

А. Н. ЛЕОНОВ, О. Л. СМОРЫГО,
М. М. ДЕЧКО, А. И. МАРУКОВИЧ,
НИИ ПОРОШКОВОЙ МЕТАЛЛУРГИИ С ОП

ОЧИСТКА ЛИТЬЯ ЧЕРЕЗ ПЕНОКЕРАМИЧЕСКИЕ ФИЛЬТРЫ — ЭФФЕКТИВНЫЙ СПОСОБ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА МЕТАЛЛА

УДК 621.762:621.74.045

Относительно высокая металлоемкость продукции отечественного машиностроения снижает ее конкурентоспособность на мировом рынке. Снижение металлоемкости машин и механизмов может быть достигнуто за счет использования металла высокого качества. Очевидно, что существенное повышение качества литья может быть достигнуто за счет внедрения новых высоких технологий, что потребует достаточно больших инвестиций. Поэтому проведение мероприятий по модернизации производства литья, не требующих больших затрат, но позволяющих повысить качество и уменьшить брак, актуально на сегодняшний день. Проблема повышения качества металла важна и для белорусских заводов и цехов по производству и переработке металла литьем, годовой объем которых составляет ~ 0,5 млн т.

Высокое качество металла при заданном химическом составе определяется в первую очередь низкой концентрацией неметаллических включений. Эффективным способом снижения концентрации

The article presents comparative analysis of various classes of sponge permeable materials according to their structural, hydrodynamic, physico-mechanical and filter characteristics. It is shown that foam-ceramic filters are most effective for rectification of metal alloys of nonmetallic inclusions.

неметаллических включений является очистка металлов и сплавов при литье с помощью пористых фильтров. При этом из расплава удаляются частицы футеровки, шлака, оксидные пленки и прочие включения. Уменьшая концентрацию газовых и твердых включений в отливке, фильтры обеспечивают повышение механической прочности, пластичности, ударной вязкости металла, снижение брака, увеличение выхода годного литья, снижение себестоимости продукции, способствуют экономии энергии и повышению производительности процесса [1—5].

На практике в качестве фильтрующих систем были опробованы свободно насыпанные слои спеченных гранул [6], плетеные керамические или стекловолоконные сетки [7], прессованные фильтры из формовочных смесей [8], фильтры из сотовой керамики [9] и пенокерамики [10—12]. Анализ научно-технической литературы показал, что в последние годы предпочтение в очистке жидкого металла отдается пенокерамическим фильтрам (ПКФ) [1—5, 10—12]. Преимущество ПКФ обусловлено особенностями структуры пенокерамики и может быть подтверждено сравнительным анализом структурных, прочностных, гидродинамических и фильтровальных свойств широкого класса пористых материалов.

Все пористые проницаемые материалы можно разбить на две группы: материалы с неорганизованной и организованной макроструктурой (рис. 1).

Первая группа состоит из пористых проницаемых порошковых и волоконных материалов, макроструктуры которых, несмотря на определенные статистические закономерности, образованы случайным расположением структурообразующих элементов (частицы или волокна). Проницаемые порошковые материалы (ППМ) имеют пористость 20—45% и размер пор 10—200 мкм [13], а проницаемые волоконные материалы (ПВМ) — соответственно 30—80% и 20—300 мкм [13].

Вторая группа состоит из сетчатых, ячеистых и сотовых пористых проницаемых материалов, макроструктуры которых организованы по заранее известному алгоритму. Проницаемые сетчатые мате-

