



УДК 62-253:622

**А.С. ЛАВОШНИК**, ведущий научный сотрудник,**В.Я. ДАМРИН**, заместитель директора структурного подразделения

Государственное предприятие «Украинский научно-технический центр металлургической промышленности «Энергосталь» (ГП «УкрНТЦ «Энергосталь»», г. Харьков

## ПОВЫШЕНИЕ РЕСУРСА СТОЙКОСТИ РОТОРОВ ЭКСГАУСТЕРОВ В ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ УСЛОВИЯХ АГЛОМЕРАЦИОННОГО ПРОИЗВОДСТВА

Представлен анализ причин повышенного износа роторов эксгаустеров в условиях агломерационного производства и влияния эксплуатационных факторов на стойкость роторов, предложены эффективные методы увеличения их ресурса.

**Ключевые слова:** эксгауستر, стойкость роторов, эксплуатационные факторы, абразивный износ, пылевая нагрузка, повышение ресурса роторов.

Работоспособность эксгаустеров в агломерационном производстве существенно влияет на основные экономические показатели и объем выпуска агломерата. В этой связи актуальными являются исследования причин повышенного износа роторов эксгаустеров в эксплуатационных условиях и решение проблемы увеличения их ресурса. В настоящей работе отдельные аспекты проблемы и пути ее практического решения рассмотрены на примере агломерационного производства ОАО «Северсталь» [1].

Основные функции эксгаустера в агломерационном производстве – обеспечение технологических условий спекания агломерата, преодоление сопротивления газоотводящего тракта, эвакуация агломерационных газов в атмосферу. Износ рабочих колес и улит эксгаустеров агломерационных машин зависит от концентрации пыли в агломерационных газах, поступающих на эксгауستر, коррозионных и абразивных свойств перекачиваемой газовой среды, а также от свойств используемых при изготовлении эксгаустеров конструкционных материалов.

В соответствии с рекомендациями по проектированию сооружений для очистки технологических газов агломашин остаточная запыленность газов перед эксгаустером определяется необходимостью обеспечения стойкости роторов в течение трех лет. Абразивный износ роторов эксгаустеров пропорционален (при прочих равных условиях) пылевой нагрузке, которая зависит от начальной запыленности агломерационных газов и эффективности их очистки по тракту.

Ограничение интенсивности образования выбросов пыли при спекании агломерата достигается соблюдением действующих технологических регламентов и требований по фракционному составу компонентов шихты,

увеличением высоты спекаемого слоя, использованием режима постели, поддержанием удовлетворительного состояния колосникового поля, оптимизацией технологического разрежения по длине агломерационной машины [2] и другими технологическими приемами, рекомендованными ВАТ-технологиями для процессов спекания агломерата [3, 4].

Предварительная очистка агломерационных газов от пыли, зачастую достаточно эффективная, происходит в газовом коллекторе. Основная очистка осуществляется в батарейных циклонах, мокрых газоочистках, электрофильтрах, рукавных фильтрах или в двухступенчатых газоочистных установках (ГОУ).

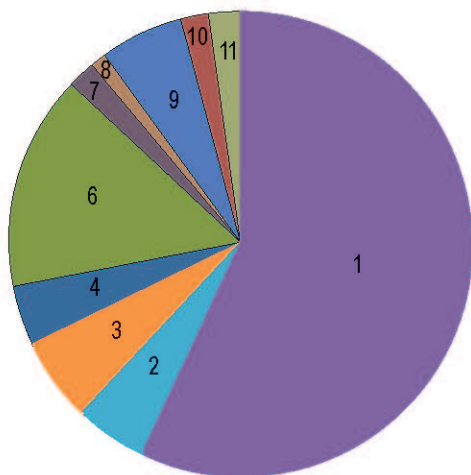
Повышение эффективности обеспыливания аглогазов по газоотводящему тракту достигается изменением способа их отвода на очистку (если это возможно), оптимизацией разрежения под первыми и последними вакуум-камерами газового коллектора, внедрением мероприятий по повышению эффективности коллектора грязного газа в качестве предварительной ступени очистки аглогазов, наладкой либо модернизацией существующей ГОУ.

