

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО РЕЖИМА РАБОТЫ ШАРОВОЙ МЕЛЬНИЦЫ

Т.С.^а Гусева, А.А. Сапрыкин, Е.А. Ибрагимов, Н.А. Сапрыкина
Юргинский технологический институт (филиал) Национального исследовательского
Томского политехнического университета,
652055, Кемеровская обл., г. Юрга, ул. Ленинградская, 26
^аe-mail: tsh2@tpu.ru

Аннотация: В статье рассматривается проблема оптимизации процессов механической активации в шаровой мельнице, ключевым элементом которой является выбор оптимальных режимов работы за счет корректировки частот вращения барабана. Авторы предлагают подход, основанный на анализе влияния различных частот вращения на эффективность процесса механической активации. В рамках исследования был проведен эксперимент, включающий серию тестов с различными частотами вращения барабана. Анализ данных показал, что существует определенный диапазон частот вращения, при котором достигается максимальная эффективность процесса механического легирования. На основе этих результатов были определены рекомендации для выбора оптимальных рабочих параметров шаровой мельницы, которые могут быть применены на практике для повышения эффективности механического легирования и получения порошка для селективного лазерного плавления.

Ключевые слова: лабораторная установка, механическая активация, шаровая мельница, режим работы, частота вращения барабана, каскадный, водопадный.

Abstract: The article addresses the issue of optimizing the processes of mechanical activation in a ball mill, with a focus on selecting optimal operational modes by adjusting the drum rotation frequencies. The authors propose an approach based on the analysis of the effects of various rotation frequencies on the efficiency of the mechanical activation process. Within the scope of the research, an experiment was conducted that included a series of tests with different drum rotation frequencies. Data analysis revealed that there is a specific range of rotation frequencies at which maximum efficiency of the mechanical activation process is achieved. Based on these findings, recommendations were formulated for selecting the optimal operational parameters of the ball mill, which can be implemented in practice to enhance production processes.

Keywords: laboratory-scale plant, mechanical activation, ball mill, operation mode, drum rotation frequency, cascade, waterfall.

Механическая обработка материалов является ключевым процессом в современной промышленности, позволяющим получать материалы с уникальными свойствами. Одной из распространенных технологий такой обработки является механическая активация порошков в шаровых мельницах. Данный метод обработки материала заключается в измельчении порошка до микронного или даже нанометрового размера за счет воздействия ударов, трения и истирания между шарами, порошком и стенками мельницы. В результате такой обработки частицы порошка подвергаются интенсивному механическому воздействию, что приводит к изменению их физических и химических свойств [1].

Механическая активация порошков с использованием шаровой мельницы является одним из важных процессов в различных отраслях промышленности, включая материаловедение, металлургию, фармацевтику и др., имеет как ряд значительных преимуществ, таких как: улучшение реакционной способности; получение наноразмерных порошков; механическая активация позволяет достичь высокой степени гомогенизации порошковых смесей и др.

Однако, несмотря на широкое применение и очевидные преимущества этого метода, существуют и значимые недостатки: износ оборудования, неоднородность размера частиц, длительность процесса.

Процесс механической активации в шаровой мельнице включает в себя множество параметров, которые необходимо оптимизировать для достижения получения композитного порошка для селективного лазерного плавления. Важнейшим аспектом является выбор оптимальных режимов работы, в частности, корректировка частоты вращения барабана [2, 3]. Этот параметр влияет на множество ключевых факторов, таких как энергетическая эффективность процесса, качество измельчения и активации материала. Рассмотрим основные проблемы оптимизации этих процессов:

1. Сложность определения оптимальной скорости вращения. Для каждого типа материала существует своя оптимальная скорость вращения барабана, которая обуславливает максимальную эффективность процесса измельчения и активации. Эта скорость зависит от множества факторов, включая размер и материал шаров, размеры и материал барабана, а также физико-химические свойства измельчаемого материала.

2. Энергетическая эффективность. Одна из ключевых проблем заключается в том, чтобы найти баланс между энергией, необходимой для достижения оптимального измельчения, и потребной энергией. Часто бывает сложно достичь желаемой степени измельчения без излишнего потребления энергии, что делает процесс экономически неэффективным.