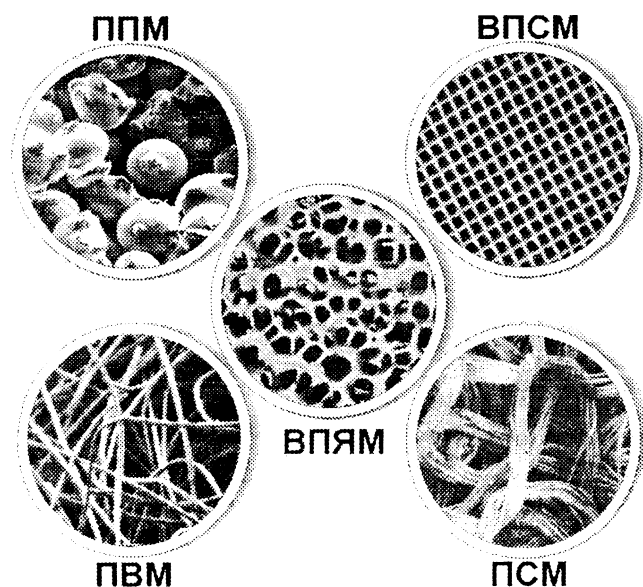


Рис. 1. Топография макроструктур различных классов проницаемых материалов

риалы (ПСМ), получаемые прессованием и спеканием заранее изготовленных сеток, являясь организованными волокновыми макроструктурами, обладают пористостью 20–80% и размером каналов 20–200 мкм [13]. Высокопроницаемые ячеистые материалы (ВПЯМ), получаемые дублированием ячеистых полимерных материалов путем нанесения на них неорганического покрытия с последующим спеканием, имеют пористость 75–97% и размер каналов 200–5000 мкм [12], а высокопроницаемые сотовые материалы (ВПСМ), получаемые экструдированием порошковых пластических масс через фильеру с последующей сушкой и спеканием, — соответственно 50–80% и 800–7000 мкм [14, 15].

На рис. 2 и 3 показаны диапазоны изменений структурных, гидродинамических и механических свойств пяти рассматриваемых классов материалов. Для выбора пористых проницаемых материалов, в

наибольшей степени пригодных для создания фильтров по очистке жидких металлов, сформулируем предъявляемые к ним требования.

Основные требования, которые предъявляются к фильтрующим системам подобного рода, это высокая коррозионная стойкость при высоких температурах и контакте с жидкими металлами, способность пропускать самотеком требуемое количество металла за относительно небольшое время (высокий коэффициент проницаемости), высокая адгезионная способность к неметаллическим включениям различного рода (высокая удельная поверхность и высокий коэффициент массообмена). На рис. 4 приведена типовая схема литья с использованием пористого фильтра. Опыт эксплуатации фильтров из разных пористых проницаемых материалов показывает, что при движении жидкого металла самотеком скорость линейной фильтрации составляет 0,05–0,1 м/с при высоте стояка 0,1–0,4 м. При вязкости металла $(1–5) \cdot 10^{-3}$ Па·с коэффициент проницаемости пористого материала должен находиться в интервале $10^{-9} – 10^{-8}$ м². Кроме того, прочность ПКФ должна исключать его разрушение с учетом динамического удара струи металла в начальный момент времени и поэтому предел прочности на изгиб пористого материала должен составлять 0,05–0,1 МПа при температуре заливки металла или 1–5 МПа при комнатной температуре.

На рис. 2 показано, что в области высокой пористости (более 60%) необходимой прочностью обладают волокновые, ячеистые, сетчатые и сотовые материалы. Однако из рис. 3 видно, что требуемой высокой проницаемостью обладают только два класса материалов — сотовые и ячеистые. Сочетание этих свойств предопределило преимущественное использование фильтров из ячеистых и сотовых материалов в практике литейного производства.

Для того чтобы ответить на вопрос, какие фильтры из двух отобранных классов материалов предпочтительнее, проанализируем их фильтровальные свойства. Следует отметить, что основная проблема очистки расплавов металлов заключается не столько в задержке неметаллических включений, размер

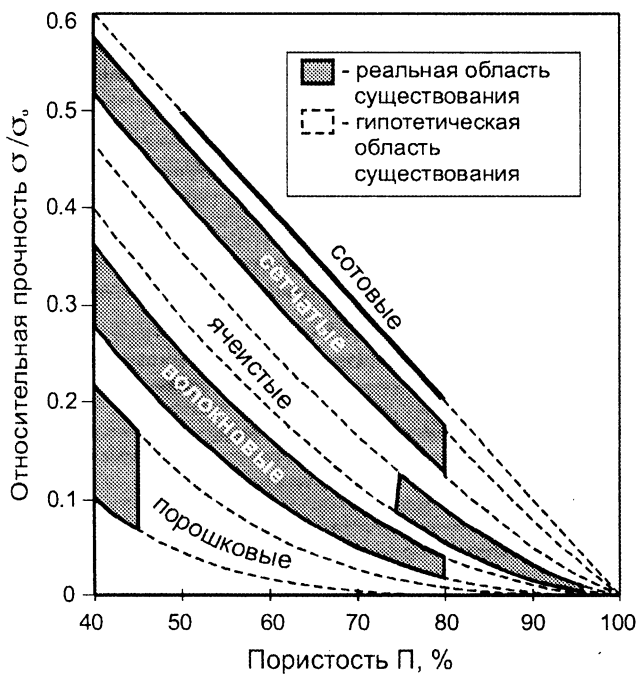


Рис. 2. Зависимость механической прочности различных классов пористых проницаемых материалов от пористости

