

тоспособности на мировом рынке нанопорошковых материалов. В настоящее время ведущими зарубежными производителями нанопорошков боридов, среди которых научно-производственные фирмы «Nanostructured & Amorphous Materials. Inc.» (США), «Tokyo Tekko Co» (Япония), «Hefei Nanotechnology & Development ltd. Co» (Китай), «Neomat Co» (Латвия), «Plasma Chem GmbH» (Германия) установлен диапазон цен за 1 кг нанопорошков боридов в пределах 400 – 2000 долл. США. Срок окупаемости капиталовложений составляет 2 года, что подтверждает экономическую и технологическую целесообразность организации производства нанопорошка борида хрома. При этом одной из наиболее предпочтительных сфер применения борида хрома является технология композиционных гальванических покрытий [4, 5].

Выводы. На основании проведенных модельно-математических и технологических исследований определены оптимальные значения параметров плазменного синтеза борида хрома и его физико-химические характеристики. Установлено, что при борировании порошка хрома в условиях азотно-водородного плазменного потока в области температур 5400 – 2000 К может быть получен борид хрома CrB_2 в виде нанопорошка с размером частиц 25 – 75 нм. Исследованы фазовый

и химический составы, дисперсность, морфология и окисленность продуктов синтеза. Определены такие основные технико-экономические показатели предлагаемой технологии, как производительность, интенсивность, себестоимость, отпускная цена.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Руднева В.В. Плазмометаллургическое производство карбида кремния: развитие теории и совершенствование технологии. – М.: Флинта: Наука, 2008. – 387 с.
2. Ноздрин И.В., Галевский Г.В., Руднева В.В. – В кн.: Моделирование, программное обеспечение и наукоемкие технологии в металлургии. Труды 3-й Всероссийской научно-практической конференции. – Новокузнецк: изд. СибГИУ. 2011. С. 60 – 64.
3. Ноздрин И.В., Ширяева Л.С., Терентьева М.А. – В кн.: Системы автоматизации в образовании, науке и производстве. Материалы VIII Всероссийской научно-практической конференции. – Новокузнецк: СибГИУ. 2011. С. 464 – 467.
4. Ноздрин И.В., Галевский Г.В., Руднева В.В. // Заготовительные производства в машиностроении. 2011. № 9. С. 46 – 48.
5. Агеев В.Е., Латыпов Р.А. Восстановление и упрочнение деталей машин композиционными гальваническими покрытиями. – Курск: изд. Курской государственной сельскохозяйственной академии, 2011. – 75 с.

© 2013 г. И.В. Ноздрин, В.В. Руднева, Г.В. Галевский
Поступила 23 января 2013 г.

УДК 669.184.124

**П.С. Харлашин¹, А.К. Харин¹, Р.Д. Куземко¹,
Р.Ф. Калимуллин², Е.В. Протопопов²**

¹ Приазовский государственный технический университет (г. Мариуполь)

² Сибирский государственный индустриальный университет

ВЛИЯНИЕ НАГРЕВА АЗОТА НА МЕЖФАЗНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ПРИ ТЕЧЕНИИ ГАЗОВЗВЕСИ В ТОРКРЕТ-ФУРМЕ

Аннотация. С использованием статической модели двухскоростного движения газовзвеси в торкрет-фурме показано, как концентрация порошка, давление несущего газа, плотность частиц, их эквивалентный диаметр, коэффициент формы, разность скоростей и динамическое скольжение фаз влияют на коэффициент аэродинамического сопротивления, силу межфазного взаимодействия, объемную долю газовой фазы, скорость витания.

Ключевые слова: газодисперсный поток, торкрет-фурма, нагрев газа, межфазное взаимодействие.

EFFECT OF NITROGEN HEATING ON THE INTERFACIAL INTERACTION BY THE FLOW OF GAS SUSPENSION IN GUNNING-LANCE

Abstract. Using a static model of two-speed motion of the gas suspension in gunning-lance it is shown how the powder concentration, carrier gas pressure, particle number density, equivalent diameter, shape factor, differential velocity, and dynamic phase slip have an effect on the aerodynamic drag coefficient, interfacial interacting force, inclusion volume fraction of gas phase, and velocity of soaring.

Keywords: gas-dispersed flow, gunning-lance, gas heating, interfacial interaction.