3. Износ оборудования. Повышение частоты вращения барабана приводит к увеличению износа и, соответственно, к сокращению срока службы как шариков, так и самой мельницы. Это влечет за собой дополнительные расходы на техническое обслуживание и замену оборудования.

В Юргинском технологическом институте (филиал) Томского политехнического университета была создана лабораторная шаровая мельница. Это устройство предназначено для проведения механического легирования и получения композитных порошков для селективного лазерного плавления [5].

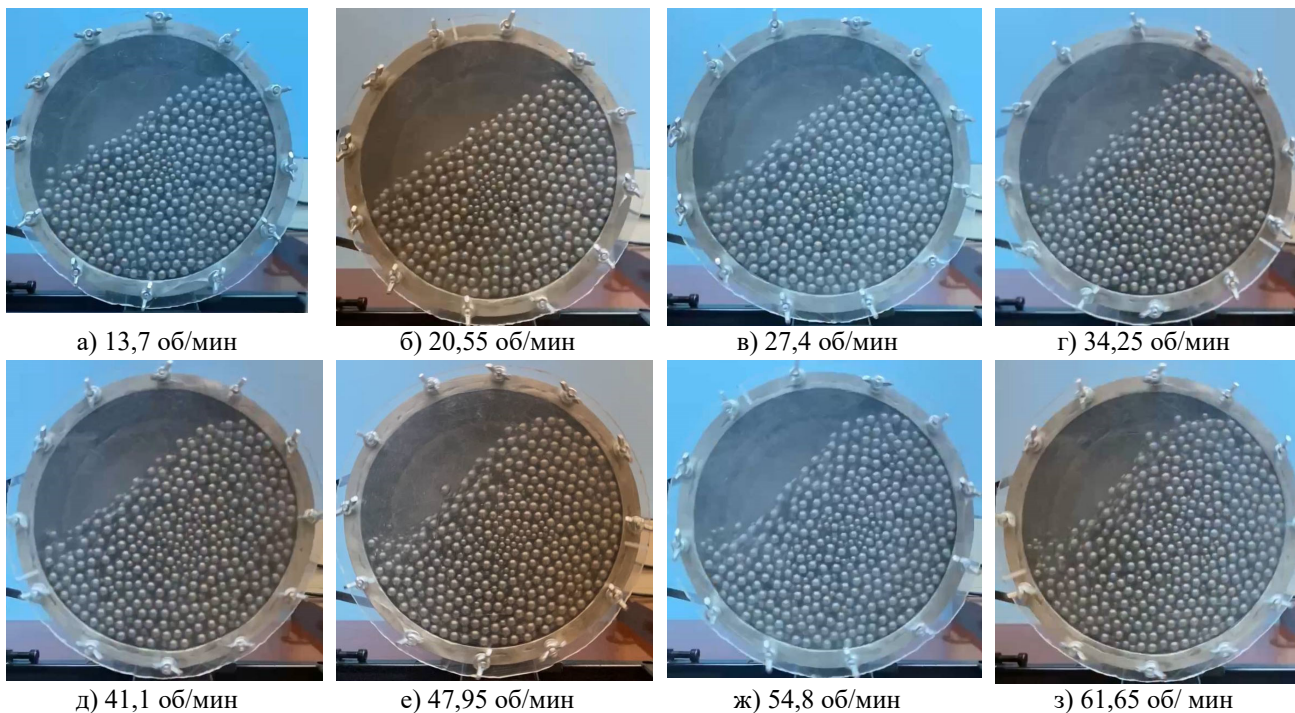
Устройство, описанное на рисунке 1, является комплексной системой механической обработки, предназначенной для смешивания твердых материалов. Эта система включает в себя основу, на которой установлен электродвигатель, и барабан установки.



Рис. 1. Лабораторная установка

Барабан мельницы изготовлен из высококачественной нержавеющей стали, имеющий вместительность 2,5 литра. В крышке барабана установлен ниппель, который используется для вакуумирования и заполнения внутреннего объема аргоном. Регулировка скорости вращения электродвигателя достигается за счет использования частотного преобразователя, обеспечивая тем самым возможность подбора оптимального режима работы с различными типами мелющих элементов.

