УДК 622.73

А.И.РАКАЕВ, П.А.ШУМИЛОВ
Горный институт Кольского научного центра РАН, Апатиты
В.И.МАКСИМОВ
ОАО «Институт Гипроникель», Санкт-Петербург
С.Г.БЕСЕДОВСКИЙ
ОАО «Кольская ГМК», Мончегорск

О РОЛИ ИЗМЕЛЬЧАЮЩЕЙ СРЕДЫ ПРИ ПОДГОТОВКЕ ФАЙНШТЕЙНА К ФЛОТАЦИОННОМУ РАЗДЕЛЕНИЮ

Проведены исследования измельчаемости файнштейна в различных типах мельниц. Показаны различия в характере измельчения при помощи стержней, шаров и цильпебсов. Даны рекомендации по повышению производительности механического измельчения.

Research of high grade matte grinding has been made. Differences in grinding characteristics between various media types have been revealed. The recommendations for further increase of mechanical grinding productivity have been given.

Измельчение файнштейна на ОАО «Комбинат «Североникель» осуществляется с целью раскрытия сульфидов меди (халькозин) и никеля (хизлевудит) при крупности, обеспечивающей минимальное взаимозасорение одноименных флотационных концентратов. Помимо халькозина и никеля образуется металлизированная фаза, в большей степени содержащая сульфид никеля. С целью уменьшения доли этого продукта необходимо стремиться к быстрейшему выводу измельчаемого материала из мельницы, к высокой скорости измельчения поступающего в мельницу материала.

Шаровое измельчение отличается повышенной избирательностью разрушения частиц промежуточной крупности. В стержневой мельнице в начальный период с высокой скоростью измельчаются крупные фракции, а мелкие вступают в процесс по мере исчезновения крупных частиц[*]. Измельчение в барабанных мельницах отличается высокой степенью однородности. Для поддержания высокой скорости измельчения в мельницы следует подавать специально подготовленную по крупности руду или соединять мельницы последовательно, что часто и осуществляется на практике.

Однако кардинальное решение проблемы повышения эффективности измельчения следует связывать с созданием внутри мельницы неравновесного хаотического состояния системы[**], состоящей из мелющих тел нестандартной формы и частиц различной крупности. Такое состояние внутри мельничного заполнения, в отличие от статистического равновесия, когда в зависимости от времени помола для разрушения выбирается ограниченная по крупности фракция, создает условия для вовлечения в процесс помола частиц с более широким спектром по крупности с самого начала измельчения.

Для проведения исследований по измельчению из ОАО «Комбинат «Североникель» поступила укрупненная проба дробленого файнштейна крупностью 7 % класса +25 мм. Среднее содержание меди в ней составило 27,77 %, никеля 45,96 %. Содержание металлов по классам крупности приближается к равномерному. В то же время более 90 % Cu и Ni сосредоточено в классе +2 мм. Закономерности разрушения файн-

[*] *Ракаев А.И.* Оптимизация рудоподготовки при гравитационном обогащении. Л.: Наука, 1989. 184 с.

[**] Нелинейные динамические процессы (к 80-летию со дня рождения Уно Копвиллема). Владивосток: Дальнаука, 2004. 261 с.

