



*Physico-mechanical characteristics of metal processing sludge of different productions are studied. It is shown that the value of sludge real density depends on abrasive content.*

О. М. ДЬЯКОНОВ, БНТУ

УДК 669.054.8

## ШЛАМЫ МЕТАЛЛООБРАБАТЫВАЮЩЕГО ПРОИЗВОДСТВА. ЧАСТЬ 2. ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

Физико-механические свойства шламов изучали на наиболее крупнотоннажных шлифовальных, обкатных, опилочных и заточных шламах инструментальных, подшипниковых и машиностроительных заводов. Все исследованные шламы представляли собой вязкую пастообразную массу металлического цвета со свойствами, определяемыми пред историей их образования.

**Плотность шламов.** Истинную плотность (плотность материала) порошков шламов определяли волюмометрическим методом. Для этого использовали пикнометры. В качестве волюмометрической жидкости брали керосин осветительный. Подготовку шламов к исследованиям осуществляли по методике, описанной в [1]. Навеску вещества вносили в пикнометр, который предварительно взвешивали на аналитических весах. Взвешивание пикнометра проводили с твердым веществом, после чего в него постепенно добавляли керосин. Пикнометр заполняли на 2/3 объема жидкостью, выдерживали на водяной бане 1–2 ч при температуре 60–65 °С для удаления из порошка пузырьков воздуха. После заполнения пикнометра до метки взвешивали пикнометр на аналитических весах со всем содержимым. Величину истинной плотности рассчитывали по формуле:

$$d = md / (p^0 + m - p^0 n),$$

где  $d$  – удельный вес керосина;  $m$  – навеска;  $p^0$  – масса пикнометра с жидкостью;  $p^0 n$  – масса пикнометра с жидкостью и испытываемым образцом.

Насыпную плотность шламов оценивали из определения массы известного объема согласно ГОСТ 19440-74. Результаты проведенных исследований для шлифовальных шламов быстрорежущих сталей различных заводов свидетельствуют о том, что истинная плотность шламов разных производств значительно отличается по величине

(табл. 1). Так, наибольшую плотность имеет шлам ВИЗ, а наименьшую – МИЗ.

Т а б л и ц а 1. Плотность порошков шлифовальных шламов быстрорежущих сталей

Тип шлама	Истинная плотность, кг/м <sup>3</sup>	Насыпная плотность, кг/м <sup>3</sup>
Шлам стали Р6М5 МИЗ	4600–5300	1300–1500
Шлам стали Р6М5 ВИЗ	5600–6740	1900–2100
Шлам стали Р6М5 СИЗ	5150–6480	1800–2000
Шлам БС МИЗ	3710–4120	1310–1450

Аналогичный характер носит и изменение величины насыпной плотности изученных шламов. Подобный характер изменения анализируемых величин обусловлен, по-видимому, несколькими факторами, главными из которых являются распределение частиц металла и абразива по размерам и соотношение между ними в шламе. Наглядным подтверждением этому служат результаты определения насыпной плотности предварительно фракционированных шламов ВИЗ и МИЗ (табл. 2).

Т а б л и ц а 2. Зависимость насыпной плотности шламов от их фракционного состава

Тип шлама	Фракционный состав, мкм	Насыпная плотность, кг/м <sup>3</sup>
Шлам ВИЗ	–100	1970
	–200 + 100	1720
	–250 + 200	1640
Шлам МИЗ	–100	1480
	–200 + 100	1270
	–315 + 200	1190

Из шламов подшипниковой стали ШХ15 наибольшую насыпную плотность имеют обкатной и опилочный шламы, а наименьшую – шлам, взятый непосредственно от станка после мокрой магнитной сепарации, когда сепарируются в основном крупнодисперсные фракции (табл. 3). Та-

кую же низкую плотность имеет шлам после твердой шлифовки шариков в дизельном топливе, однако в отличие от шламов с водно-эмульсионной СОЖ здесь преобладают тонкодисперсные частицы (содержание фракции 0,1 мм составляет 56%). Такой характер поведения этих шламов можно объяснить образованием в процессе шлифования на поверхности металлических частиц стабилизирующей пленки из молекул арахида, препятствующей слипанию частиц шлама.