Ресурс рабочих колес эксгаустеров в реальных эксплуатационных условиях агломерационного производства на предприятиях металлургии составляет от 10 дней до полутора лет, а усредненный отраслевой показатель стойкости роторов не превышает 3–5 месяцев [5, 6].

Следует отметить, что износ роторов происходит в результате продолжительного воздействия целого ряда технологических факторов и проявляется не сразу, поэтому проведение исследований в данной области является достаточно сложной задачей. Учитывая особенности указанных процессов, методология изучения

проблемы износа оборудования базируется преимущественно на анализе массива эксплуатационных данных, а также показателей шихтоподготовительных и других подразделений.

Анализ вынужденных остановок агломерационных машин по причине неисправности оборудования в агломерационном производстве ОАО «Северсталь» представлен на рис. 1 (из рассмотрения исключены остановки агломашин, вызванные неравномерностью поставки шихты и вывоза готового агломерата).



**Рисунок 1 – Простои агломашин из-за отказа оборудования на примере агломерационного производства ОАО «Северсталь»:**

- 1 – неисправность эксгаустера (57 %); 2 – остановка конвейера (5 %); 3 – прочие (6 %); 4 – забивка течи пылевых бункеров (4 %); 5 – неисправность конвейера (0 %); 6 – неисправность дробилки (15 %); 7 – неисправность грохота (2 %); 8 – неисправность паллет (1 %); 9 – неисправность питателя (6 %); 10 – неисправность тушильного барабана (2 %); 11 – неисправность челнока (2 %)

Простои агломерационных машин в большинстве случаев обусловлены неисправностями эксгаустеров из-за несвоевременной замены роторов, которая необходима при их дебалансе (19 % случаев) и износе лопаток (81 %). Дебаланс возникает, как правило, вследствие неравномерного абразивного износа, например при использовании клепаных (из-за выпадения отдельных заклепок) роторов, а также при отслоении с их поверхностей крупных фрагментов твердых отложений.

Известные исследования характера износа роторов эксгаустеров [5] показывают, что истирание лопаток и дисков происходит весьма неравномерно и сопровождается формированием на лопатках канавок в виде узких полос вдоль основного диска рабочего колеса. Износу подвержен также и центральный диск между рабочими лопатками по кольцу, примыкающему к зонам износа ло-

паток. Наибольший износ наблюдается на тех участках поверхностей лопаток и дисков рабочих колес, к которым твердые частицы прижимаются силами инерции. Это участки на рабочих колесах нагнетателей в местах перераспределения и концентрации пыли в поле действия центробежных сил при изменении направления газового потока от осевого направления к радиальному.

При неравномерном износе ротора кроме снижения его прочностных характеристик возникают статическая и динамическая неуравновешенности ротора, увеличивается нагрузка на подшипники, возникают существенные вибрации фундамента и опор подшипников и другие явления, приводящие к отказу эксгаустера.

Обычно в ходе эксплуатации ротора недопустимая вибрация наступает раньше аварийного износа деталей, требующего вынужденной балансировки, восстановления либо замены ротора. Поэтому его зачастую неоднократно балансируют до замены в связи с запредельным износом рабочего колеса, что приводит к значительному увеличению простоев основного оборудования и сокращению производства агломерата.

Кроме того, при низкой стойкости роторов к абразивному износу для обеспечения непрерывной работы основного оборудования возрастает потребность в ремонтных роторах и новых рабочих колесах эксгаустеров для замен и формирования резерва. Даже на предприятиях, где спекание агломерата осуществляется на однотипном оборудовании по единому регламенту, срок службы роторов эксгаустеров, определяемый их стойкостью, может изменяться в достаточно широких пределах – от 6 до 640 суток [7], причем причины такого разброса показателей стойкости роторов неочевидны.