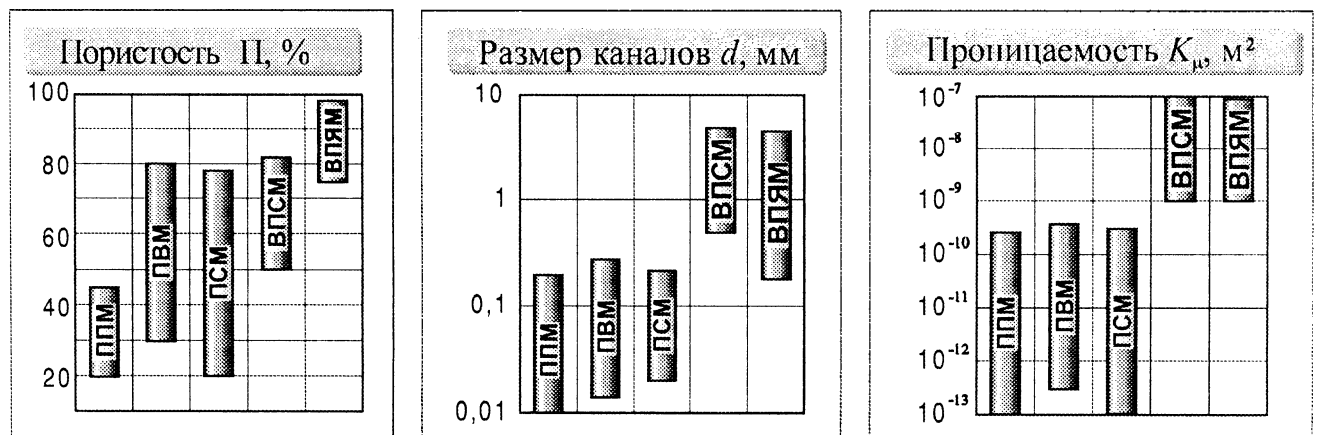


Рис. 3. Макроструктурные и гидродинамические свойства различных классов пористых проницаемых материалов

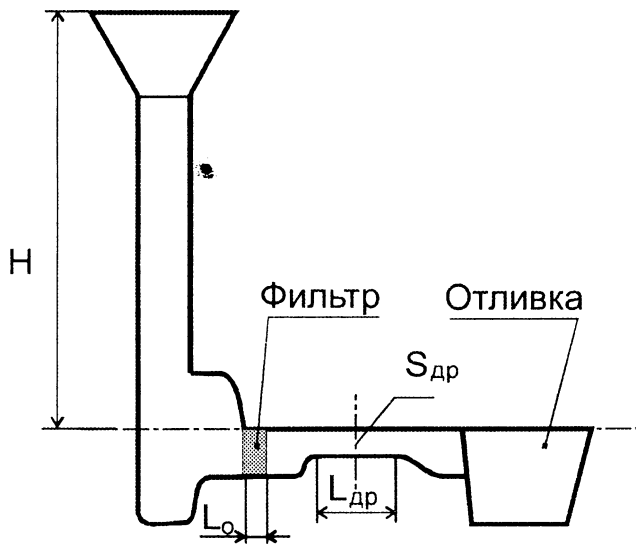


Рис. 4. Схема литья

которых больше размера пор (экранирующая фильтрация), сколько в задержке частиц, размер которых меньше размера пор фильтра (глубинная фильтрация). Механизм глубинной фильтрации реализуется в полной мере, когда режим движения жидкого металла в порах фильтра является переходным, а еще лучше турбулентным, так как при этих режимах вероятность столкновения примесных частиц с элементами внутренней структуры значительно выше, чем при ламинарном. Чем выше вероятность столкновения, тем выше коэффициент массообмена и вероятность прилипания примесной частицы к внутренней поверхности фильтра.

Величина коэффициента массопереноса при течении жидкостей и газов в пористых проницаемых структурах зависит от многих факторов. Наиболее существенными из них являются режим течения (ламинарный или турбулентный), линейная скорость, теплофизические параметры жидкости или газа (λ , μ , C_p , ρ), геометрическая форма и размеры каналов [16]. Интенсивность процессов массообмена между потоком жидкости и поверхностью фильтра характеризуется критерием Нуссельта (Nu), который для различных режимов течения для широкого спектра геометрических конфигураций каналов можно оценить по следующим формулам [16]:

для ламинарного режима

$$Nu = k_l Re^{1/2} Pr^{1/3}, \quad (1)$$

для турбулентного режима

$$Nu = k_t Re^{0,8} Pr^{0,4}, \quad (2)$$

где Re , Pr — соответственно критерии Рейнольдса и Прандтля; k_l , k_t — коэффициенты, зависящие от геометрической конфигурации каналов.

