

УДК 621.745

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ СТРУЖКИ

О. М. ВАЛИЦКАЯ, М. П. СЕЛИЦКАЯ

*Учреждение образования «Гомельский государственный
технический университет имени П. О. Сухого»,
Республика Беларусь*

Введение

Переработка (рециклинг) вторичного сырья на сегодняшний день является актуальной проблемой индустрии. На металлообрабатывающих предприятиях скапливается большое количество металлоотходов, в том числе стружки, которая является ценным вторичным сырьем при выплавке металла. В Республике Беларусь по ориентировочным данным образуется не менее 200–250 тыс. т стружки в основном черных металлов.

Стружку можно использовать в качестве шихты в плавильных печах литейных цехов. При этом требуется предварительная обработка стружки (сушка, очистка от загрязнений, брикетирование, пакетирование и т. п.). Прямое использование влажной и неочищенной от загрязнений (СОЖ, масло и др.) стружки приводит к снижению технико-экономических показателей плавки. Холодное брикетирование неочищенной стружки приводит к получению низкокачественного шихтового материала – брикетов, имеющих низкую механическую плотность $(4-5) \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ с содержанием загрязнений более 10 %. Горячее или двухстадийное брикетирование (до плотности $> 6 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$) увеличивает стоимость брикетов до 300–350 американских долларов за тонну, что выше первичного шихтового материала.

В последнее время при рециклинге полидисперсных металлоотходов, в том числе металлической стружки, начали применять ротационные наклоняемые печи (РНП) [1]. В них производится сушка неочищенной стружки с одновременным нагревом до температур испарения и выгорания примесей (750–850 °С).

В РНП создается конвективный режим теплообмена в движущемся динамическом слое дисперсного материала. Опыт показал, что при нагреве замасленной (от 1 до 10 %) стружки до $\sim 500 \text{ °С}$, масла начинают гореть, температура в печи повышается до 900–1200 °С, а температура стружки достигает 750–850 °С (красного каления).

Таким образом, высокая загрязненность стружки позволяет за счет тепла, выделяющегося при выжигании масел, существенно сократить затраты природного газа на очистку стружки: с 12–15 м³/т до 6–8 м³/т. Соответственно уменьшаются и вредные выбросы в атмосферу.

Горячую стружку целесообразно сразу загружать для переплавки в дуговые или индукционные печи. Это позволит не только улучшить экологические характеристики плавки, но и снизить расход электроэнергии на 150–160 кВт · ч на 1 т стружки, сократить время плавки и расход футеровки.

Однако при разработке конструкций РНП и технологического режима тепловой обработки возникли трудности из-за практически полного отсутствия информации по свойствам стружки.

Цель данной работы – определение и анализ технологических характеристик чугуновой и алюминиевой стружки (фракционный состав, насыпная плотность, форма

частиц, скорость уноса и др.), необходимых для разработки процесса рециклинга по любой технологической схеме: как путем традиционного брикетирования, так и россыпью (после высокотемпературного нагрева в РНП) или нагрева в РНП и последующего горячего брикетирования.

Определение технологических характеристик металлической стружки

Стружка, поставляемая партиями на переработку, представляет собой полидисперсный материал с широким диапазоном размеров и форм элементов и является в большинстве случаев смесью продуктов обработки на разных станках и при различных режимах (рис. 1а–1д, 2). Фотографии, представленные на рис. 1а–1д (левый столбец), наглядно иллюстрируют угол естественного откоса различной стружки. Фотографии, представленные на рис. 1а–1д (правый столбец) и на рис. 2, – геометрические параметры, конфигурацию отдельных элементов той или иной стружки.



Рис. 1а. Стружка алюминиевая (изогнутые пластинки)



Рис. 1б. Стружка алюминиевая (смесь витков, пластинок и их фрагментов)



Рис. 1в. Стружка алюминиевая (спирали)



Рис. 1г. Стружка алюминиевая (полоски)



Рис. 1д. Стружка алюминиевая (смесь пластинок, витков и их фрагментов)



а)

б)

в)

Рис. 2. Чугунная стружка: а – элементная «крупная»; б – элементная «мелкая»; в – стружка после термической обработки в ротационной наклоняемой печи