Обобщение зарубежных и отечественных достижений при решении проблемы повышения стойкости футеровки кислородных конвертеров показало, что технологически наиболее оптимальным вариантом яв-

ляется совместное использование по ходу кампании технологии пневматической раздувки конечного шлака и факельного торкретирования [1]. Так, внедрение технологии горячего ремонта в ПАО «ММК им. Ильича»

путем использования факельного торкретирования обеспечило увеличение стойкости футеровки конвертеров емкостью 160 т вдвое [2]. При этом резервы повышения эффективности при использовании таких вариантов ремонта футеровки конвертеров еще далеко не исчерпаны.

При решении задачи о движении газодисперсных потоков исследователи, как правило, используют феноменологический подход, когда детальная структура потока не изучается. Например, в работах [2, 3] для нахождения определяющих параметров газопорошкового потока в продольном или в любом поперечном сечении подводящего пылепровода, фурме или в соплах торкрет-фурм использована динамическая модель. Однако не менее эффективной является статическая модель (совместно решается система не дифференциальных, а алгебраических уравнений). Этот метод позволяет изучить влияние трудно поддающихся анализу связей между факторами и физическими воздействиями и основными закономерностями теплообмена и аэродинамического сопротивления при газодисперсном течении в специальных фурмах (например, торкрет-фурмах). При решении технологических задач сложного движения взаимопроникающих сред эти два метода существенно дополняют друг друга.

В работе [4], где используется статическая модель, влияние наиболее сильного физического воздействия (нагрева несущего газа) на течение газозвеси не изучалось. В то же время результаты исследований, проведенных в работе [5], показали, что если не применять водяное охлаждение, а использовать газоохлаждаемую фурму, то ствол последней в высокотемпературной полости конвертера становится эффективным теплообменником, при этом температура ствола фурмы достигает 500 °С при достаточно высокой стойкости самой фурмы. Если несущий газ (азот) в фурме нагревается примерно до 400 °С, то тепловая мощность газопорошкового потока (например, истекающего в полость конвертера емкостью 160 т) увеличивается более, чем в два раза и превышает 2 МВт. В работе [6] доказано, что при регенерации теплоты с целью нагрева газозвеси перед соплами торкрет-фурмы кинетическая энергия истекающего в полость конвертера потока увеличивается в 1,5 – 2,0 раза. Это приводит к снижению расхода огнеупорного порошка при факельном торкретировании, уменьшению его выноса через горловину конвертера и повышению стойкости самого торкрет-покрытия.

Целью настоящей работы является установление влияния температуры несущего газа t_1 на основные характеристики газопорошкового потока: коэффициент аэродинамического сопротивления C_D , силу межфазного взаимодействия F_{12} , объемную долю газовой фазы ε_1 , скорость витания w_8 при изменении в широком диапазоне концентрации порошка μ , давления несущего газа p_1 , плотности частиц ρ_2 , эквивалентного диаметра

δ и коэффициента формы f частиц, разности скоростей фаз Δw , коэффициента динамического скольжения ψ .

В настоящей работе приняты следующие обозначения: G_2 – приведенный расход твердой фазы, кг/(с·м²); m_1 и m_2 – массовый расход газа-носителя и порошка, кг/с; p_1 – абсолютное давление в фурме, Па; t_1 – температура несущего газа, °С; ρ_1 и ρ_2 – плотность несущего газа и частиц, кг/м³; w_1 и w_2 – скорость азота и частиц порошка, м/с; $\Delta w = w_1 - w_2$ – разность скоростей фаз, м/с; $\mu = m_2/m_1$ – массовая концентрация порошка, кг/кг; ε_1 и ε_2 – местная объемная концентрация газа и порошка; F_{2w} – приведенная сила трения частиц о стенку, Н/м³; F_c – сила сопротивления, Н; F_{12} – сила межфазного взаимодействия, Н/м³; n_2 – счетная концентрация, 1/м³; $\psi = w_2/w_1$ – коэффициент динамического скольжения фаз; ν – кинематический коэффициент вязкости, м²/с; C_D – коэффициент аэродинамического сопротивления; δ и S – эквивалентный диаметр и площадь сечения частицы, м и м²; k_ε – коэффициент стеснения; k_f – поправочный коэффициент, учитывающий несферичность частицы; α – угол отклонения фурмы от вертикали.