Для анализа фильтровальных свойств сотовых и ячеистых материалов полезно привести результаты исследований по фильтрации газов. В работе [17] отмечено, что в каналах сотовой структуры даже при высоких скоростях газового потока 5—10 м/с (критерий Рейнольдса $Re \sim 10^2$ — 10^3) реализуется

ламинарный режим течения. В материалах ячеистой структуры турбулизация газового потока начинается уже со скорости 0,05 м/с [18]. В работе [19] экспериментально показано, что условия тепло-массопереноса в ячеистых материалах значительно лучше по сравнению с сотовыми. Для $Re \sim 10^2$ — 10^3 критерий Нуссельта для ячеистых материалов в 3—4 раза больше, чем для сотовых, и, следовательно, во столько же раз больше коэффициент массообмена.

После анализа данных по фильтрации газов рассмотрим процесс фильтрации жидких металлов через пористые среды. Оценим величину критерия Nu для ВПСМ и ВПЯМ при течении через них, например жидкого чугуна. Из справочника [20, с. 312] при температурах 1300—1400°C для железа и его сплавов $C_p \approx 700$ Дж/(кг·К); $\lambda \approx 35$ Вт/(м·К); $\rho \approx 7600$ кг/м³; $\mu \approx 3 \cdot 10^{-3}$ Па·с (при 1380°C). Для ВПСМ и ВПЯМ характерный гидравлический радиус каналов составляет величину $\sim 10^{-3}$ м, поэтому при скоростях фильтрации жидкого металла 0,05—0,1 м/с критерий Рейнольдса равен 125—250, а критерий Прандтля $\approx 0,06$. При ламинарном режиме течения величина $Re^{1/2} Pr^{1/3} \approx 4,4$ — $6,2$ (уравнение (1)), тогда как при турбулентном режиме величина $Re^{0,8} Pr^{0,4} \approx 15,4$ — $26,9$ (уравнение (2)), т. е. при турбулентном режиме критерий Нуссельта в 3,5—4,3 раза выше, чем при ламинарном (в предположении, что коэффициенты k_l и k_t , зависящие от формы каналов, для сотовой и ячеистой структур различаются незначительно). Во столько же раз можно ожидать улучшение и фильтровальных свойств пористых проницаемых материалов при турбулентном режиме течения жидкого металла по сравнению с ламинарным.

Поэтому для решения вопроса о соотношении фильтровальных свойств материалов с сотовой или ячеистой структурой необходимо установить, какой

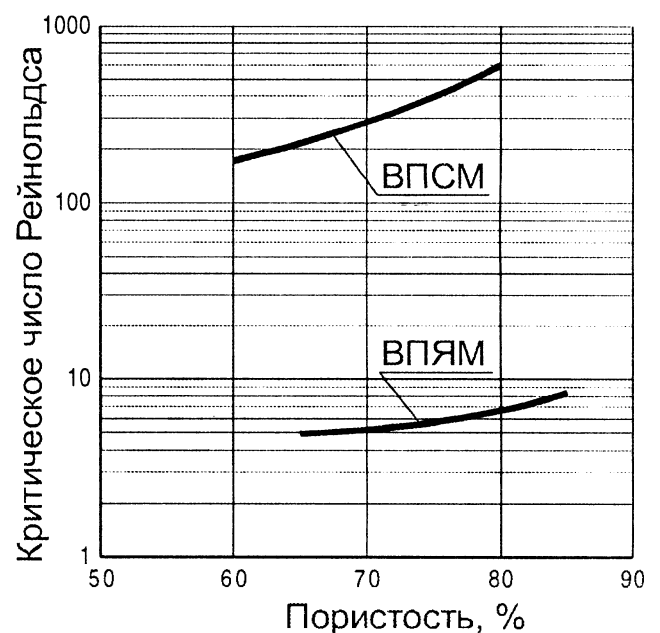


Рис. 5. Критическое значение числа Рейнольдса в зависимости от пористости для ВПСМ и ВПЯМ

режим течения жидких металлов реализуется в них на практике. Известно, что тот или иной режим течения жидкости определяется нижним критическим числом Рейнольдса $Re_{кр}$. При $Re < Re_{кр}$ возможен только ламинарный режим, а при $Re > Re_{кр}$ реализуется сначала переходной, а потом турбулентный режим. На рис. 5 приведен рассчитанный нами $Re_{кр}$ для материалов с сотовой и ячеистой структурами. Так как при литье жидких металлов числа Рейнольдса лежат в диапазоне 30—250 (зависит от вязкости и плотности жидкого металла), то в ячеистых материалах с пористостью 70—80% всегда реализуется турбулентный режим ($Re_{кр} = 5-7$), а в сотовых материалах — всегда ламинарный ($Re_{кр} = 300-700$).