Для определения оптимального режима движения шаровой нагрузки внутри шаровой мельницы в лаборатории Юргинского технологического института был проведен эксперимент. Определение режимов работы проводилось при заданных частот вращения барабана лабораторной установки в диапазоне от 27,4 до 137 об/мин. В качестве шаровой нагрузки были взяты шарики из стали ШХ15 $\varnothing 5$ – 500 шт., $\varnothing 7$ – 500 шт. и $\varnothing 8$ – 3000 шт. Общая масса шариков составила 7270 г. Объем занимающий шариками составил 70% от объема мельницы. На момент проведения эксперимента, крышка барабана была заменена на прозрачную крышку, для удобства определения режимов движения нагрузки в полости барабана лабораторной установки.



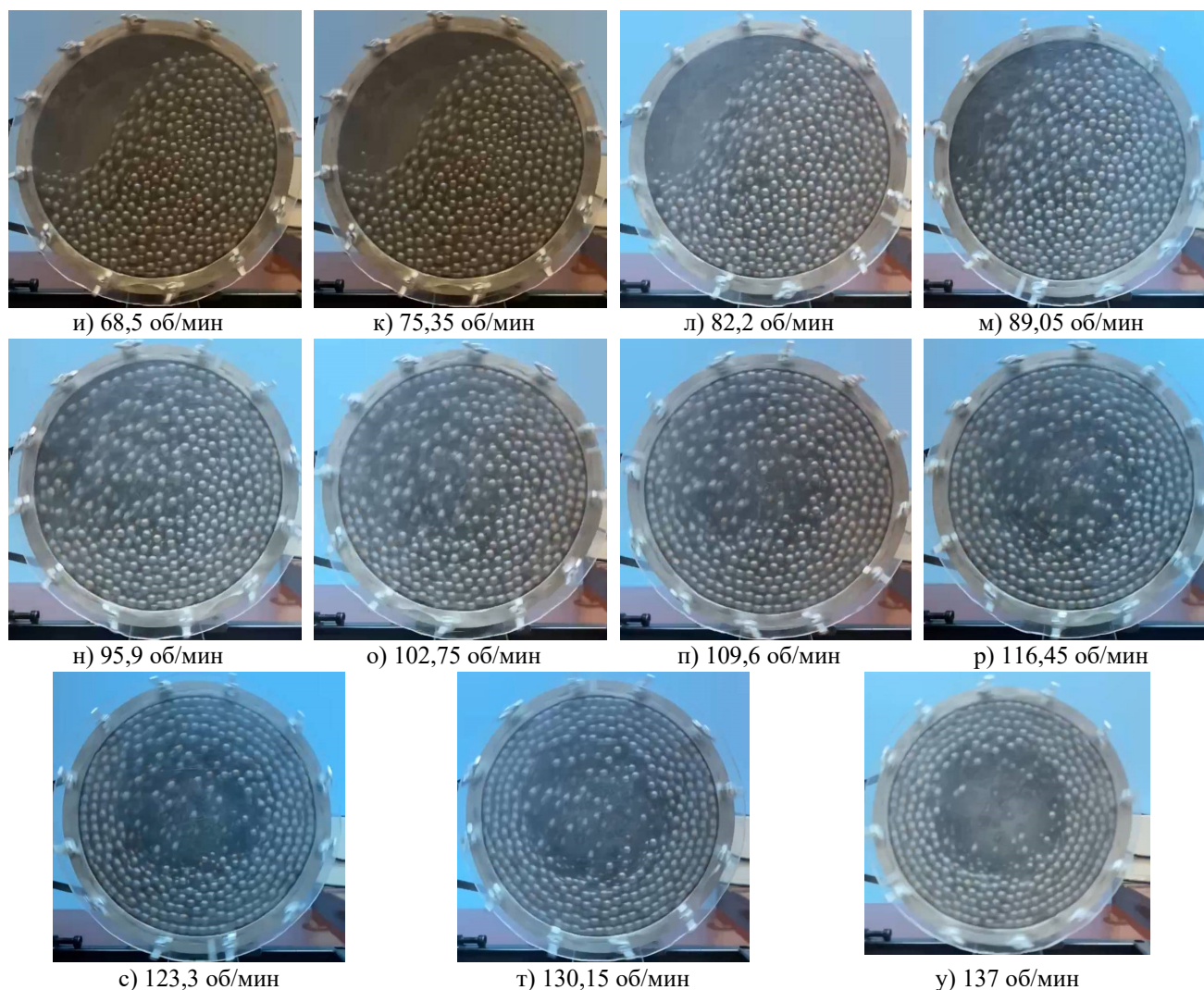


Рис. 2. Результаты, снятые с лабораторной установки

Во время экспериментального исследования было установлено, что когда частота вращения барабана находится в диапазоне от 13,7 до 61,65 об/мин, активизируется так называемый каскадный режим мельницы (рис. 2, а–з) [5]. В этом состоянии наблюдается перераспределение массы внутри барабана к его стенкам из-за наклона внутренней поверхности загрузки. Этот наклон превосходит естественный угол ската шаров, заставляя их катиться друг по другу. Движение шаров происходит медленно, что влияет на низкий уровень их кинетической энергии. Причем распределение шаров происходит таким образом, что шары наименьшим диаметром скапливаются в центре барабана. Шары, расположенные в центре барабана, оказываются в условиях, когда они не способны передвигаться по его объему и, следовательно, не могут набрать достаточно энергии для эффективного измельчения материала. В таком режиме измельчение происходит за счет легких ударов и трения, при этом движение шаров не способствует интенсивной переработке материалов.

В процессе работы мельницы при частоте вращения барабана от 68,5 до 82,2 об/мин нам открывается явление, которое можно описать как формирование режима, напоминающего водопад (рис. 2, и–л). С увеличением частоты вращения барабана от 89,05 до 102,75 об/мин можем наблюдать четко образующийся водопадный режим работы мельницы (рис. 2, м–о). Это происходит благодаря росту угловой скорости вращения барабана, способствующему усилению центробежных сил инерции. В результате этого шары внутри мельницы разделяются, набирая при этом значительные объемы энергии. В таком состоянии шары следуют траектории параболы, что приводит к усилению работы устройства через мощные удары, происходящие при их падении.