Фракционный состав играет важную роль при определении критических скоростей теплоносителя, подаваемого в РНП, при которых можно обеспечить, с одной стороны, интенсивное перемешивание слоя и приведение к состоянию, близкому к псевдооживленному, с другой – предотвратить унос наиболее мелких фрагментов стружки с уходящими дымовыми газами из печи. Дисперсность стружки наиболее наглядным образом можно представить в логарифмически-вероятностной шкале координат (рис. 3, 4). Распределение частиц по диаметрам определяли методом ситового анализа. Из диаграмм видно, что каждый из анализируемых образцов стружки является смесью продуктов обработки на разных видах станков и при различных режимах. Стружка имеет широкий диапазон размеров и соответственно – очень высо-

кий суммарный коэффициент полидисперсности Π , определяемый как отношение максимального диаметра частиц полидисперсного материала к минимальному:

$$\Pi = \frac{d_{\max}}{d_{\min}}$$

Для алюминиевой стружки величина коэффициента Π от 20 и более, для

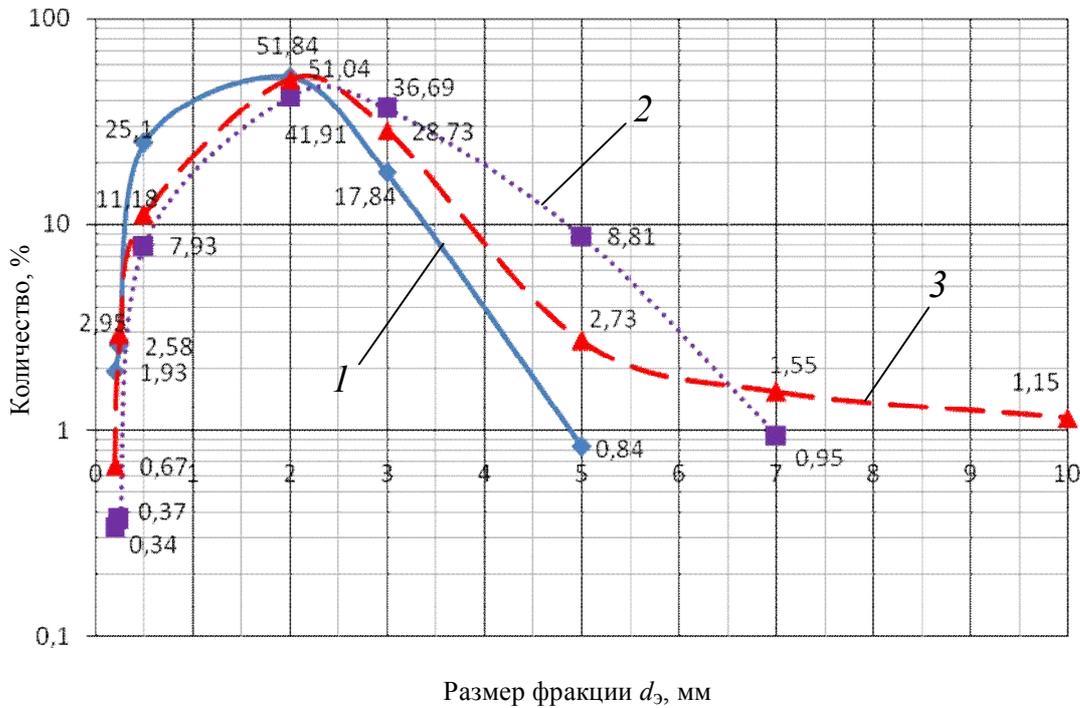


Рис. 3. Фракционный состав алюминиевой стружки. Образцы соответствуют:
1 – рис. 1а; 2 – рис. 1б; 3 – рис. 1д