Расчетная модель. При течении газопорошкового потока распределение термогазодинамических параметров в продольном и поперечном сечениях канала получают, решая совместно уравнения движения и теплообмена для каждой из фаз дисперсной среды. Например, следуя подходу работы [2], при монодисперсном двухскоростном течении частиц порошка в потоке газозвеси уравнение движения имеет вид

$$G_2 \frac{dw_2}{dx} + \varepsilon_1 \frac{dp}{dx} = -F_{2w} + F_{12} + \varepsilon_2 \rho_2 g \cos \alpha.$$

Расчеты показали, что при температуре стенки фурмы $t_w = 400$ °С и концентрации порошка $\mu = 35$ кг/кг сила межфазного взаимодействия F_{12} больше силы трения частиц о стенку F_{2w} примерно в пять раз. Наибольший научный интерес представляет зависимость силы F_{12} от факторов, определяющих течение как слабо, так и сильно загруженного газодисперсного потока в фурме с интенсивным теплоподводом.

Силу межфазного взаимодействия F_{12} , благодаря которой частицы приводятся в движение, рассчитывали по зависимости

$$F_{12} = F_c n_2,$$

где $F_c = C_D S p_1 (w_1 - w_2) |w_1 - w_2|/2$; $n_2 = 6\varepsilon_2/(\pi\delta^3)$ – счетная концентрация технологического порошка.

В односкоростных моделях $F_{12} = 0$.

В теории многоскоростных сред одним из самых представительных параметров потока является коэффициент аэродинамического сопротивления $C_D = f(\text{Re}_{12})$, используя который можно определить силу взаимодействия между несущим газом и частицами. Число Рейнольдса двухскоростного течения определяли как

$$\text{Re}_{12} = |w_1 - w_2| \delta / \nu.$$

Так как $\text{Re}_{12} \gg 1$, то для нестоксовской области сопротивления коэффициент C_D рассчитывали также, как в работе [7]

$$C_D = \frac{24}{\text{Re}_{12}} k_\varepsilon (1,25 + 0,01926 k_f \text{Re}_{12}), \quad 1 < \text{Re}_{12} < 2 \cdot 10^5.$$

Коэффициент формы частиц $f = S/S_{\text{шара}}$ задавали, а поправочный коэффициент определяли как $k_f = 12,4 \div 11,4/f$. Метод расчета эквивалентного диаметра шара представлен в работе [4]. Коэффициент стеснения k_ε находили как $k_\varepsilon = \varepsilon_1^{-2n}$, где $n = 2,5 \div 4,0$ – коэффициент структуры потока.

При совместном решении уравнений неразрывности для каждой из двух фаз $m_1 = \varepsilon_1 \rho_1 w_1 S$ и $m_2 = \varepsilon_2 \rho_2 w_2 S$ легко показать, что важнейшие параметры газопорошкового потока (ε_1 , ψ , ρ_1 , ρ_2) и массовая концентрация μ связаны следующим соотношением:

$$\varepsilon_1 = \left(1 + \frac{\mu r_1}{\psi r_2} \right)^{-1},$$

где значение ρ_1 находится по уравнению состояния несущего газа.

Если по пути движения газозвеси появляются горизонтальные участки, то устойчивость режима течения необходимо проверять, сравнивая разность скоростей Δw со скоростью витания w_b , величина которой в зависимости от параметров существенно изменяется. Так как в торкрет-фурме $\rho_2 \gg \rho_1$, то с достаточным приближением скорость витания можно рассчитать по формуле

$$w_b = 1,15 \left(\frac{\rho_2 R T_1}{p_1 C_D} \right)^{0,5},$$

где R – универсальная газовая постоянная.

Частица находится во взвешенном состоянии при условии $\Delta w > w_b$.

Анализ факторов, влияющих на силу F_{12} , усложняется тем, что при изменении температуры t_1 несущего газа его плотность ρ_1 и вязкость ν действуют на величину F_{12} в противоположных направлениях; поэтому систему уравнений решали численно.