Следовательно, фильтровальные свойства ВПЯМ при одних и тех же числах Рейнольдса выше, чем для ВПСМ. Приведенные расчеты качественно подтверждаются схемой, изображенной на рис. 6. Из рисунка видно, что арочно-лабиринтная структура ячеистого материала предопределяет более высокую вероятность столкновения частиц неметаллических включений с развитой поверхностью фильтра по сравнению с прямоточными каналами сотового материала. На практике увеличение коэффициента внешнего массообмена позволяет не только повышать эффективность фильтрации, но и уменьшать объем фильтра (стоимость) без уменьшения производительности процесса.

Особо следует отметить, что если в самом фильтре турбулентный режим течения жидкого металла положительный фактор, то для получения отливок высокого качества поток металла после фильтра в питателе должен быть ламинарным. В противном случае вымывание частиц земляной формы и образование пены значительно увеличат концентрацию неметаллических включений в отливке. Уменьшение скорости жидкого металла на выходе из фильтра и увеличение критического числа Рейнольдса для питателя способствуют установлению в питателе ламинарного режима течения.

Поэтому, если по механическим и гидродинамическим свойствам ВПЯМ и ВПСМ не имеют преимущества друг перед другом, то по фильтровальным свойствам ВПЯМ имеют значительное преимущество перед ВПСМ. Высокая проницаемость

ВПЯМ обеспечивает высокую скорость фильтрации вязкого металла при самотеке, т. е. при небольшом перепаде давления, а реализация механизма глубокой фильтрации благодаря турбулизации потока металла в арочно-лабиринтной структуре пенокерамики обеспечивает высокую тонкость очистки, задерживая примеси, размер которых на 1—2 порядка меньше собственных размеров пор [4]. Коэффициент внешнего массообмена, пропорциональный критерию Нуссельта, имеет высокое значение только для ячеистых пеноматериалов [19]. Эффективность применения ПКФ для очистки расплавов металлов от неметаллических включений обусловлена прежде всего силами адгезии (хорошая смачиваемость, большая удельная поверхность), а также высокой вероятностью столкновения частиц неметаллических включений с развитой поверхностью фильтра, что предопределяется арочно-лабиринтной структурой пенокерамики (высокий коэффициент внешнего массообмена).

Таким образом, из большого разнообразия высокопористых материалов только пенокерамика обладает высокими значениями прочности, проницаемости и коэффициента внешнего массообмена одновременно.

Эффективное применение ПКФ для очистки расплавов металлов обусловлено не только структурой, но и составом материала. Материал фильтра — керамика обеспечивает его работоспособность в экстремальных условиях (высокие температуры, агрессивные среды). Высокая коррозионная стойкость, жаростойкость, жаропрочность, прочность, большие запасы относительно дешевого природного сырья делают керамику незаменимой для прикладных задач металлургии.

В последнее время в литейном производстве ПКФ из различных материалов ($Al_2O_3-SiO_2$, Al_2O_3 , $Al_2O_3-ZrO_2$, SiC, $ZrSiO_4$ и др.) производят фирмы Fosoco (Англия), Drache (Германия), Hi-Tech (США) и др., в странах СНГ — НИИ Стройкерамика (Москва) [11] и РИТЦ ПМ (Пермь) [21]. Технология получения ПКФ, основанная на дублировании структуры ячеистого пенополиуретана (ППУ), включает в себя следующие основные операции: нарезку