В агломерационном цехе № 2 ОАО «Северсталь», где в эксплуатации находится шесть однотипных конвейерных агломашин К-3-75, оснащенных однотипными ГОУ, стойкость роторов эксгаустеров Н-8000 к абразивному износу по отдельным машинам изменяется в пределах от 22 до 115 суток. Существенный разброс этого показателя можно объяснить конструктивными различиями в схемах газоотводящих трактов (индивидуальные компоновочные решения обусловлены взаимным расположением агломашин и дымовой трубы), а также различным состоянием трактов и газоочистного оборудования, зависящим от срока эксплуатации и давности проведения последнего капитального ремонта.

Фактическая эксплуатационная эффективность ГОУ, как правило, существенно ниже показателя эффективности, определенного на момент завершения ремонтных работ и наладки. В агломерационном производстве ОАО «Северсталь» в рамках одного цеха (АГЦ-2) эффективность однотипных ГОУ отличается на 10–15 %.



В то же время падение эффективности ГОУ на 10–15 % может стать основной причиной снижения ресурса ротора эксгаустера в 1,5–2 раза [7].

При идентичной технологии спекания агломерата в АГЦ-2 эксплуатационную эффективность обеспыливания аглогазов (и, соответственно, индивидуальную величину пылевой нагрузки на роторы эксгаустеров) предопределяют особенности отдельных газоотводящих трактов.

Агломерационная пыль включает в себя частицы компонентов шихты, пыль аглоспека, пылевидные продукты абразивного разрушения материалов защитных покрытий газоходов, а также частицы конструкционных материалов газоочистного оборудования. Высокая абразивность агломерационной пыли обусловлена ее минералогическим и фракционным составом, остроугольной формой частиц и их высокой плотностью.

В ходе выполненных исследований установлено, что значительную долю агломерационной пыли в агломерационном производстве ОАО «Северсталь» составляет ферромагнитный оксид железа  $Fe_3O_4$  (магнетит), который легко отделяется магнитной сепарацией. Это подтвердили результаты химического и минералогического анализов магнитных фракций.

Минералогический состав агломерата (одного из основных компонентов аглопыли) представлен магнетитом ( $Fe_3O_4$ ), ферритами и силикатами кальция, кальциевым оливином. Твердость железосодержащих компонентов агломерационной пыли – гематита и магнетита – соответствует шести единицам по шкале Мооса; твердость кварца составляет семь единиц [8].

При неизменной пылевой нагрузке наличие в аглошихте значительных количеств мелкодисперсных абразивных компонентов может стать определяющим фактором повышенного износа роторов эксгаустеров. Воздействие пыли на элементы ротора определяется ее абразивными свойствами, неравномерностью распределения пылевой нагрузки (конструктивными особенностями ввода и распределения пылегазового потока в эксгаустере), скоростью движения и углом атаки частиц пыли. В ряде исследований отмечается высокая абразивность колошниковой пыли, входящей в состав аглошихты, размеры частиц которой составляют менее 0,1 мм [9].

Наличие в составе шихты конвертерных шлаков также приводит к снижению показателя стойкости роторов [10, 11], что вызвано присутствием в шлаке таких кристаллических форм, как двухкальциевый силикат  $2CaO \cdot SiO_2$  (в количестве 45–50 % масс.), мервинит  $3CaO \cdot MgO \cdot SiO_2$  (35 % масс.) и вюстит  $FeO$  (15–20 % масс.). Большое влияние на степень абразивного износа оборудования оказывает содержание в составе шихты не только шламов

и шлаков, но и других отходов металлургического производства, утилизируемых в процессах агломерации.

Специальными исследованиями авторов, выполненными на аглофабрике Енакиевского металлургического завода [12], установлено, что основной и единственной причиной снижения стойкости роторов от 120–180 суток до 24 явилось существенное увеличение в составе агломерационной шихты доли отсева агломерата и окатышей, высокая абразивность пыли этих материалов. Отсев окатышей фракций менее 100 мкм состоит из монолитных зерен с острыми краями (в основном это частицы кварца). Истинная плотность фракций пыли крупнее 160 мкм составляет 3,4–3,8 г/см<sup>3</sup>, а мельче 160 мкм – 4,5–5,1 г/см<sup>3</sup>, что связано с повышенным содержанием железа в мелких фракциях и меньшей пористостью частиц.

