можно определить по формуле (15). Уравнение закона сохранения энергии для этого способа термообработки

$$\frac{a^2 T^2 D^3}{6(1 - 2\mu)} = \frac{\sigma^2 D^2 L}{E}. \quad (16)$$

Из уравнения (16) определяется температура T , после которой можно приступить к охлаждению слитка металла, т.е.

$$T = \left[\frac{6 \sigma^2 L (1 - 2\mu)}{a^2 E^2 D} \right]^{1/2}. \quad (17)$$

Температура нагрева слитка меньше для более прочных материалов, пропорционально отношению σ / E пропорционально $1/\sqrt{D}$, т.е. способ термообработки целесообразно применять для более прочных крупнозернистых материалов.

При дроблении высокоуглеродистого феррохрома образуется до 30% и более некондиционной фракции (мелочи), а при дроблении высокопрочных слитков низко и среднеуглеродистого феррохрома часто отказывают различные узлы и элементы дробильной машины [13]. Для интенсификации и совершенствования процесса дробления высокопрочных слитков металла (феррохрома) предложена технологическая линия для производства ферросплавов, на которую получен инновационный патент Республики Казахстан [12, 13].

Рассмотрим кинетику поверхностной термической обработки слитка металла. Поверхностная термическая обработка осуществляется на одну свободную поверхность (охлажденная часть), через которую в массив слитка металла вводится тепло, т.е. внутренняя энергия нагретого слитка (рисунок). При этом обрабатываемая поверхность S не доходит до границ массива слитка.

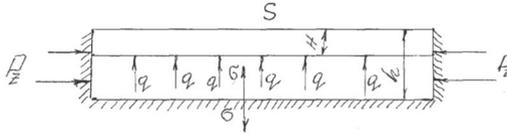


Рисунок - Схема поверхностной термической обработки массива слитка.

Тепловой поток от нагретой части слитка с плотностью мощности $q(\text{Вт}/\text{м}^2)$ распределен равномерно по поверхности S . За время t в слитке прогревается слой толщиной $h \approx \sqrt{\pi a t}$, распределение температуры в этом слое экспоненциальное. Максимальная температура поверхности $T(0, t)$. Распределение температуры описывается формулой

$$T(z, t) = \frac{2g\sqrt{at}}{\lambda} \operatorname{ierfc}\left(\frac{z}{2\sqrt{at}}\right), \quad (18)$$

Средняя температура в этом слое равна T . Нагретый слой свободно расширяется перпендикулярно поверхности S , так как нагрузка в этом направлении P отсутствует, поэтому работу в этом направлении нагретый слой A_z не производит. Некоторому слою препятствует расширяться параллельно поверхности S охлажденный (не нагретый) массив слитка. В результате нагревания в этом слое возникает напряжение сжатия (или нагрузка P от массива слитка), равная

$$P = aTE. \quad (19)$$

Так как расширению параллельно поверхности S для нагретого слоя возможности нет (слиток находится внутри изложницы), то он деформируется перпендикулярно этой поверхности, такой деформации препятствует сила P_2 – связь этого слоя с массивом слитка, т.е.

$P_2 = y$, где y – предел прочности металлического слитка на растяжение. При достижении работы нагретым слоем, растут трещины параллельно поверхности S и возможен отрыв этого слоя от массива. Следовательно, нагретый слой массива слитка является источником трещины, преобразователем тепловой энергии в работу [14].

Работа, производимая источником трещины:

$$A = \left[\frac{2 a T V_0 P_2}{3} \right] - \left[\frac{P^2 V_0}{3 E_0} \right], \quad (20)$$

где $V_0 = S \sqrt{\pi a t}$, мощность тепла нагретого слоя $N = gS$, $T = Nt/cmV_0$.

С учетом значений P , P_2 , V_0 , N получаем

$$A = \left[\frac{2 a g S \sigma t}{3 c m} \right] - \left[\frac{a^2 E g^2 S t^{3/2}}{3 c m^2 \sqrt{\pi a}} \right]. \quad (21)$$

Закон сохранения энергии для поверхностной термической обработки с учетом A по (21) принимает вид:

$$\left[\frac{2 a g S \sigma t}{3 c m} \right] - \left[\frac{a^2 E g^2 S t^{3/2}}{c^2 m^2 3 \sqrt{\pi a}} \right] = \frac{\sigma^2 k S H}{E}, \quad (22)$$

где H – толщина слоя слитка, отделяющего от массива, слитка (граница трещины).