Таблица 3. Истинная и насыпная плотность шламов подшипниковой стали ШХ15

Вид шлама	Истинная плотность, кг/м <sup>3</sup>	Насыпная плотность, кг/м <sup>3</sup>
Обкатной	6700–6900	1900–2100
Опиловочный	6800–7000	1220–1260
Шлам твердой шлифовки	5800–6500	410–480
Шлам от станка	5500–5900	360–390
Шлам после магнитной сепарации СОЖ	5100–5600	630–670
Шлам из отстойника	4700–5900	710–750

Как видно из таблицы, величина истинной плотности шлама зависит от содержания абразива в шламе. Опиловочные и обкатные шламы, в которых отсутствует абразив, имеют максимальную истинную плотность, которая близка к плотности исходного металла. У шлифовального шлама из отстойника с самым высоким содержанием абразива величина истинной плотности минимальна.

Выявленные закономерности изменения насыпной и истинной плотностей для шламов подшипниковой стали сохраняются и для шламов шлифовальных производств машиностроительных заводов (табл. 4).

Таблица 4. Истинная и насыпная плотность шламов шлифовальных производств МТЗ

Тип шлама	Истинная плотность, кг/м <sup>3</sup>	Насыпная плотность, кг/м <sup>3</sup>
Шлам стали 25ХГТ	6600–6500	1000–1100
Шлам стали 45	5800–6200	900–1200
Шлам стали 65	6600–6800	900–1200
Шлам стали 40Х	6500–6700	1600–1800
Шлам стали 5ХНМ	6700–6900	1600–1800
Шлам стали 65Г	5600–6000	1100–1300
Шлам чугуна СЧ-20	6100–6300	1200–1400

Таблица 5. Порозность шламов различных производств

Вид шлама	Порозность	Вид шлама	Порозность
Обкатной шлам стали ШХ15	0,7	Шлифовальный шлам стали 25ХГТ	0,84
Опиловочный шлам стали ШХ15	0,8	Шлифовальный шлам стали 45	0,82
Шлам стали ШХ15 после твердой шлифовки шариков на дизтопливе	0,92	Шлифовальный шлам стали 65	0,86
Шлам стали ШХ15 от шлифовального станка	0,93	Шлифовальный шлам стали 40Х	0,74
Шлифовальный шлам стали ШХ15 после магнитной сепарации	0,88	Шлифовальный шлам стали 5ХНМ	0,74
Шлифовальный шлам стали ШХ15 из отстойника	0,86	Шлифовальный шлам стали 65Г	0,79
Шлифовальный шлам чугуна СЧ20	0,79		

**Порозность и пористость шламов.** Соотношение между объемами пустот и твердых частиц порошкообразного вещества принято характеризовать порозностью [2]. Порозность представляет собой долю объема системы, приходящуюся на свободный объем между частицами вещества. Она естественно связана с насыпной плотностью. Порозность может быть рассчитана по расходу жидкости, удерживаемой определенным объемом слоя, или по насыпной плотности и массе единицы объема твердой фазы:

$$E = 1 - \rho_n / \rho,$$

где  $\rho_n$  – насыпная плотность;  $\rho$  – плотность твердой фазы.

Порозность влияет на удержание жидких компонентов в межчастичном пространстве шлама и вследствие этого служит одной из важнейших физических характеристик шламов. В табл. 5 приведены значения величины порозности изучаемых порошков шламов, вычисленные по величине плотности. Порозность является функцией размеров частиц шлама: чем больше размер частиц и меньше разница в величине частиц, тем выше порозность порошка. И, наоборот, с увеличением разницы между крупными и мелкими частицами порозность шлама уменьшается вследствие того, что мелкие частицы располагаются в пустотах между более крупными частицами.

По-своему близко к понятию порозность и другое понятие, то же характеризующее долю пустот в системе, – пористость. Но это понятие в основном принято для характеристики систем с ориентированным расположением частиц, создающим капиллярно-пористую структуру [3]. Такую структуру имеют спрессованные под большим давлением и спеченные материалы, особенно в присутствии добавок, выделяющих при разложении газообразные продукты. В случае капиллярно-пористых тел удержание жидких компонентов происходит в основном за счет сил поверхностного натяжения и эффекта смачивания [4]. Создание капиллярной пористости для высокодисперсных порошков шламов возможно при длительном их