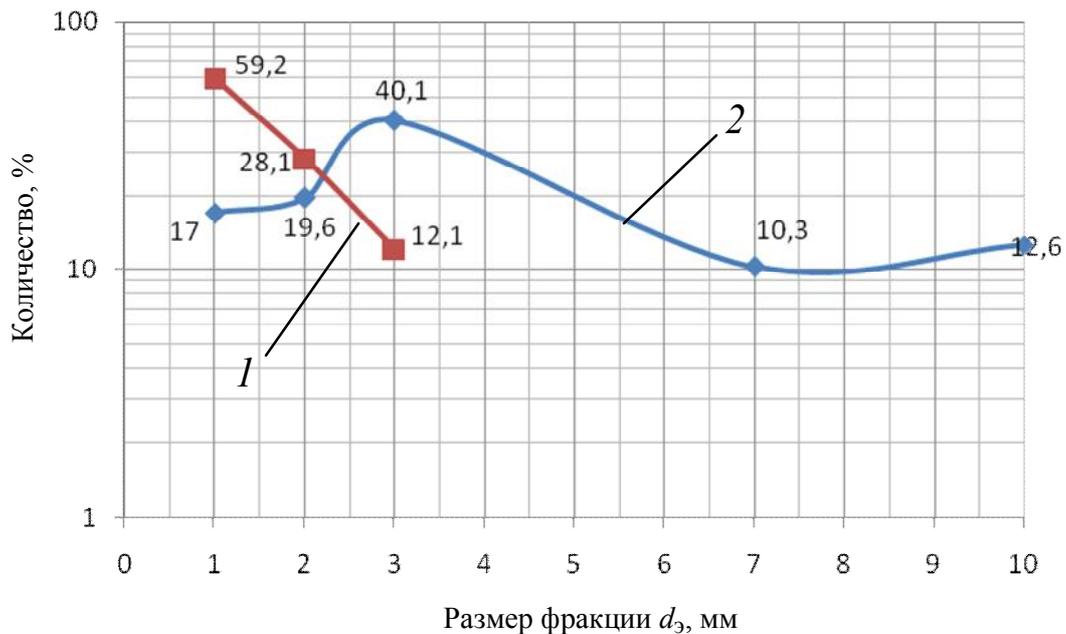


Рис. 4. Фракционный состав чугуновой стружки. Образцы соответствуют:
1 – рис. 2, а; 2 – рис. 2, б

Насыпная плотность $\rho_{\text{нас}}$. При конструировании РНП и сопутствующего оборудования (загрузочного, транспортирующего и т. д.) очень важно учитывать объем стружки, определяемый $\rho_{\text{нас}}$. Насыпная плотность стружки зависит от фракционного состава, толщины слоя, времени хранения (слеживания) на площадках, механических воздействий и других факторов. При длительном хранении слой стружки слеживается и уплотняется в 1,5–2 раза. В табл. 1 сведены полученные значения $\rho_{\text{нас}}$. Видно, что для алюминиевой стружки, собираемой с разных производственных участков, $\rho_{\text{нас}}$ изменяется в широких пределах (примерно в 2,4 раза). Насыпная плотность чугунной стружки возрастает в 2–2,5 раза после ее высокотемпературного нагрева в камере РНП. Это объясняется тем, что стружка измельчается при перемешивании в РНП, доля объема пустот между частицами в общем объеме слоя уменьшается почти на 30 %.

Угол естественного откоса α (рис. 1а–1д, левый столбец) характеризует адгезионные свойства стружки, в том числе статическое состояние сыпучего материала. Измеренные углы представлены в табл. 1. Значение этого параметра необходимо учитывать при конструировании и расчетах емкостей для хранения стружки, устройств для разгрузки стружки и т. п. Для алюминиевой стружки значение угла естественного откоса находится в пределах $43 \div 45^\circ$. Значение угла α для чугунной стружки возрастает после обработки в РНП (с 35 до 43°). Угол откоса чугунной стружки во вращающейся камере печи (10 об/мин) составляет примерно $45\text{--}47^\circ$ (рис. 8, а). В результате слой стружки при вращении смещается от центра примерно на половину радиуса печи, что увеличивает момент сопротивления и соответственно – нагрузку на привод печи. При остановке печи возникает обратный крутящий момент, что необходимо учитывать при выборе привода.

Порозность ε – показатель, который определяет количественные и качественные изменения в механизмах движения потоков и теплопереноса во взвешенном слое, рассчитывается по формуле

$$\varepsilon = 1 - \frac{V_{\text{м}}}{V}, \quad (1)$$

где V – объем системы; $V_{\text{м}}$ – объем твердых частиц в системе.

Значение порозности, определенной для стружки в статическом состоянии (табл. 1), позволяет дать предварительную оценку качества ее перемешивания во вращающейся камере печи. Известно, что полидисперсный материал с порозностью слоя не менее $\varepsilon = 0,970$ способен переходить в состояние газозвеси при гравитационном падении [2]. К этому значению близка порозность алюминиевой стружки, представленной на рис. 1а. Объем пустот между частицами в общем объеме слоя здесь составляет около 93–94 %. Для интенсивного нагрева такого слоя достаточно направить поток газов через слой снизу вверх без вращения печи.