Истинная плотность частиц агломерационной пыли ОАО «Северсталь», определенная методом гидростатического взвешивания в керосине, составляет 4,25 г/см<sup>3</sup>. Форма пылевых частиц неправильная, остроугольная; основную массовую долю образуют частицы, размеры которых находятся в диапазоне 30–200 мкм, при этом минимальный размер составляет 10 мкм, максимальный – 250 мкм, медианный ( $d_{50}$ ) – 85 мкм.

Химический состав агломерационной пыли, отобранной на выходе эксгаустера, включает, %: п.п.п. – 2,15 (в т.ч. 1,75 С);  $SiO_2$  – 3,86;  $Fe_{общ}$  – 56,57;  $Fe_{мет}$  – 0,26;  $FeO$  – 26,29;  $Fe_2O_3$  – 54,53;  $CaO$  – 2,27;  $MgO$  – 0,34;  $Al_2O_3$  – 1,48;  $Mn$  – 0,22;  $Cr_2O_3$  – 0,03;  $Cu$  – 3,34;  $Ni$  – 2,44.

Присутствие меди и никеля в составе пробы агломерационной пыли, отобранной за эксгаустером, подтверждает наличие в ней продуктов разрушения конструкционных материалов эксгаустера, в т.ч. упрочняющих наплавов ротора.

При изменении направления газового потока на входе в эксгаустер происходит перераспределение пыли, которое приводит к концентрации пылевой нагрузки в отдельных зонах, т.е. к увеличению местных удельных нагрузок и выраженному локальному износу роторов. Согласно данным проведенных исследований, абразивный износ лопаток роторов в указанных проблемных зонах составляет для разных агломашин АГЦ-2 от 0,01 до 0,4 мм в сутки (при начальной толщине металла лопаток ~ 14 мм его допустимая остаточная толщина в соответствии с регламентом должна быть не менее 1,5 мм).

Следует отметить, что в производстве агломерата на различных предприятиях отрасли существуют тенденции как к образованию отложений на поверхностях роторов нагнетателей, так и к их абразивному износу. Преобладание тех либо иных тенденций определяется составом шихты и другими особенностями технологии конкретного предприятия.

Образованию отложений в эксгаустерах способствует использование в составе аглошхиты замасленных железосодержащих отходов металлургического производства, а также применение аппаратов мокрой очистки аглогазов. Отложения на деталях эксгаустеров более характерны для поверхностей, не подверженных абразивному износу (таких, например, как тыльная сторона лопаток рабочего колеса).

Результаты выполненных исследований показывают, что износ роторов эксгаустеров в агломерационном производстве определяется преимущественно абразивным износом. Вклад химического или электрохимического разрушения деталей рабочих колес при воздействии кислотной коррозионной среды становится значимым только при спекании шихты с высоким содержанием серы. С целью предотвращения абразивного износа деталей изготовители эксгаустеров в качестве конструкционных материалов используют износостойкие стали марок 30XГСА, 20X2, 20X2M 10XСНД.

Основными производителями эксгаустеров для агломерационного производства являются ООО «СМ-Тяжмаш», ОАО «Энергомаш», ЗАО «Невский завод» и ООО «Уфалейский завод металлургического машиностроения».

На предприятиях, эксплуатирующих это оборудование, в ходе восстановительных ремонтов роторов для повышения износостойкости лопаток применяют наплавляемые защитные покрытия сплавами типа «корудор» и др. В отдельных случаях наплавке подвергают не только бывшие в эксплуатации лопатки, но и новые.

Материалы, твердость которых превышает твердость рудной, агломерационной и коксовой пыли, имеют температуру плавления в пределах 2000–4500 °С и должны наноситься на защищаемую поверхность крупногабаритного изделия без нарушения металлографической структуры основного материала. Подбор износостойких материалов защитных покрытий и отработка технологии их нанесения на лопатки и диски роторов является сложной задачей. Так, исследования по напылению плазменной дугой тонкого слоя материалов, обладающих высокой твердостью (оксид алюминия, карбид вольфрама, карбид бора, карбид титана, карбид-борид титана, карбид-борид вольфрама), на лопатки роторов с последующими испытаниями в эксплуатационных условиях агломерационного производства не показали существенных положительных результатов [13, 14]. Малоэффективно также применение износостойких металлокерамических покрытий (в частности, на основе кремния, никеля, бора и хрома) для упрочнения лопаток роторов и тонкослойных износостойких покрытий различного состава для защиты рабочих колес эксгаустеров.