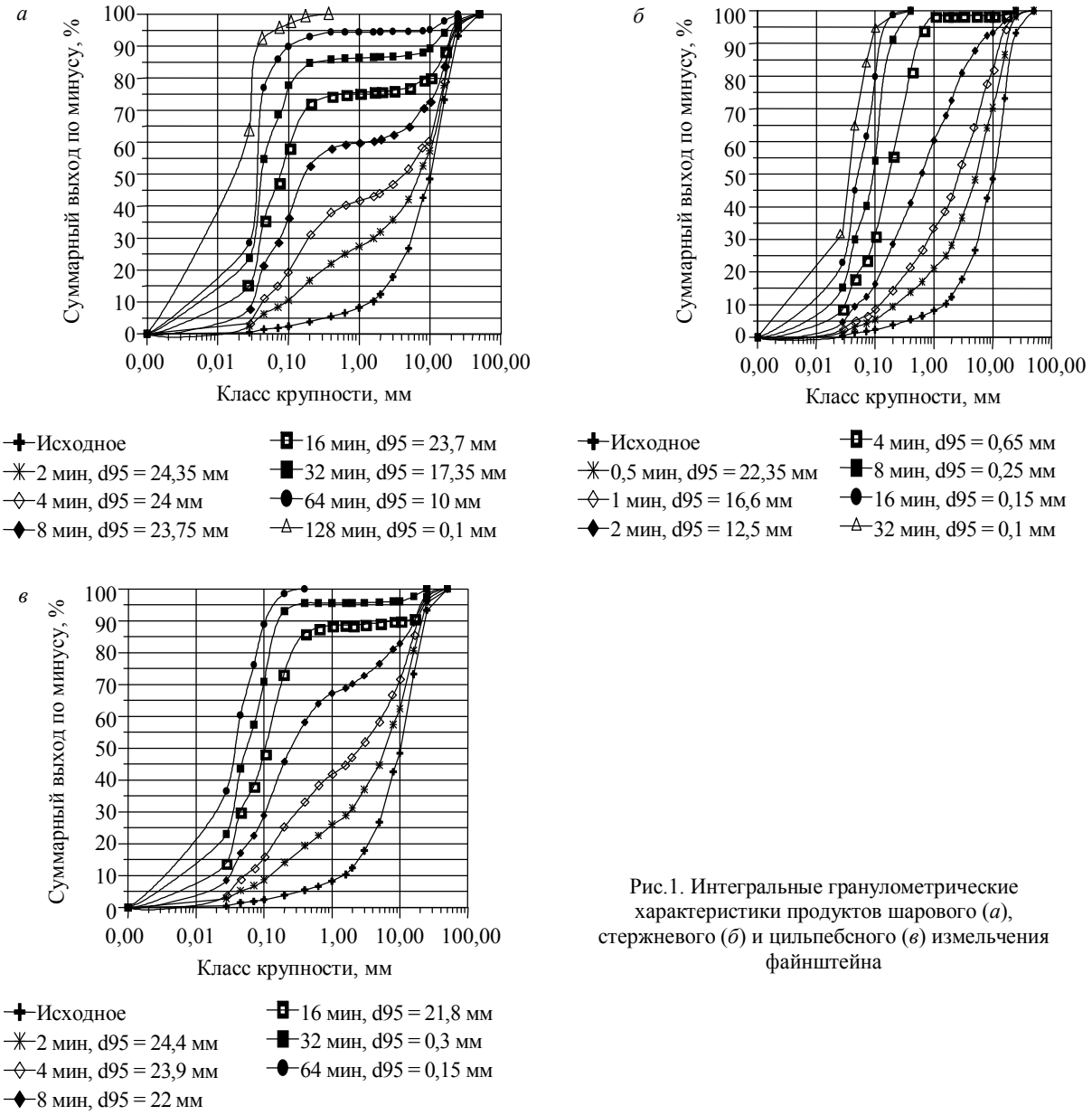


Рис.1. Интегральные гранулометрические характеристики продуктов шарового (*а*), стержневого (*б*) и цильпебсного (*в*) измельчения файнштейна

штейна при различных мелющих телах оценивали по результатам кинетики измельчения. При стержневом и шаровом помоле использовали стержни и шары диаметром 50 мм соответственно, при цильпебсном – короткие стержни длиной 100 мм и диаметром 45 мм. Измельчение проводили периодами, выбираемыми по алгоритму: $t_{i+1} = 2t_i$. Общее время шарового измельчения составило 128 мин, стержневого – 32 мин, цильпебсного – 64 мин (рис.1).

Интенсивность сокращения крупности остатка (расчетного класса) оценивалась по дифференциальному уравнению кинетики

$$Q(R,t) = \frac{dR}{dt} = C\frac{R^2}{R_0} - kR\,,$$

где R_0, R – содержание остатка на сите в начальный момент времени t_0 и в текущий момент времени t, %; C – коэффициент, характеризующий соотношение относительных скоростей измельчения крупных и мелких классов; k – относительная скорость измельчения, характеризующая измельчаемость крупных классов остатка в данный момент в единицу времени.

Аналогичное выражение использовалось для оценки интенсивности изменения

количества ценного компонента (скорости раскрытия) в расчетных классах крупности

$$Q(\varepsilon, t) = \frac{d\varepsilon}{dt} = C_\varepsilon \frac{\varepsilon^2}{\varepsilon_0} - k_\varepsilon \varepsilon ,$$

где k_ε, C_ε – коэффициенты, характеризующие удельные скорости изменения количества ценного компонента в крупных и мелких классах остатка соответственно; ε_0, ε – количество ценного компонента в расчетном классе в начальный и текущий моменты времени соответственно.