Характеристики стружки

Материал	Номер группы	Форма частиц	Насыпная плотность $\rho, \rho^*, \text{кг/м}^3$	Порозность ϵ	Угол естественного откоса α°	Характер образования
алюминий, $\rho = 2800 \text{ кг/м}^3$	1	Изогнутые пластинки (рис. 1а)	175	0,93	43	Фрезерование Строгание
	2	Смесь витков, пластинок и их фрагментов (рис. 1б)	193	0,93	44	Сверление
	3	Спирали (рис. 1в)	278	0,89	45	Токарные операции
	4	Полоски (рис. 1г)	385	0,85	43	Сверление Фрезерование
	5	Смесь пластинок, витков и их фрагментов (рис. 1д)	413	0,84	44	Комплекс металло-режущих станков
чугун, $\rho = 7200 \text{ кг/м}^3$	1	Элементная «крупная» (рис. 2, а)	1000–1300 1800*	0,86–0,82	34	Все виды металло-режущих станков
	2	Элементная «мелкая» (рис. 2, б)	1500–1600 2000*	0,79–0,77	36	То же
	3	Стружка после термической обработки в РНП (рис. 2, в)	2300–2500 2500–2800	0,68–0,65 0,65–0,61	43	"_"

*После длительного хранения на открытых площадках.

Эквивалентный диаметр частиц

Выбор того или иного среднего диаметра определяется постановкой задачи (например, при расчете поверхности тепло- или массообмена лучше пользоваться определениями среднеквадратичного диаметра и среднегармонического диаметра, а при учете массовых сил – определением среднего диаметра по массе), при получении эмпирических зависимостей способ осреднения частиц должен оговариваться [3].

Так как металлическая стружка имеет высокий коэффициент полидисперсности (см. выше), то приводить размеры частиц стружки к единому эквивалентному диаметру не целесообразно. Желательно слой стружки, в соответствии с фракционным составом, условно разделить по размерам на группы: наиболее мелкие, крупные и средние (с $\Pi = 1,5 \div 2$) и в каждой определить соответствующий эквивалентный диаметр частиц d_s .

Эквивалентный диаметр d_3 и форма частиц стружки f – показатели, которые необходимо учитывать при определении скоростей витания и уноса частиц.

Для учета отличия формы частицы от сферической используется коэффициент формы f :

$$f = (d_F/d_V)^2, \tag{2}$$

где d_F, d_V – диаметры шаров, эквивалентные частице, соответственно по поверхности и по объему.

На рис. 5 представлены результаты измерений f в зависимости от среднего по массе d_3 .