На рисунке 2 (п–с) наблюдается увеличение частоты вращения барабана от 109,6 до 123,3 об/мин. В этот момент происходит сильное прилегание шариков к периметру барабана, в результате чего процесс измельчения материала становится менее интенсивным. При увеличении частоты вращения барабана от 130,15 до 137 об/мин и выше происходит достижение критических уровней угловой скорости, при которой шарики

надежно фиксируются вплотную к стенке цилиндра и совершают вращение вместе с ним. Такое состояние работы оборудования получило название режима самофутирования, где процесс обработки материала не будет происходить эффективно.

В процессе экспериментальных исследований было установлено, что каскадный режим работы шаровой мельницы наступает при частоте вращения барабана до 61,65 об/мин. Когда же частота вращения находится в пределах между 109,6 и 123,3 об/мин, активизируется режим самофутирования. Выявлено, что наиболее эффективный режим работы шаровой мельницы – это водопадный, который достигается при частоте вращения барабана между 68,5 и 102,75 об/мин.

Список использованных источников:

1. Аввакумов Е.Г. Механические методы активации в переработке природного и техногенного сырья / Е.Г. Аввакумов, А.А. Гусев. – Новосибирск : Гео, 2009. – 153 с.
2. Кузьмич Ю.В. Механическое легирование / Ю.В. Кузьмич, И.Г. Колесникова, Б.М. Фрейдин, В.И. Серба ; [отв. ред. Е. Г. Полякова]. – М. : Наука, 2005. – 213 с.
3. Optimizing ball milling parameters for controlling the internal microstructure and tensile characteristics of a laminated carbon nanotube/ aluminum-copper-magnesium composite [Электронный курс] / Behzad Sadeghi, Pasquale Cavaliere, Moara M. Castro // Journal of Alloys and Compounds, 2024. – Режим доступа: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925838824005140>
4. Гусева Т.С. Технология и оборудование получения композитных порошков сферической формы для селективного лазерного плавления / Т.С. Гусева, Н.А. Сапрыкина, А.А. Сапрыкин, Е.А. Ибрагимов // Инновации в машиностроении (ИнМаш – 2022) материалы докладов XIII Международной научно-практической конференции, Барнаул, 23–25 Ноября 2022. – Барнаул : АлтГТУ , 2022 . — С. 146-152
5. Дмитрак Ю.В. Движение мелющей загрузки в шаровых мельницах [Электронный курс] / Ю.В. Дмитрак. – 2021. – С. 28–34. – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/dvizhenie-melyushey-zagruzki-v-sharovykh-melnitsah/viewer>