На рис.1 отчетливо видно, как практическое отсутствие шарового измельчения крупных кусков, начиная с $t_ш$ = 8 мин, приводит к выполаживанию характеристик в диапазоне размеров частиц 0,2-10 мм. Только в конце установленного времени помола ($t_ш$ = 128 мин) крупные частицы исчезают и кривая распределения частиц по крупности принимает привычный вид. Характеристики стержневого измельчения четко отражают отмеченные особенности разрушения материала. По сравнению с шаровым помолом, здесь с большей скоростью измельчаются крупные куски. Если при шаровом измельчении в начальный период ($t_ш$ = 2 мин) содержание класса –10 мм составляет около 57 %, то при стержневом способе достигает 93 %. Чтобы в шаровой мельнице измельчить файнштейн до крупности 90 % класса –0,1 мм требуется 64 мин, в стержневой мельнице эта крупность достигается в 2 раза быстрее, при $t_{ст}$ = 32 мин. Как и ожидалось, разрушение файнштейна при цильпебсном измельчении занимает промежуточное положение между шаровым и стержневым измельчением.

Максимум скорости шарового измельчения достигается в начальный момент времени на остатке крупностью 1 мм и сохраняется достаточно длительное время ($t_ш$ = 4 мин). Затем максимум скорости, уменьшаясь по величине, смещается в сторону мелких классов. Более же крупные остатки, в частности крупнее 10 мм, весь период времени измельчаются существенно медленнее. Так, выход класса +25 мм за период измельчения ($t_ш$ = 64 мин) уменьшился с 6,74 до 2,13 %, а класса +8 мм с 57,4 до 5,51 %. Только при увеличении времени помола до $t_ш$ = 128 мин частицы данной крупности разрушаются полностью. Первоочередное разрушение частиц промежуточной крупности приводит к образованию двух фракций, отличающихся по крупности и интенсивности измельчения (рис.2, *б*). Входя-

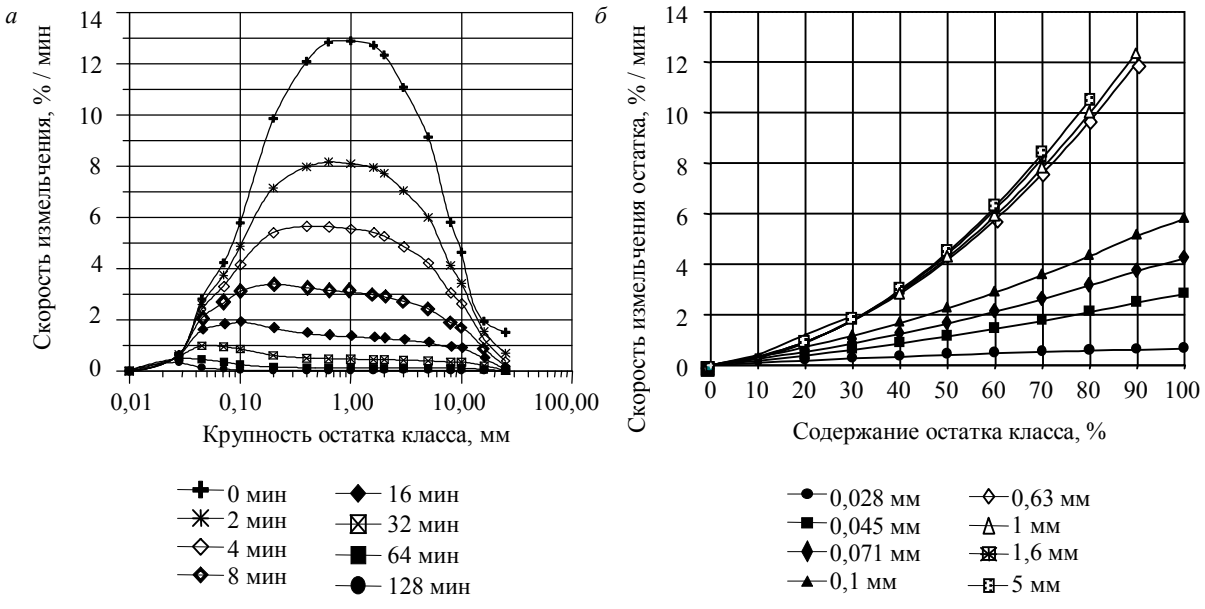


Рис.2. Зависимости скорости измельчения остатков классов от крупности остатка (*а*) и его содержания на сите (*б*) при шаровом измельчении файнштейна