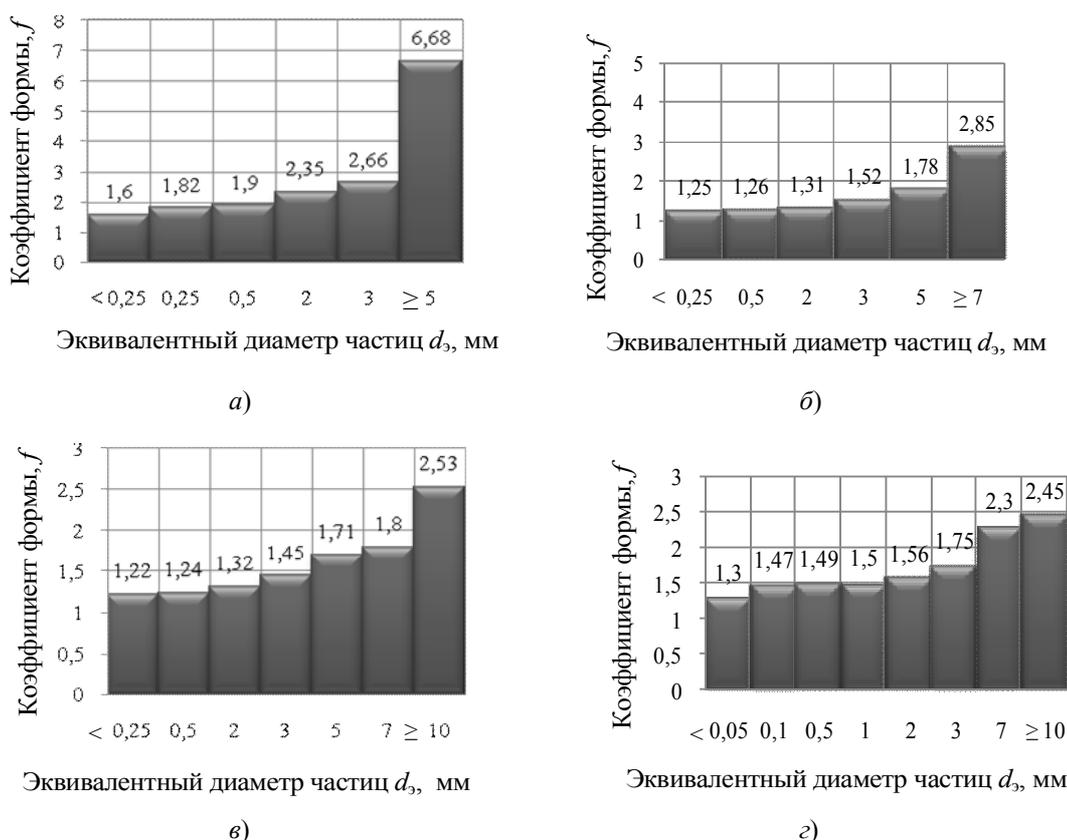


Рис. 5. Среднее значение коэффициента f : а – алюминиевая стружка группы № 1; б – алюминиевая стружка группы № 2; в – алюминиевая стружка группы № 5; г – чугунная стружка группы № 3 (номера групп стружки в соответствии с табл. 1)

Скорость уноса частиц

На рис. 6, 7 представлены графики скоростей уноса частиц стружки дымовыми газами $\omega_{унос}$ в зависимости от размера фрагментов d_3 , с учетом их формы f , при различных температурах газов. Такие графики можно построить для любой стружки и руководствоваться ими при определении критического значения скорости теплоносителя, препятствующей уносу частиц определенного размера из печи.

Скорость теплового потока, при которой начинается массовый унос частиц данного размера, формы, плотности, определяли по формуле [4]:

$$\omega_{унос} = \frac{\mu_c}{d_{cp} \cdot \rho_c} \cdot \frac{Ar}{18 + 0,575 \cdot \sqrt{Ar}}, \tag{3}$$

где μ_c – вязкость сушильного агента при средней температуре; $d_{cp} = d_3/f$ – средний размер частиц стружки, с учетом формы частиц; ρ_c – плотность сушильного агента при средней температуре; $Ar = \frac{d_{cp}^3 \cdot \rho_{ст} \cdot \rho_c \cdot g}{\mu_c^2}$ – критерий Архимеда; $\rho_{ст}$ – плотность частиц высушиваемого материала.

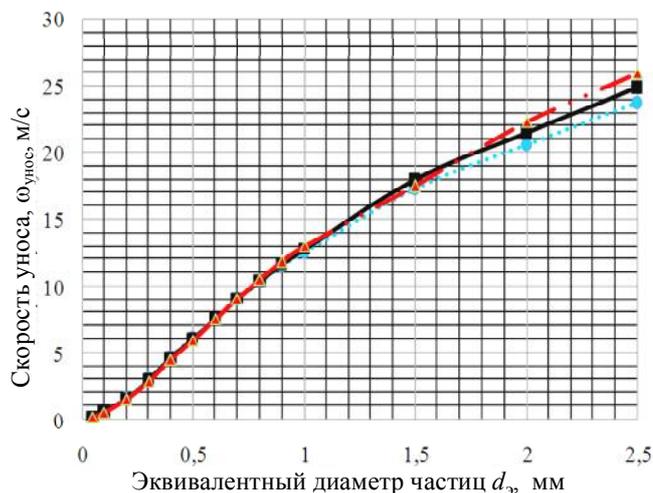


Рис. 6. Скорость уноса частиц чугунной стружки группы № 3 (в соответствии с табл. 1):