Исходные данные и результаты расчета. Давление p_1 несущего газа (азота) изменяли в диапазоне 0,4 – 1,2 МПа, а температуру t_1 – в интервале 100 – 600 °С. Принимали, что диаметр δ частиц составлял 0,06 – 0,12 мм, плотность $\rho_2 = 1800 \div 3300$ кг/м³, коэффициент f формы частиц 1,0 – 1,6, концентрация μ порошка 40 – 120 кг/кг, коэффициент ψ динамического скольжения 0,6 – 1,0, разность Δw скоростей 4 – 12 м/с. Связи между параметрами во всех остальных режимах устанавливали, принимая, что $p_1 = 0,4$ МПа,

$w_1 = 20$ м/с, $\delta = 0,06$ мм, $\rho_2 = 2600$ кг/м³, $\mu = 60$ кг/кг, $\psi = 0,6$, $\Delta w = 4$ м/с, $f = 1$, $n = 2$. Расчеты выполняли при условии, что коэффициент вязкости газа $\nu = f(t, p)$, а эта зависимость является весьма существенной. Так, например, для азота при $p_1 = 0,6$ МПа в температурном диапазоне $t_1 = 25 \div 600$ °С коэффициент ν изменяется как $\nu_{600}/\nu_{25} = 16,24/2,6 = 6,25$.

Рассмотрим влияние различных факторов и физических воздействий на коэффициент C_D , силу F_{12} и скорость w_b .

Концентрация порошка μ . При подогреве несущего газа (рис. 1) сила межфазного взаимодействия F_{12} уменьшается при любой концентрации μ . Так, например, при нагреве азота с 100 до 600 °С при $\mu = 80$ кг/кг сила F_{12} снижается с 1,75 до 0,35 МН/м³, а при этих же условиях из-за уменьшения ρ_1 объемная доля газовой фазы ε_1 возрастает с 0,72 до 0,86. Это объясняется тем, что при нагреве газа (азота) плотность ρ_1 и коэффициент C_D уменьшаются. Другая характерная закономерность: чем сильнее нагрев, тем прирост силы F_{12} в потоке менее плотного газа с увеличением μ снижается. Например (рис. 1), при $\mu = 120$ кг/кг и изменении температуры t_1 с 100 до 600 °С прирост $F_{12}^{100}/F_{12}^{600}$ составляет 0,75/0,2 = 3,75.

Давление p_1 транспортирующего газа. При любой температуре t_1 с увеличением давления p_1 сила межфазного взаимодействия F_{12} растет (рис. 2). Однако чем ниже t_1 , тем сильнее прирост силы F_{12} . Например, если температура азота 100 °С, то при увеличении p_1 с 0,4 до 1,2 МПа сила F_{12} возрастает с 0,8 до 10,1 МН/м³, а значение ε_1 снижается с 0,81 до 0,59. При $t_1 = 500$ °С при тех же условиях значение F_{12} падает с 2,10 до 0,21 МН/м³. Главная причина такого резкого изменения силы F_{12} – зависимость вязкости газа $\nu = f(t, p)$: так, если при $t_1 = 100$ °С давление увеличивается с 0,4 до 1,2 МПа, то кинематическая вязкость снижается с $5,84 \cdot 10^{-6}$ до $1,95 \cdot 10^{-6}$ м²/с.

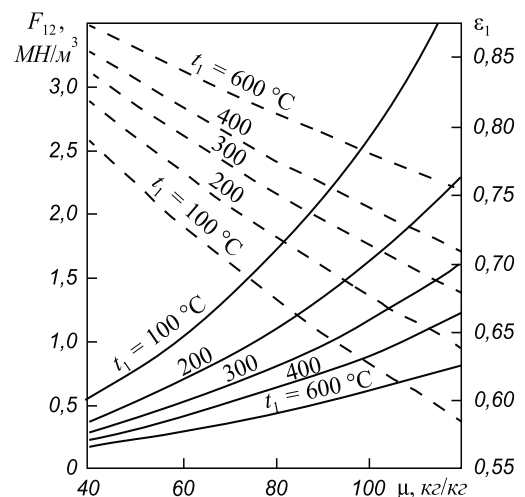


Рис. 1. Зависимость силы межфазного взаимодействия F_{12} (—) и объемной концентрации газовой фазы ε_1 (---) от концентрации порошка μ при различной температуре несущего газа t_1