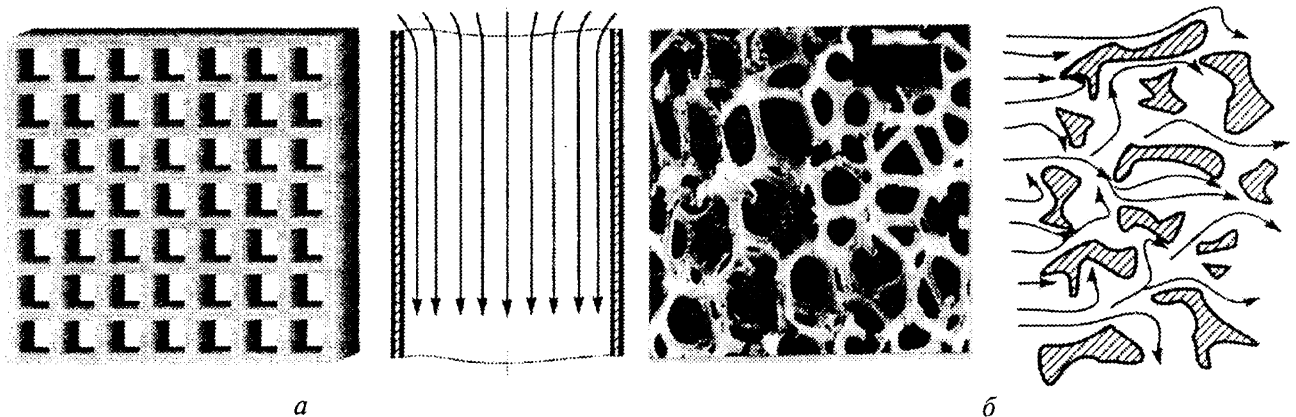


Рис. 6. Характер массообмена в сотовых (а) и ячеистых (б) материалах

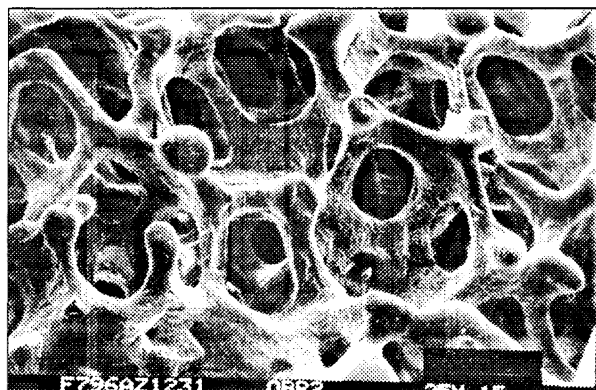


Рис. 7. Структура пенокерамики

ППУ, приготовление керамической суспензии, пропитку ППУ-каркаса керамической суспензией, удаление излишков суспензии (отжимом в валках или центрифугированием), сушку, спекание [12]. Указанная технология дает возможность получать ПКФ с арочно-лабиринтной структурой (рис. 7) и физико-механическими свойствами, которые приведены в таблице.

Использование ПКФ дает наибольший эффект при производстве фольги и крупногабаритных тонкостенных и ответственных деталей [22, 23]. Например, производство фольги с толщиной 20–30 мкм в принципе невозможно без фильтрующих систем, задерживающих неметаллические примеси, соизмеримые и превышающие толщину фольги. При производстве тонкостенных крупногабаритных и ответственных деталей, стоимость фильтров несоизмеримо меньше стоимости самого изделия. В индустриально развитых странах, где достаточно жесткие требования по качеству, ПКФ используются даже на серийных линиях по производству таких массовых отливок, как головки блоков цилиндров, крышки и картеры коробок передач, впускные коллекторы автомобилей и т. п. Применение ПКФ позволило в некоторых случаях существенно снизить массу литниковой системы, поскольку стала возможна прямая заливка металла в форму через прибыль [24].

К сожалению, внедрение ПКФ для массового применения в отечественное производство сдерживается относительно высокой себестоимостью и несоответствием полученных потребительских свойств требуемому комплексу эксплуатационных параметров. Однако растущие требования к каче-

ству продукции отечественной металлургии делают актуальными работы, направленные на разработку, изготовление и внедрение ПКФ с оптимальным комплексом свойств с пониженной стоимостью в практику металлургических цехов и заводов. Тем не менее, очевидно, что современные условия выхода на мировые рынки с их традиционно высокими требованиями к качеству продукции и неизбежное повышение цен на сырьевые и энергетические ресурсы рано или поздно вынудят производителей Беларуси серьезно заниматься внедрением передовых технологий, в том числе ПКФ для очистки литья.