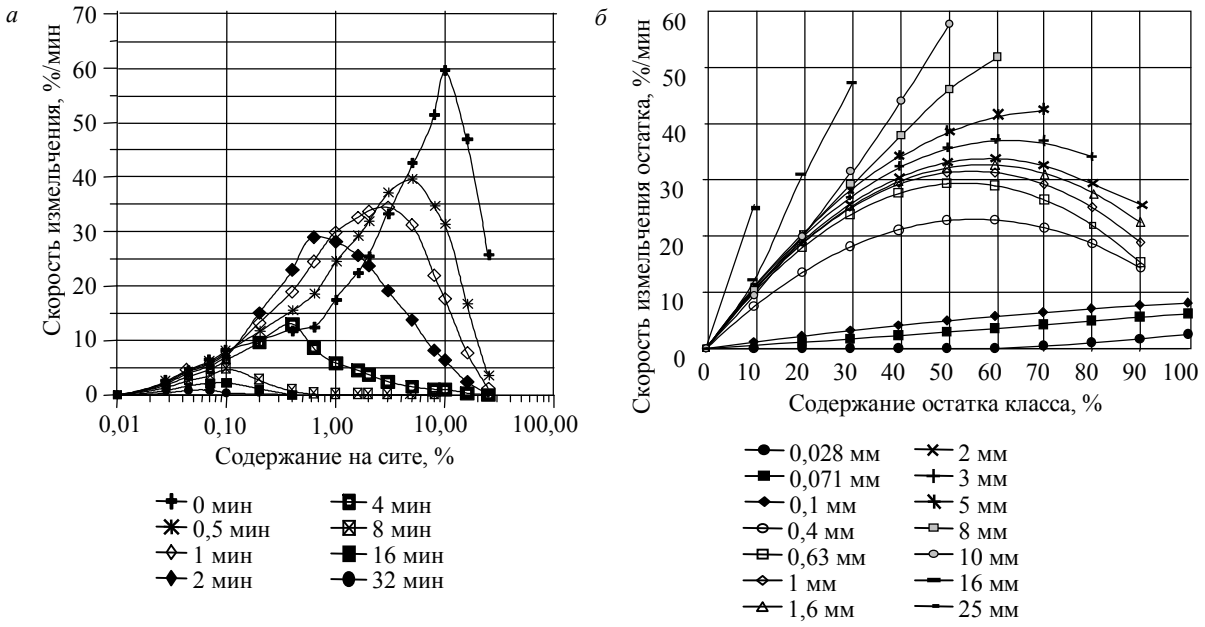


Рис.3. Зависимости скорости измельчения остатков классов от крупности остатка (*а*) и его содержания на сите (*б*) при стержневом измельчении файнштейна

щие во фракцию +0,2 мм остатки измельчаются одинаково с более высокой скоростью. Расчетные классы мельче 0,2 мм измельчаются по прямолинейному закону с гораздо меньшей скоростью.

Как и предполагалось, в стержневой мельнице с максимальной скоростью при $t_c = 0$ измельчается остаток на сите 10 мм (рис.3), тогда как в шаровой мельнице $Q_{max}^{шар}(R, t)$ имеет остаток на сите 1 мм (см. рис.2). По абсолютной величине максимум скорости в момент времени $t' = 0$ достигает 50-60 %/мин в стержневой мельнице, что почти в 5 раз выше, чем в шаровой. По мере исчезновения частиц из остатка +10 мм максимум скорости смещается в сторону уменьшения размера расчетных классов крупности. Четко отмечается избирательность и колебательный характер разрушения материала в стержневых мельницах. Преимущественное разрушение в начальный момент времени крупных классов приводит к тому, что остатки на ситах 25, 16, 10, 8 мм измельчаются по прямолинейному закону (см. рис.3, *б*). Продукты разрушения этих классов, переходя преимущественно в соседние классы, положительно влияют на интенсивность измельчения остатков на ситах 0,3-0,4 мм, что проявляется в нелинейном характере изменения скоростей измельчения этих частиц промежуточной крупности. Остатки на ситах мельче 0,2 мм измельчаются с теми же скоростями, как в шаровой мельнице, причем почти с теми же значениями скоростей измельчения.