Рис. 1. Форма металлических частиц отходов шлифования стали Р6М5

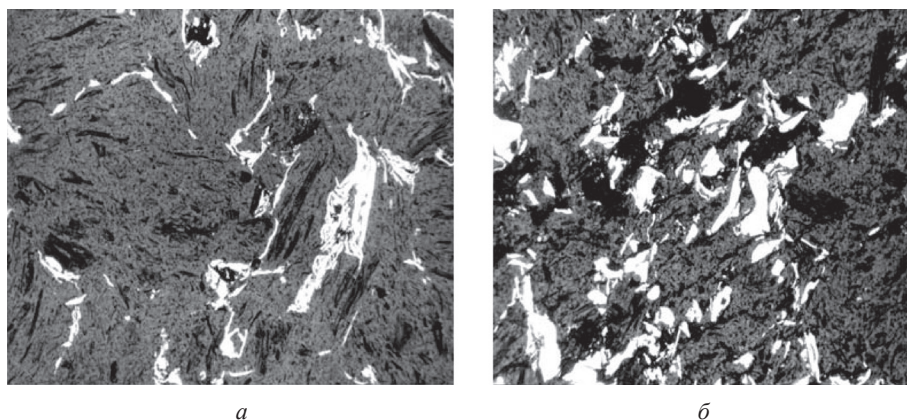


Рис. 2. Форма металлических частиц после операций опиловки (а) и обкатки (б) шариков стали ШХ15

хранении без перемешивания за счет образования каналов-капилляров вследствие интенсивного выделения газообразных продуктов разложения.

**Форма и размеры твердых частиц шламов.**

Форма и размеры металлических и абразивных частиц шламов зависят от вида обработки, материала инструмента и обрабатываемой заготовки, применяемой СОЖ и режима резания.

Результаты металлографического анализа шлифовального шлама быстрорежущей стали Р6М5 показали, что металлические частицы имеют разнообразную форму: тонкую вьюнообразную изогнутую (рис. 1, а, б) и осколочную различных размеров (рис. 1, в). Частицы вьюнообразной стружки имеют ярко выраженный зубчатый рельеф, осколочные – сглаженную поверхность. Толщина вытянутой вьюнообразной стружки изменяется от 6,5 до 19,5 мкм, осколочных частиц – от 25 до 81 мкм. Наблюдаются также частицы (около 5%) с большим отношением длины к ширине (5:1). Причем 75% площади шлифа составляют частицы площадью от 1500 до 2000 мкм<sup>2</sup>.

Металлические частицы шлама стали ШХ15 после опиловки шариков стальными дисками (рис. 2) также имеют вытянутую форму с зубчатым рельефом. Длина их изменяется от 50–60 до 600–700 мкм, а ширина – от 3 до 25 мкм. После обкатки шариков чугунами дисками форма частиц осколочная со сглаженным рельефом. Размеры частиц гораздо меньше опиловочных. У частиц по-

рошка шлама после твердой шлифовки шариков форма осколочная, а размеры их минимальные из всех шламов этой стали (50–100 мкм).

У стальных шламов шлифовальных производств МТЗ преобладает вытянутая форма металлических частиц с зубчатым рельефом, а у чугунных – подобная без зазубрин.

Форма абразивных частиц, представляющих собой обломки зерен электрокорунда, преимущественно осколочная. Размеры этих частиц колеблются в пределах 100–700 мкм.

**Степень дисперсности порошков шламов.**

Для определения дисперсности порошков применяли микроскопический и седиментационный методы, а также ситовой анализ [5]. Для анализа брали 100 г порошка и просеивали на анализаторе МТС-1, после этого определяли остаток на ситах. Просеивание одного и того же материала повторяли не менее 3 раз. Средний диаметр частиц рассчитывали по формуле

$$d_{cp} = \sum \psi \sum \frac{\psi}{d},$$

где  $\psi$  – масса отдельной фракции;  $\sum \psi = 100$ ;  $d$  – диаметр частиц фракции.

Для исключения агрегации частиц одновременно проводили мокрый рассев шламов. Для шламов МИЗ и СИЗ в качестве жидкой фазы использовали воду, для шлама ВИЗ – дизельное топливо. Набор сит со шламом на верхнем сите по-



мещали в закрытую емкость с дизельным топливом или водой и помещали на 10 мин в анализатор. Отсеянные на ситах фракции собирали, высушивали и взвешивали. Результаты проведенных исследований представлены на рис. 3. Как видно из приведенных данных, для шламов инструментального производства разброс размеров частиц порошков наблюдается от 50 до 400 мкм с преобладанием фракций 80–260 мкм.

Шламы на масляных СОЖ более тонкодисперсны, чем шламы, получаемые при использовании водных СОЖ. Сопоставление результатов сухого и мокрого методов рассева свидетельствует о частичной агломерации сухих шламов, обусловленной склеивающими свойствами поверхностного слоя частиц (табл. 6).