● — $t = 500$ °C; ■ — $t = 600$ °C; ▲ — $t = 700$ °C

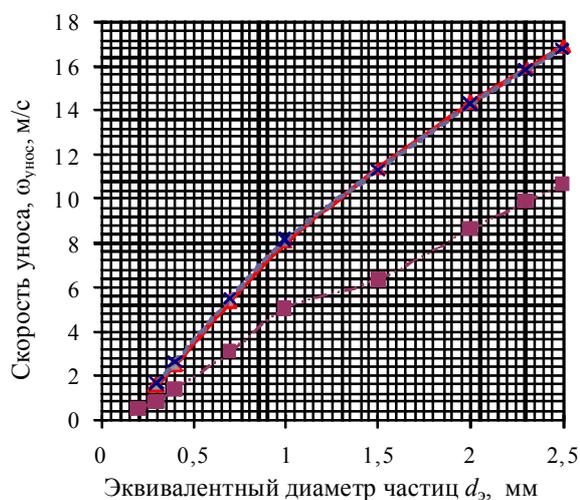


Рис. 7. Скорость уноса частиц алюминиевой стружки групп № 1, 2, 5 (в соответствии с табл. 1): ■ — группа № 1; ▲ — группа № 2; ✕ — группа № 5

Поведение стружки в камере ротационной наклоняемой печи

Слой стружки, не разрушаясь, поднимается во вращающейся футерованной камере РНП на определенную высоту (рис. 8, а), после чего при дальнейшем повороте камеры приходит в движение: частицы верхних слоев стружки отрываются и падают вниз в виде комков и (или) несвязанных частиц; часть слоя отрывается от поверхности камеры, разрушается и падает вниз; нижняя поверхность слоя (контактирующая с поверхностью камеры) может соскальзывать вниз, преодолевая силу трения. Процесс повторяется с каждым новым оборотом камеры, что приводит к перемешиванию и теплообмену внутри слоя. Чем выше поднимается слой и лучше перемешивается, тем эффективнее теплообмен в массе стружки. Качество перемешивания стружки внутри камеры в

значительной степени зависит от соотношения аутогезии $F_{аут}$ – связи между частицами, адгезии $F_{ад}$ – связи между частицами и поверхностью камеры и сдвигающей силы между сыпучим материалом и футерованной поверхностью камеры $F_{сдв}$.

При условии:

а) $F_{аут} < F_{ад} < F_{сдв}$ – сыпучий материал хорошо перемешивается;

б) $F_{аут} > F_{ад} > F_{сдв}$ – перемешивания не происходит.

В ходе промышленных испытаний РНП были определены: предельный угол поворота камеры γ , соответствующий максимальному подъему слоя материала без его разрушения (табл. 2); характер перемешивания различной стружки.

Таблица 2

Предельное значение угла поворота камеры γ

Показатель	Алюминиевая стружка			Чугунная стружка
	Группа № 1	Группа № 2	Группа № 5	Все группы
γ	65°	52°	70°	85°

Алюминиевая стружка 1,5 групп при повороте камеры поднимается на достаточно большую высоту и в дальнейшем происходит ее хорошее перемешивание, стружка остальных групп склонна к комкованию; наблюдается проскальзывание слоя по поверхности камеры без перемешивания. Соотношение сил $F_{аут}$, $F_{ад}$, $F_{сдв}$ близко к условию $F_{аут} > F_{ад} > F_{сдв}$. Поэтому требуется предварительная подготовка стружки для улучшения процесса перемешивания. Это достигается различными методами: механическим разрушением фрагментов стружки на более мелкие элементы, формированием гранул и др., изменяющими соотношение адгезии, аутогезии в слое. Чугунная стружка всех групп хорошо перемешивается и не требует предварительной подготовки.

Практически любая необработанная стружка имеет невысокую сыпучесть, и требуется интенсификация процесса ее перемещения (операции загрузки, разгрузки печи и др.). В процессе нагрева сыпучесть стружки может изменяться. Например, при нагреве чугунной стружки в статическом состоянии до 500 °С в камерной печи происходит сваривание частиц по границам контакта, масса стружки образует пористый ком, который нужно «выбивать» из печи [5]. При нагреве такой же стружки в РНП в динамическом состоянии до 500–700 °С и выше сыпучесть стружки резко возрастает. Видно, что после остановки камеры, стружка образует горизонтальную поверхность (рис. 8, б) (в этих условиях резко уменьшается связь (аутогезия) между частицами в слое), выгружаемая из ротационной печи горячая стружка буквально «течет» (рис. 8, в). При выгрузке горячей, обработанной стружки в емкости, очень важно обеспечить их герметичность.