В НИИ порошковой металлургии (г. Минск) разработана технология получения пенокерамических фильтров, создано опытное производство мощностью 5 м³ пенокерамики в год. На рис. 8 показаны образцы выпускаемых изделий из пенокерамики. Так как основным фактором, влияющим на внедрение ПКФ, являются качество и стоимость, в НИИ ПМ с ОП разработана и внедрена программа проектирования оптимальных технологий получения ПКФ [25]. В основу программы положено решение оптимизационной задачи, основанной на построении критерия работоспособности ПКФ, отражающего взаимосвязь между физико-механическими свойствами фильтра и эксплуатационными параметрами и целевую функцию, выражающую главный экономический критерий — минимальную себестоимость ПКФ. В результате с учетом требований по конкретной отливке и специфике литниковой системы рассчитываются оптимальные структурные параметры и габаритные размеры фильтров, которые обеспе-

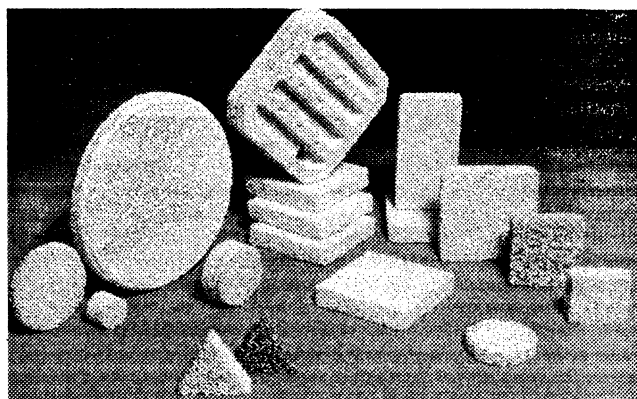


Рис. 8. Образцы изделий из пенокерамики

Физико-механические свойства ПКФ

Параметр	Обозначение	Значение
Пористость, %	П	75–90
Плотность, г/см ³	ρ	0,4–0,8
Период ячеистой структуры, мм	l_0	0,8–5
Удельная поверхность, м ⁻¹	S_V	500–3600
Предел прочности при изгибе при 20 °С, МПа	$\sigma_{изг}$	1–5
Вязкостный коэффициент проницаемости, м ²	K_μ	10 ⁻⁹ –10 ⁻⁷
Инерционный коэффициент проницаемости, м	K_ρ	10 ⁻⁴ –10 ⁻²

чивают требуемые степень очистки литья, время заливки и механическую прочность при минимальной стоимости фильтров.

В Республике Беларусь на ряде предприятий (МТЗ, МАЗ, ОАО "МЗОО", ЛЛМЗ, НП РУП "Институт БелНИИлит") происходит постепенное освоение ПКФ, выпускаемых опытным производством НИИ порошковой металлургии. ПКФ были использованы для производства отливок из серого чугуна и алюминия. Анализ научно-технической литературы и собственный опыт авторов показали, что эффективность применения ПКФ обусловлена не только правильным выбором его параметров (толщина, площадь фильтра, размер пор, макропористость), а также расположением фильтра в литниковой системе. На практике подбор параметров ПКФ предопределяется рядом требований, связанных с параметрами конкретной отливки: масса отливки, время заливки, допустимый перепад давления, степень загрязненности металла, требуемый коэффициент очистки. Что касается положения фильтра в форме, то общепринятым является размещение ПКФ как можно ближе к рабочей полости формы.

Результаты проведенных испытаний показали, что использование ПКФ (при условии правильного подбора параметров ПКФ и выбора места их установки в литейную форму) позволяет устранить засор чугунных отливок и в 2,5—3,5 раза снизить уровень литейного брака, выявляемого после обработки в дробеметном барабане. Наилучшие результаты были получены при использовании ПКФ с размером пор 15—20 ррi (число пор на линейный дюйм) при установке фильтров на входе в шлаковики. Общий брак в этом случае был снижен в 1,4—1,5 раз.

В НП РУП "Институт БелНИИлит" были проведены испытания ПКФ для очистки вторичного сложного легированного сплава АК12ММгН [26]. Очистка расплава при переливе из плавильной печи в раздаточную позволила добиться снижения газовой пористости с 3 до 1 балла и уменьшения загрязненности оксидными включениями по Добаткину с 0,25 до 0,05 мм²/см². Прочность металла на растяжение повысилась со 145 до 170 МПа. Этот же сплав использовали без рафинирования для получения деталей типа "поршень" литьем в кокиль. Установка ПКФ с размером пор 15—20 ррi в специально рассчитанное гнездо на дне стояка обеспечила получение отливок требуемого качества: с пористостью не выше 1—2 балла и содержанием неметаллических включений до 0,1 мм²/см². Годные отливки также были получены при прямой заливке (фильтр установлен в прибыли). Выход годного металла повышался на 0,35 кг при полной массе отливки 3,5 кг.