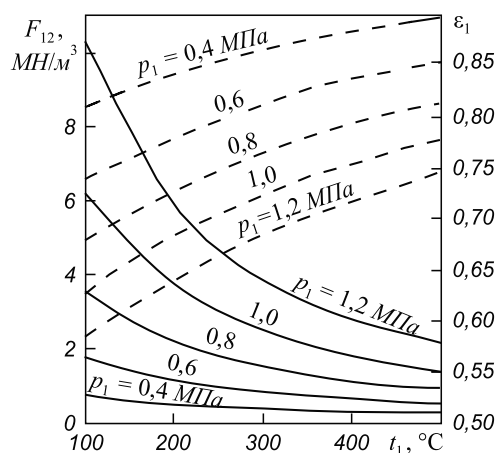


Рис. 2. Влияние давления несущего газа p_1 и температуры газа t_1 на силу межфазного взаимодействия F_{12} (—) и объемную концентрацию газовой фазы ε_1 (---)

Плотность ρ_2 порошка. В зависимости от массовой доли огнеупорного порошка, антрацита (или кокса) и других добавок их усредненная плотность изменяется в широких пределах. Представляет научный интерес, как коэффициент C_D , сила F_{12} и скорость w_b зависят от плотности порошка ρ_2 при различной температуре t_1 несущего газа (рис. 3).

Чем выше значение ρ_2 , тем меньшее значение принимает коэффициент C_D при любой температуре t_1 . В то же время при нагреве газа коэффициент C_D возрастает. Например, при $\rho_2 = 2800 \text{ кг/м}^3$ и увеличении t_1 от 100 до 500 °С коэффициент C_D повышается с 3,2 до 4,9, а скорость w_b возрастает с 0,36 до 0,44 м/с (рис. 3, а). Сила взаимодействия F_{12} между фазами при этом же росте температуры t_1 (при $\rho_2 = 2800 \text{ кг/м}^3$) снижается с 0,52 до 0,20 МН/м³, а значение ε_1 возрастает с 0,84 до 0,92 (рис. 3, б). Такая закономерность объясняется тем, что при нагреве газа темп роста C_D менее существенный, чем одновременное снижение ρ_1 и ε_2 .

Диаметр частиц δ . С увеличением δ коэффициент C_D снижается при любой температуре газа t_1 (рис. 4). Однако чем больше значение t_1 , тем выше C_D . Характерно, что чем меньше δ , тем меньше прирост C_D при увеличении t_1 . Например, в интервале температур $\Delta t = 100 \div 500 \text{ °C}$ при $\delta = 0,06 \text{ мм}$ отношение коэффициентов $C_D^{500}/C_D^{100} = 3,8/0,5 = 7,6$, а при $\delta = 0,12 \text{ мм}$ это соотношение составляет $C_D^{500}/C_D^{100} = 5,7/4,3 = 1,36$ (рис. 4). Скорость витания w_b в большей степени зависит от δ , чем от t_1 , что естественно.

Коэффициент формы частиц f . Сила взаимодействия между частицами и несущим их газом зависит от целого ряда факторов: ρ_1 , δ , μ , ρ_2 , Δw и др. Но представляет также существенный научный интерес, как форма частиц влияет на силу F_{12} при условии нагрева газоносителя. Чем сильнее форма частиц отличается от сферической, тем больше сила F_{12} и ниже скорость w_b (рис. 5). Нагрев несущего газа снижает межфазное сопротивление. Так, при $t_1 = 100 \text{ °C}$ повышение f с 1,0