Качественно новым подходом к снижению интенсивности износа роторов явились предложенные ВНИПЧерметэнергоочисткой технические решения по рассеиванию пылевой струи в межлопаточном канале путем оснащения роторов противоизносными дисками [6]. Такие диски выполняются сварными, при этом количество их предкрылков соответствует числу рабочих лопаток ротора.

Анализ существующих методов повышения стойкости роторов показал, что наиболее эффективное решение рассматриваемой проблемы достигается рассеиванием узкого пылевого пучка по всему объему межлопаточного канала путем таких конструктивных изменений роторов эксгаустеров, которые позволяют равномерно распределить абразивное воздействие пыли по значительно большей поверхности. Эксплуатация роторов с противоизносными лопаточными дисками показала высокую эффективность этого решения и подтвердила существенное увеличение срока службы роторов (более чем в три раза) [5].

При наличии противоизносного диска в начальный период эксплуатации абразивному износу в первую очередь подвержены его предкрылки, где фиксируемая потеря массы значительно больше, чем на лопатках основного диска. Интенсивное абразивное воздействие газового потока на лопатки наблюдается только после изнашивания предкрылков более чем на 70–80 %. Так как ресурс роторов эксгаустеров при использовании противоизносных дисков определяется ресурсом накладных дисков, приоритетным является повышение именно их стойкости к абразивному износу.

Работа роторов эксгаустеров характеризуется окружными скоростями от 155 до 175 м/с, вызывающими предельно допустимые напряжения во вращающихся деталях. В свою очередь, применение толстослойных наплавляемых защитных покрытий для роторов приводит к дополнительному росту напряжений в конструкции и имеет свои ограничения. Такие покрытия предпочтительнее использовать для накладных дисков, диаметр и окружные скорости которых существенно меньше, чем у роторов.

В настоящее время основные производители эксгаустеров поставляют роторы в комплекте со съемными противоизносными дисками, что обеспечивает их быструю замену и, следовательно, сокращение простоев эксгаустеров.

## ВЫВОДЫ

1. В условиях агломерационного производства ресурс работы роторов эксгаустеров до их вынужденной балансировки, восстановления либо замены зависит от



интенсивности износа и образования отложений на поверхностях ротора.

2. Абразивное воздействие перекачиваемой газовой среды на материал роторов тем выше, чем выше пылевая нагрузка. Стойкость роторов эксгаустеров к абразивному износу определяется величиной пылевой нагрузки на подверженные износу поверхности, абразивными свойствами пыли, а также свойствами конструкционных материалов и упрочняющих покрытий ротора.

3. Пылевая нагрузка на ротор зависит от удельных показателей образования пыли при спекании агломерата и от эффективности очистки отходящих газов в вакуум-камерах, газовом коллекторе и аппаратах газоочистки.

4. Абразивные свойства пыли зависят от ее фракционного и минералогического состава, а также от величины истинной плотности частиц. Абразивное воздействие пыли на элементы ротора определяется неравномерностью распределения пылевой нагрузки (т.е. конструктивными особенностями ввода и распределения пылегазового потока в эксгаустере), скоростью движения и углом атаки частиц пыли.

5. Увеличение срока службы роторов эксгаустеров возможно путем снижения (технологическими приемами) величины удельного пылевыделения в процессе спекания и повышения эффективности обеспыливания отходящих технологических газов на всех участках газоотводящего тракта. Исключение мелких фракций достигается в агломерации применением окомкования с заменой части известняка известью.

6. С целью повышения ресурса роторов рекомендуется эксплуатировать их только в комплекте с накладными противоизносными дисками, которые монтируются на основном диске рабочего колеса с возможностью замены.