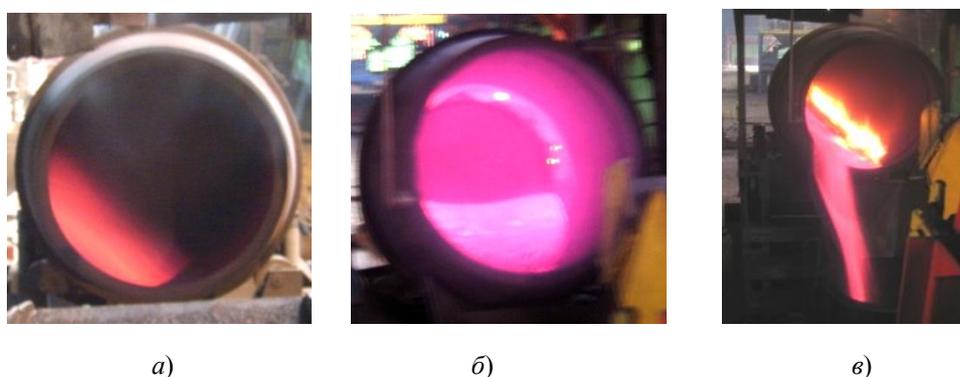


Рис. 8. Чугунная стружка в камере ротационной наклоняемой печи. Скорость вращения камеры: а – $n = 10$ об/мин; б – $n = 0$ об/мин; в – $n = 10$ об/мин

Анализируя полученные характеристики стружки, можно сделать следующие выводы.

Чугунная и алюминиевая стружки с несложной формой витков (группы № 1, 2, 5) хорошо перемешиваются и не требуют предварительной подготовки перед обработкой в РНП. Для улучшения перемешивания стружки других групп можно рекомендовать различные приемы подготовки, например: механическое разрушение на более мелкие элементы, формирование гранул из фрагментов стружки пластическим деформированием и т. д.

Возрастание температуры в печи от 500 до 700 °С незначительно влияет на изменение скорости уноса частиц (около 5 %).

Коэффициент формы частиц стружки изменяется в зависимости от ее вида и размеров в широком диапазоне: для чугунной стружки – от 1,3 до 2,45; для алюминиевой – от 1,22 до 6,68.

Характеристики чугунной стружки в процессе нагрева изменяются, в частности, при нагреве в РНП уменьшаются размеры частиц, повышается сыпучесть, увеличивается насыпная плотность и др. Эти изменения необходимо принимать во внимание при проектировании емкостей для приема и транспортирования обработанной стружки.

Заключение

Определены технологические характеристики металлической стружки, необходимые для разработки процессов рециклинга. В частности, были установлены для различных видов алюминиевой и чугунной стружки: фракционный состав, насыпная плотность, угол естественного откоса. Определены: порозность, суммарный коэффициент полидисперсности, значения коэффициентов формы различных элементов стружки и др. Получены значения скоростей уноса для частиц различных размеров и форм при различных температурах теплового потока. Проанализированы изменения свойств чугунной стружки в процессе нагрева в РНП.

Полученные результаты использовались при разработке проектной документации и конструкций РНП для термической обработки алюминиевой стружки (г. Мозырь) и чугунной стружки на заводе «Центролит» (г. Гомель).

Литература

1. Ровин, С. Л. Рециклинг металлоотходов / С. Л. Ровин, Л. Е. Ровин, В. А. Жаранов // *Литье и металлургия*. – 2008. – № 3. – С. 153–157.
2. Горбис, З. Р. Теплообмен дисперсных сквозных потоков / З. Р. Горбис. – Москва–Ленинград : Энергия, 1974. – 246 с.
3. Расчеты аппаратов кипящего слоя : справочник / под. ред. И. П. Мухленова, Б. С. Сажина, В. Ф. Фролова. – Ленинград : Химия, 1986. – 352 с.
4. Касаткин, А. Г. Основные процессы и аппараты химической технологии / А. Г. Касаткин. – Москва : Химия, 1973. – 340 с.
5. Чугунная стружка как шихтовой материал / С. Л. Ровин [и др.] // *Литье и металлургия*. – 2008. – № 3. – С. 158–161.

Получено 15.06.2009 г.