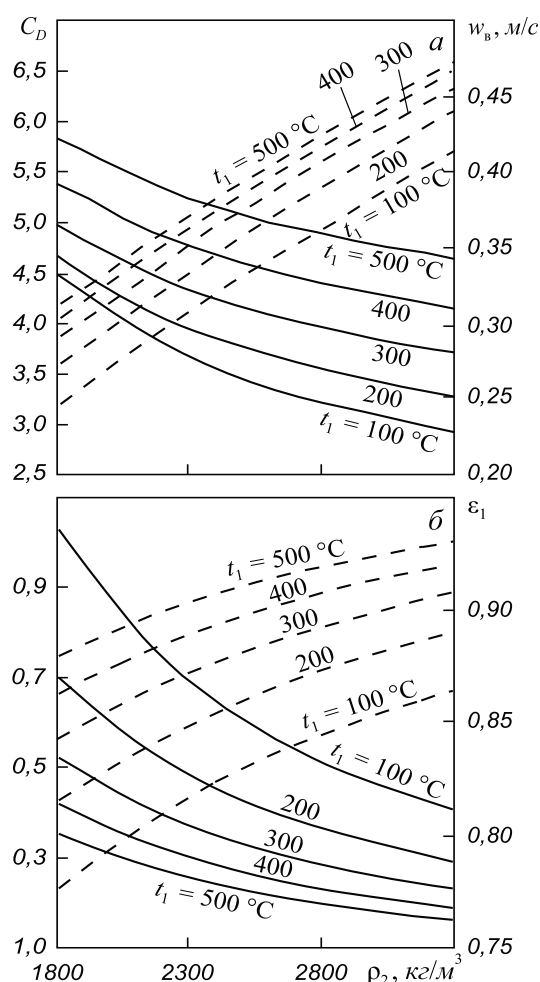


Рис. 3. Зависимость коэффициента аэродинамического сопротивления C_D (—) и скорости витания частиц w_b (---) (а), а также силы межфазного взаимодействия F_{12} (—) и объемной концентрации газовой фазы ε_1 (---) (б) от плотности порошка ρ_2 при различной температуре несущего газа t_1

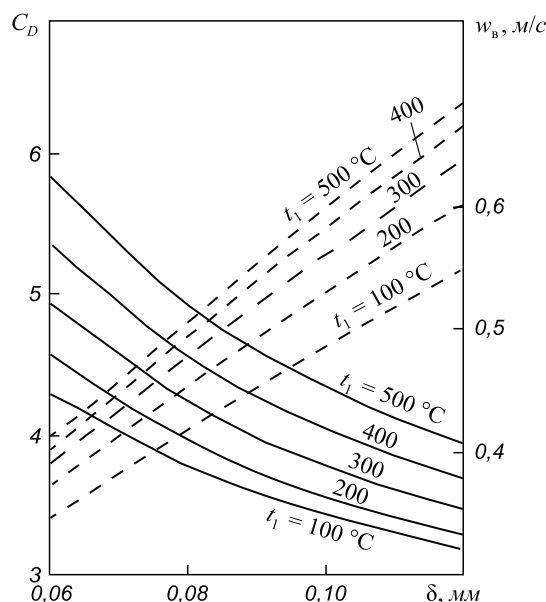


Рис. 4. Влияние температуры несущего газа t_1 и размера частиц δ на коэффициент аэродинамического сопротивления C_D (—) и скорость витания частиц w_b (---)

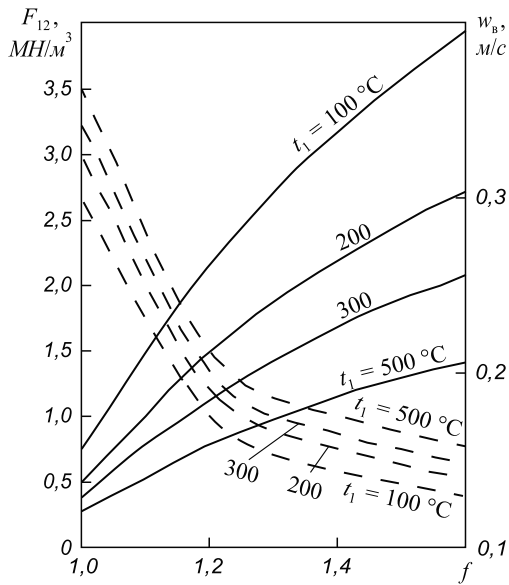


Рис. 5. Зависимость силы межфазного взаимодействия F_{12} (—) и скорости вращения частиц w_B (---) от коэффициента формы f при различной температуре несущего газа t_1

(шар) до 1,6 (пластина) приводит к увеличению F_{12} в пять раз (с 0,75 до 3,77 MN/m^3). При $f = 1,6$ увеличение t_1 с 100 до 500 °C вызывает снижение силы F_{12} в 2,7 раза (с 3,77 до 1,40 MN/m^3). Сила взаимодействия между фазами при $f = 1,6$ и $t_1 = 100$ °C составляет $F_{12} = 3,8 \text{ MN/m}^3$, а при $f = 1,0$ и $t_1 = 500$ °C снижается до $F_{12} = 0,25 \text{ MN/m}^3$. Естественно, что на F_{12} коэффициент f влияет через C_D .