При выполнении уравнения (22) происходит отделение слоя слитка от массива или образуется трещина.

Из уравнения (22) получаем

$$H = \frac{2 a g t E}{3 \sigma k c m} - \frac{a^2 E^2 g^2 t^{3/2}}{3 \sigma^2 k c^2 m^2 \sqrt{\pi a}}. \quad (23)$$

Из условия $H = 0$, можно определить плотность потока теплового излучения, ниже которой разрушение материала не происходит – минимальная плотность

$$g_{\min} = \frac{2 \sigma c m \sqrt{\pi a}}{a E \sqrt{t}}. \quad (24)$$

$g_{\min} \approx 1 \text{ Вт/см}^2$. Практически это означает при какой температуре слитка можно производить термическое воздействие на слиток.

Выводы. Для снижения прочности низко- и среднеуглеродистого слитка феррохрома, направляемого в зев дробилки, необходимо

предварительно оказывать термическое воздействие на поверхность слитка металла по ходу разливки. Для повышения прочности слитка углеродистого феррохрома термическое воздействие заключается в равномерном охлаждении слитка металла по всему объему до одинаковой температуры.

Список литературы

1 Гладких В.А., Гасик М.И., Овчарук А.Н., Пройдак Ю.С. Проектирование и оборудование электросталеплавильных и ферросплавных цехов. – Днепропетровск: Системные технологии, 2009. – 736 с.

2 Мысик В.Ф., Жданов А.В. Проектирование и оборудование электроферросплавных цехов: учебное пособие / В.Ф. Мысик, А.В. Жданов – Екатеринбург: УрФУ, 2014. – 526 с.

3 Энергоэффективность и экологичность – будущее мировой ферросплавной промышленности. / Материалы международного ферросплавного конгресса ИНФАКОН – «Сталь», 2015.-№ 9. – С. 18-24.

4 Ярошенко Ю.Г.. Энергоэффективные и ресурсосберегающие технологии черной металлургии: / Ю.Г.Ярошенко, Я.М. Гордон, И.Ю. Ходорковская. Екатеринбург: ООО «УИПЦ», 2012- 670 с.

5 Proceedings of INFACON XIII – TheThirteenth International Ferro Alloy Congress. Efficient technologies in ferroalloy industry. (June 9-12, 2013 – Almaty, Kazakhstan). Vol. I-II.

6 Баранов В.Ф. Обзор дробильного и измельчительного оборудования основных производителей // Обогащение руд., 2012.- №3. – С. 32-38.

7 Кусенова Л.И., Герасимов С.А., Лаптева В.Г.. Износостойкость конструкционных материалов: М.: МГТУ им Н.Э. Баумана, 2011. – 240 с.

8 Саитов В.И. Условия подбора процессов разрушения горных пород при дроблении и измельчении // Горное оборудование и электротехника, 2015.- № 1. –С. 25-28.

9 Шишкин Е.В., Сафронов А.Н. Динамика вибрационной щековой дробилки с учетом влияния технологической нагрузки // Обогащение руд, 2016.- № 6.- С. 39-43.

10 Протасов Ю.И. Разрушение горных пород. Издательство Московского государственного горного университета, 2002.–453 с.

11 Кривандин В.А., Арутюнов В.А. и др. Металлургическая теплотехника. Т. 1. Теоретические основы. Учебник для вузов. М: Металлургия, 1986. – 424 с.

12 Кузбаков Ж.И., Франчук В.П., Федоскин В.А. Патент РК № 2013/096.2. Решение № 1142 от 21.07.2014 г. Линия производства феррохрома.

13 Кузбаков Ж.И., Франчук В.П., Федоскин В.А. О применимости энергоэффективного оборудования при производстве ферроматериалов. Труды VIII Международной научно-практической конференции. «Энергоэффективные и ресурсосберегающие технологии промышленности» М.: МИСиС, 2016. - С. 86-91.

14 Халкечев Р.К., Халкечев К.В. Управление селективностью разрушения при дроблении и измельчении горных пород на основе методов подобия и размерности динамики трещин // Горный журнал, 2016.- № 6.- С. 64-66.

Кузбаков Ж.И., кандидат технических наук, доцент,
e-mail: flora_karim@mail.ru