Измельчение файнштейна с помощью коротких цилиндров носит промежуточный характер между шаровым и стержневым (рис.4). С максимальной скоростью в начальный период измельчаются остатки на ситах 6-8 мм. Затем по мере исчезновения крупных частиц максимум скорости постепенно снижается и одновременно смещается в сторону мелких классов крупности, заметно расширяя диапазон размеров частиц, вовлекаемых одновременно в процесс помола. Следует отметить, что при принятом интервале времени измельчения ($t = 32$ мин) больше всего продуктивного класса – 45 + 5 мкм образуется в стержневой мельнице (около 65 %), почти на 10 % меньше в шаровой (55 %) и меньше всего в цильпебсной мельнице (42 %). Зато по выходу шламов (класс –5 мкм) на первом месте стоит шаровая мельница, на втором цильпебсная (выход 4,8 %) и на последнем месте – стержневая мельница. Можно полагать, что при изменении размеров цильпебсов или

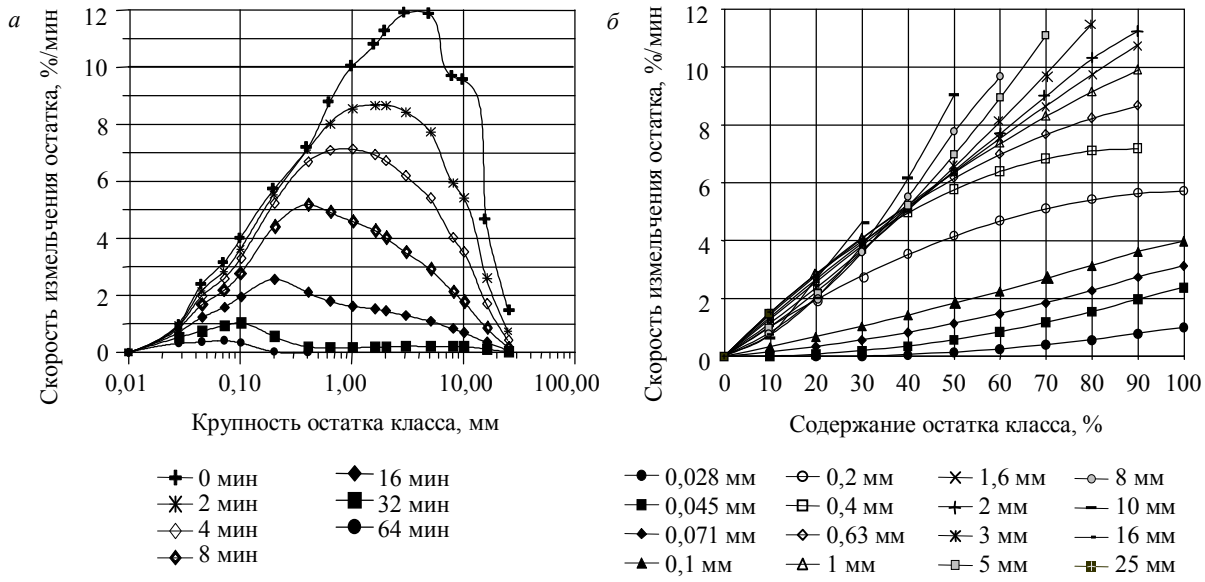


Рис.4. Зависимости скорости измельчения остатков классов от крупности остатка (*а*) и его содержания на сите (*б*) при цильпебсном измельчении файнштейна

при использовании мелющих тел иной, более сложной, формы рассматриваемые кривые скоростей измельчения будут сближаться с аналогичными кривыми скоростей стержневого помола в области крупных частиц при одновременном расширении диапазона частиц по размерам.

Таким образом, переход на хаотическое измельчение, выражающееся в одновременном разрушении частиц различного размера с высокими скоростями, возможен и крайне необходим для существенного повышения производительности механического измельчения. Для файнштейна переход на технологию интенсивного разрушения материала в мельнице означает существенное повышение селективности раскрытия сульфидных фаз, уменьшение ошламования меди и никеля при одновременном увеличении производительности цикла измельчения.