Таблица 6. Размеры частиц обкатных шламов инструментальной стали

Тип шлама	Средний диаметр частиц, мм	
	по сухому рассеву	по мокрому рассеву
Шлам СИЗ	0,234	0,178
Шлам МИЗ	0,155	0,137
Шлам ВИЗ	0,155	0,106
Шлам БС МИЗ	0,218	0,161

Поскольку распределение частиц шлама по размерам в известной мере подобно гауссовскому [6], для его описания можно воспользоваться уравнением Розина-Раммлера:

$$m_d = 100 \exp(-d / d_{ст})^\gamma,$$

где  $d_{ст}$  – среднестатистический размер частиц;  $\gamma$  – коэффициент, характеризующий степень однородности распределения частиц по размерам, который находится после двукратного логарифмирования данного уравнения, приводящего к линейной зависимости вида:

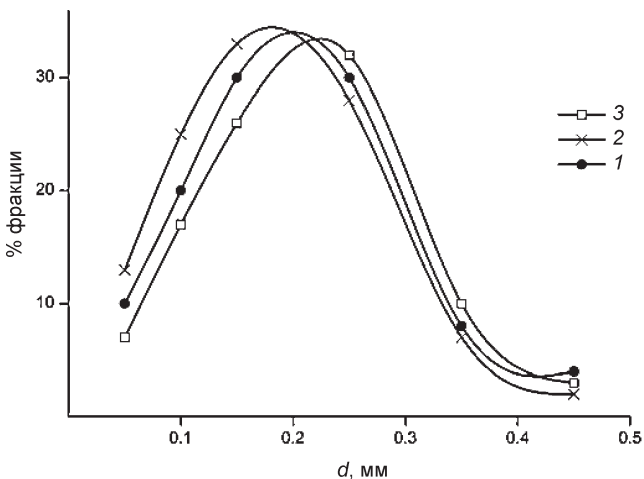


Рис. 3. Фракционный состав шламов различных производств: 1 – обкатной шлам МИЗ; 2 – шлам ВИЗ; 3 – обкатной шлам СИЗ

$$\lg \lg (100 / m_d) = - \lg 2,303 + \gamma \lg d - \gamma \lg d_{ст}.$$

Расчет показателя  $\gamma$  позволяет сопоставить шламы по распределению по размерам.

Как видно табл. 6, шлам ВИЗ характеризуется более высокой монодисперсностью ( $\gamma = 5,2$ ), чем другие шламы. В то же время шламы СИЗ и БС МИЗ можно отнести к системе, в которой основные размеры представлены в более-менее равной степени ( $\gamma = 2,6$  при идеале  $\gamma = 1,5$ ). Шламы МИЗ занимают промежуточное положение.

Порошки шламов подшипниковой стали более грубодисперсны с малой степенью монодисперсности за исключением шламов твердой шлифовки и после магнитной сепарации от станка. В сухом виде они менее сегрегированы, чем шламы инструментальных сталей (табл. 7). Еще большее преобладание грубодисперсных фракций установлено у порошков шламов шлифовальных производств МТЗ. Здесь 85–95% всех фракций приходится на размеры 0,16–0,40 мм. Крупнодисперсные шламы низколегированы и монодисперсны (табл. 7).

**Поверхность частиц шламов.** Для характеристики частиц обычно пользуются значением удельной поверхности. Под удельной поверхностью понимается площадь поверхности, которая приходится на 1 г вещества. Что касается состояния поверхности, ее оценка дается на основании данных, полученных разными способами. Судить о величине поверхности частиц можно по микро- и макрофотографиям, полученным с помощью оптических и электронных микроскопов, по виду электронограмм и т. д. Существенное значение среди них имеет адсорбционный метод.

Общую поверхность твердых частиц делят на внутреннюю и внешнюю [7]. Деление связано с наличием на поверхности различных дефектов. Благодаря им часть поверхности оказывается в объеме частицы, например в узких щелях или порах. Эту часть называют внутренней поверхностью. Деление на внутреннюю и внешнюю поверхность в известной мере условно. Соотношение между ними может быть различным. В тонкодисперсных металлических порошках преобладает внешняя поверхность.

Величину удельной поверхности частиц шламов определяли по низкотемпературной адсорбции азота в объемной установке [6, 7]. Площадь поперечного сечения молекулы азота принималась равной  $16 \text{ \AA}^2$ . Результаты исследований приведены в табл. 8, 9.