7. Повышение стойкости роторов эксгаустеров к абразивному износу достигается применением износостойких конструкционных материалов и упрочняющих наплавов типа «корудор» для защиты подверженных износу лопаток рабочих колес и противоизносных дисков.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Обследование и разработка мероприятий по повышению эффективности работы газовых трактов агломашин АГЦ-2, АГЦ-3 АГП ОАО «Северсталь»: отчет о НИР / ГП «УкрНТЦ «Энергосталь»; рук. Лавошник А.С., Шапаренко А.В. – Х., 2010. – Арх. № 100295.
2. Оптимизация гидравлических характеристик агломерационных машин, в том числе при спекании ших-

ты в высоком слое: отчет о НИР (заключит.) / ВНИИМТ; рук. Герасимов Л.К. – Свердловск, 1978. – 66 с. – № ГР 76048389. – Инв. № Б699042. – Арх. № П-6175/2.

3. Справочное руководство по лучшим имеющимся технологиям и их влияние на совершенствование охраны окружающей среды в Европейском сообществе [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://eippcb.jec.es>.
4. **Буторина, И.В.** Основы устойчивого развития металлургического производства / И.В. Буторина. – Донецк: Каштан, 2005. – 332 с.
5. Повышение стойкости роторов аглоэксгаустеров путем внедрения сварной предвключенной противоизносной лопаточной решетки: науч.-техн. отчет / ВНИПИЧерметэнергоочистка (ОПТП). – Х., 1977. – 28 с.
6. Опыт использования применения техногенных отходов в аглопроизводстве «Криворожстали» / В.А. Шеремет, Е.Г. Донской, О.Г. Кубанов и др. // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2006. – № 3. – С. 113–116.
7. **Коротич, В.И.** Газодинамика агломерационного процесса / В.И. Коротич, В.П. Пузанов. – М.: Металлургия, 1969. – 208 с.
8. **Вегман, Е.Ф.** Окускование руд и концентратов / Е.Ф. Вегман. – М.: Металлургия, 1968. – 284 с.
9. **Юзвенко, Ю.А.** Абразивность колошниковой пыли доменных печей / Ю.А. Юзвенко, А.Ф. Таращенко, В.А. Гавриш // Сталь. – 1969. – № 8. – С. 683–684.
10. **Побоккина, Е.П.** Использование конвертерного шлака в вагранках / Е.П. Побоккина, В.И. Ростовский, М.М. Перистый // Охрана окружающей среды и рациональное использование природных ресурсов: рекуперация промышленных отходов: сб. мат. 5-ой Междунар. науч. конф. студентов и молодых ученых. Ч. 1. – Донецк, 2006. – 38 с.
11. **Бондаренко, В.В.** Химический и минералогический составы конвертерного уноса / В.В. Бондаренко, Ф.Т. Беллин // Очистка водного и воздушного бассейнов на предприятиях черной металлургии: тематич. отрасл. сб. – М.: Металлургия, 1972. – № 1. – С. 32–38.
12. Обследование существующей системы газоочистки агломашин АГЦ ПАО «Енакиевский металлургический завод» и разработка мероприятий по повышению эффективности ее работы: отчет / ГП «УкрНТЦ «Энергосталь»; рук. Мантула В.Д. – Х., 2011.
13. **Брук, А.Д.** Центробежные вентиляторы / А.Д. Брук, Т.И. Макишвили и др.; под общ. ред. Соломаховой Т.С. – М.: Машиностроение, 1975. – 416 с., илл.
14. Усовершенствование дымососов газоочистных сооружений путем применения износостойких материалов и покрытий: отчет / ВНИПИЧерметэнергоочистка. – Х., 1973. – Арх. № 20634.

Поступила в редакцию 23.07.2013



Надано аналіз причин підвищеного зносу роторів ексгаустерів в умовах агломераційного виробництва та впливу експлуатаційних факторів на стійкість роторів, запропоновано ефективні методи збільшення їх ресурсу.

Causes of increased wear of exhauster rotors at using in sinter productions, influence of operational factors on rotor service life were analyzed; effective methods of increasing their life are proposed.