Коэффициент скольжения фаз ψ . Представленная на рис. 6 зависимость $F_{12} = f(t_1, \psi)$ объясняется тем, что если коэффициент динамического скольжения ψ уменьшается, то разность скоростей фаз Δw растет. Но Δw в формулу (2) входит как сомножитель

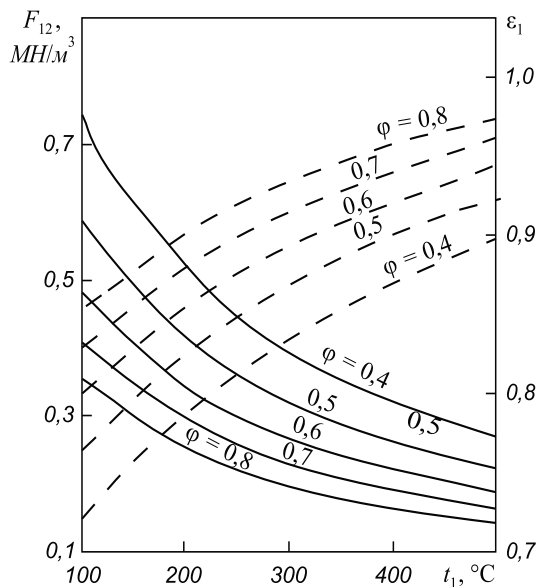


Рис. 6. Влияние температуры несущего газа t_1 и коэффициента динамического скольжения фаз ψ на силу межфазного взаимодействия F_{12} (—) и объемную концентрацию газовой фазы ϵ_1 (---)

в квадрате, а C_D в формулу (4) (через число Re_{12}) – в первой степени, поэтому сила F_{12} с увеличением ψ снижается при любой температуре t_1 азота. Однако подвод теплоты, с одной стороны, приводит к уменьшению плотности ρ_1 газа-носителя, а значение ϵ_1 увеличивается. С другой стороны, коэффициент C_D возрастает из-за увеличения вязкости ν . Например, при повышении t_1 с 100 до 500 °C плотность ρ_1 снижается в 2,1 раза, а вязкость ν при $p = 0,6 \text{ МПа}$ возрастает в 3,4 раза.

Разность скоростей фаз Δw . Чем ниже коэффициент скольжения фаз ψ , тем большую силу F_{12} необходимо приложить, чтобы привести в движение частицу (рис. 7). При нагреве несущего газа он становится менее плотным и при разгоне частицы в таком потоке нужно приложить меньшую силу F_{12} . Например, при $t_1 = 400$ °C и $\Delta w = 12 \text{ м/с}$ сила $F_{12} = 0,4 \text{ MN/m}^3$, а при $\Delta w = 4 \text{ м/с}$ сила $F_{12} = 0,13 \text{ MN/m}^3$. В холодном потоке ($t_1 = 100$ °C) при этих же условиях значение F_{12} соответственно составляет 0,88 и 0,20 MN/m^3 .

При нагреве газа скорость w_B прямо зависит от температуры t_1 и вязкости ν , которая в неявном виде входит в коэффициент C_D (рис. 7).

Проверка результатов численного исследования. В настоящее время отсутствует измерительная техника по определению силы F_{12} , коэффициента C_D и по этой причине зафиксировать их экспериментально невозможно. Отсутствуют приборы для измерения скорости вращения w_B и объемной доли газовой фазы ϵ_1 . Невозможно также зафиксировать скорость w_2 отдельных частиц, а поэтому выполнить эксперимент в условиях настоящей задачи практически невозможно. Для доказательства адекватности модели используется метод тестирования. Таким образом:

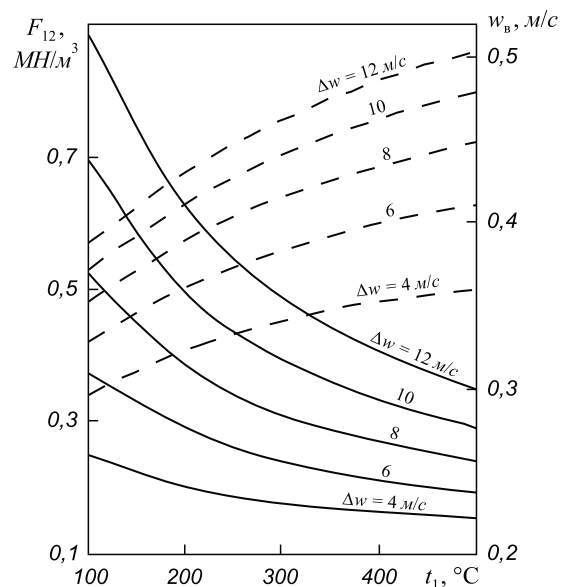


Рис. 7. Зависимость силы межфазного взаимодействия F_{12} (—) и скорости вращения частиц w_B (---) от температуры несущего газа t_1 при различной разности скоростей фаз Δw

– если концентрация $\mu \rightarrow 0$, то $m_2 \rightarrow 0$ и сила межфазного взаимодействия $F_{12} \rightarrow 0$, а объемная доля газовой фазы $\varepsilon_1 \rightarrow 1$ (рис. 1);

– если давление p_1 , а значит и плотность ρ_1 газа в фурме возрастает, то увеличиваются ε_2 и сила F_{12} при любой температуре t_1 (рис. 2);

– если плотность ρ_2 частиц растет, то увеличивается ε_1 , что естественно (рис. 3, б);

– если увеличить диаметр частиц δ , то при том же расходе порошка m_2 их количество и площадь поверхности трения, а поэтому и сила F_{12} снижаются, а скорость w_b растет (рис. 4);

– если форма частиц ближе к шару ($f \rightarrow 1$), то $k_f \rightarrow 1$ и сила $F_{12} \rightarrow F_{12\min}$ при любой температуре (рис. 5);

– если коэффициент скольжения $\psi \rightarrow 1$, то сила межфазного взаимодействия $F_{12} \rightarrow 0$, что не вызывает сомнений (рис. 6);

– если разность скоростей $\Delta w \rightarrow 0$, то сила $F_{12} \rightarrow 0$, что является фактором неоспоримым (рис. 7).

Тестовый анализ показал, что установленные в работе закономерности полностью соответствуют физическим представлениям.

Выводы. В металлургической практике впервые показано, что использование энергосберегающей технологии горячего ремонта футеровки путем нагрева газопорошкового потока в специальной гарнисажной торкрет-фурме вплоть до $t_1 = 600^\circ\text{C}$ в 2–15 раз изменя-

ет силу межфазного взаимодействия F_{12} в зависимости (в порядке их важности) от коэффициента формы частиц, концентрации порошка, давления несущего газа (азота), разности скоростей фаз, коэффициента скольжения, плотности порошка.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Нугуманов Р.Ф., Протопопов Е.В., Чернятевич А.Г. и др. // Изв. вуз. Черная металлургия. 2006. № 12. С. 7–12.
2. Харлашин П.С., Ларионов А.А., Харин А.К. и др. // Новые огнеупоры. 2010. № 7. С. 5–9.
3. Харлашин П.С., Харин А.К. // Изв. вуз. Черная металлургия. 2011. № 4. С. 9–12.
4. Харлашин П.С., Косолап Н.В., Куземко Р.Д. // Сталь. 2009. № 8. С. 12–16.
5. Чернятевич А.Г., Сигарев Е.Н., Шеремет В.А. и др. // Металлургическая и горнорудная промышленность. 2010. № 7. С. 134–137.
6. Харлашин П.С., Чемерис Н.О. // Металлургическая и горнорудная промышленность. 2009. № 1. С. 107–109.
7. Кузнецов Ю.М. Газодинамика процессов вдувания порошков в жидкий металл. – Челябинск: Металлургия, 1991. – 160 с.
8. Протопопов Е.В., Калимуллин Р.Ф., Чернятевич А.Г. и др. // Изв. вуз. Черная металлургия. 2012. № 10. С. 38–43.
9. Су Тяньсен // Черные металлы. 2003. № 5. С. 64–67.

© 2013 г. П.С. Харлашин, А.К. Харин, Р.Д. Куземко,
Р.Ф. Калимуллин, Е.В. Протопопов
Поступила 15 июля 2013 г.