Из табл. 8 видно, что все шламы имеют малую удельную поверхность (меньше  $1,3 \text{ м}^2/\text{г}$ ). Наи-

Т а б л и ц а 7. Средний диаметр частиц шламов подшипниковой стали ШХ15 и шлифовальных производств МТЗ

Тип шлама	Средний диаметр частиц, мм		
	по сухому рассеvu	по мокрому рассеvu	g
<i>Шламы подшипниковой стали ШХ15</i>			
Обкатной	0,083	0,078	2,6
Опиловочный	0,083	0,078	2,6
Шлам твердой шлифовки	0,071	0,067	4,9
Шлам от станка	0,400	0,390	5,4
Шлам после линейной сепарации СОЖ	0,196	0,181	2,1
Шлам из отстойника	0,250	0,240	1,8
<i>Шламы шлифовальных производств МТЗ</i>			
Шлам стали 25 ХГТ	0,250	0,240	2,0
Шлам стали 45	0,370	0,351	5,6
Шлам стали 65	0,270	0,265	2,1
Шлам стали 40Х	0,200	0,182	2,4
Шлам стали 5ХНМ	0,300	0,288	4,9
Шлам стали 65Г	0,300	0,290	5,1
Шлам чугуна СЧ-20	0,300	0,270	5,3

Т а б л и ц а 8. Удельная поверхность шламов инструментального производства различных предприятий

Тип шлама	Удельная поверхность, м <sup>2</sup> /г
Шлам МИЗ	1,1
Шлам ВИЗ	1,3
Шлам СИЗ	0,6
Шлам БС МИЗ	0,8

большей поверхностью обладают шламы ВИЗ и МИЗ, а наименьшей – шлам СИЗ. Эти результаты хорошо согласуются с данными гранулометрического анализа – шламы ВИЗ и МИЗ обладают наименьшими средними размерами частиц, что характеризует величину их удельной поверхности. Для шламов подшипниковых сталей и шлифовальных производств МТЗ наблюдается обратная корреляция величин удельной поверхности и насыпной плотности (табл. 9). Так, шламы после твердой шлифовки шариков и от станка обладают наибольшей удельной поверхностью и наименьшей насыпной плотностью. Шламы шлифовальных производств имеют примерно одинаково низкую удельную поверхность, обусловленную моно-

дисперсным характером распределения частиц по размерам и неразвитостью их поверхности.

Таким образом, изучены физико-механические свойства шламов металлообработки различных производств. Показано, что величина истинной плотности шлама зависит от содержания абразива. Все шламы имеют малую удельную поверхность. Для шлифовальных шламов наблюдается обратная корреляция величин удельной поверхности и насыпной плотности. Так, шламы с наибольшей удельной поверхностью обладают наименьшей насыпной плотностью. Шламы шлифовальных производств имеют примерно одинаково низкую удельную поверхность, обусловленную монодисперсным характером распределения частиц по размерам и неразвитостью их поверхности. Порошки шламов подшипниковой стали более грубодисперсны с малой степенью монодисперсности. В сухом виде они менее сегрегированы, чем шламы инструментальных сталей. Еще большее преобладание грубодисперсных фракций установлено у порошков шламов шлифовальных производств машиностроительных заводов. Крупнодисперсные шламы низколегированы и монодисперсны.

Т а б л и ц а 9. Удельная поверхность шламов подшипниковой стали ШХ15 и шлифовальных производств МТЗ

Вид шлама	Удельная поверхность, м <sup>2</sup> /г	Вид шлама	Удельная поверхность, м <sup>2</sup> /г
Обкатной	0,5–0,6	Шлам стали 25 ХГТ	0,9–1,0
Опиловочный	0,6–0,7	Шлам стали 45	0,6–0,7
Шлам твердой шлифовки	2,1–2,3	Шлам стали 65	1,1–1,2
Шлам от станка	1,9–2,0	Шлам стали 40Х	0,9–1,1
Шлам после магнитной сепарации СОЖ	0,8–1,0	Шлам стали 5ХНМ	0,5–0,6
Шлам из отстойника	0,9–1,1	Шлам стали 65Г	0,7–0,8
Шлам чугуна СЧ20	0,5–0,6		

**Литература**

1. Дьяконов О. М. Шламы металлообрабатывающего производства. Ч. 1. Химический состав // Литье и металлургия. 2010. № 1, 2. С. 154–159.
2. Цибровский Я. Основы процессов химической технологии: Пер. с польск. / Под ред. П. Г. Романкова. Л.: Химия, 1967.
3. Романков П. П., Рашковская И. Б., Фролов В. Ф. Массообменные процессы химической технологии. Л.: Химия, 1975.
4. Лыков А. В. Явления переноса в капиллярно-пористых телах. М.: Госэнергоиздат, 1954.
5. Аналитический контроль производства пигментов: Справ. пособ. М.: Химия, 1986.
6. Паничкина В. В., Уварова И. В. Методы контроля дисперсности и удельной поверхности металлических порошков. Киев: Наукова думка, 1973.
7. Грег С., Синг К. Адсорбция, удельная поверхность, пористость: Пер. с англ. / Под ред. К. В. Чмутова. М.: Мир, 1970.