Несмотря на положительные результаты, следует отметить, что объемы внедрения пенoкерамических фильтров в практику литейного производства явно недостаточны. В индустриально развитых странах доля литья, подвергаемого очистке с помо-

щью пенoкерамических фильтров, составляет не менее 50%. Опыт внедрения ПКФ в литейные цеха белорусских заводов показал, что внедрение пенoкерамических фильтров, с нашей точки зрения, целесообразно проводить в три этапа: первый этап — внедрение пенoкерамических фильтров на действующие линии литья без изменения общей компоновки литниковой системы. Цель этапа — оптимизация структурных параметров и габаритных размеров ПКФ для повышения качества, уменьшения брака и снижения себестоимости отливок за счет снижения концентрации неметаллических включений. Второй этап — модернизация литниковых систем с учетом потенциальных возможностей пенoкерамических фильтров. Цель этапа — повышение выхода годного литья и снижения энергетических и материальных затрат при сохранении требуемого качества металла и низкого уровня брака. Третий этап — оптимизация габаритных размеров и массы отливок. Цель этапа — снижение металлоемкости изделий за счет повышения качества литья (прочности, пластичности, ударной вязкости).

Литература

1. Brockmeyer J. W., Aubrey L. S. Application of Ceramic Foam Filter in Molten Metal Filtration // *Ceram. Eng. Sci. Proc.* 1987. Vol. 8. N. 1—2. P. 63—67.
2. Хаммершмид П., Янке Д. Удаление неметаллических включений фильтрованием расплавов стали // *Черные металлы.* 1988. № 5. С. 16—25.
3. Возможности фильтрующего рафинирования металлов и требования к огнеупорным фильтрам / А. С. Кондратьев, В. Н. Попов, Л. М. Аксельрод и др., // *Огнеупоры.* 1990. № 7. С. 13—19.
4. Суворов С. А., Тебурев Н. Б. Моделирование процесса фильтрации расплавов металлов // *Огнеупоры,* 1991. № 9. С. 17—20.
5. Староверов Ю. С., Чернов Ю. А. Применение пенoкерамических фильтров в литейном и сталеплавильном производстве за рубежом // *Огнеупоры.* 1992. № 1. С. 38—40.
6. Иванченко Л. Г. Классификация фильтров для рафинирования металлов // *Огнеупоры.* 1991. № 2. С. 28—29.
7. Removal of Non-metallic Inclusions by Ceramic Filter / Yamada K., Watanabe T., Fukuda K. et. al. // *Transactions of the Iron and Steel Inst. of Japan,* 1987. V. 27. N. 11. P. 875—877.
8. Девон Х., Хибель Д., Ришар М. Техника фильтрования и способы обработки при литье алюминия // *Giesserei-Rundschau.* 1990. Vol. 37. N. 11/12. P. 5—11.
9. Day P., Kind H. Filtration of Irons with Cellular Ceramic Filters // *Modern Casting,* 1984. P. 40—42.
10. Пат. США 3090094. Метод изготовления образцов из пористой керамики. Оpubл. 21.05.63.
11. Фильтрующая пенoкерамика для расплавов цветных металлов / Е. Н. Веричев, Б. С. Черепанов и др. // *Тр. НИИ Стройкерамика,* 1987. № 60. С. 85—91.
12. Леонов А. Н., Сморгыо О. Л., Шелег В. К. Высокопористая проницаемая керамика. Мн.: АНК "ИТМО им. А. В. Лыкова" АН Беларуси, 1995.
13. Пористые проницаемые материалы: Справ. / Под ред. С. В. Белова М.: Металлургия, 1987.
14. Блочные носители и катализаторы сотовой структуры // *Сб. науч. тр. / Под ред. З. Р. Исмагилова,* Новосибирск: ИК СО АН СССР, 1990.
15. Блочные носители и катализаторы сотовой структуры // *Сб. науч. тр. / Под ред. З. Р. Исмагилова,* Новосибирск: ИК СО РАН, 1992.
16. Теория тепломассообмена: Учебн. пособие для вузов / Под ред. А. И. Леонтьева М.: Высш. шк., 1979.

17. Носков А. С., Загоруйко А. Н. Теоретические основы обезвреживания газовых выбросов на сотовых катализаторах // Тезисы междунар. семинара: Блочные носители и катализаторы сотовой структуры. С.-Петербург. 1995. Ч. I. С. 57—61.

18. Шапошников М. И. Экспериментальное исследование фильтрации жидкостей и газов в высокопористых ячеистых материалах: Дис... канд. техн. наук: Пермь. 1990.

19. Теплоперенос в слое блочных каталитических носителей / Д. В. Саулин, И. С. Пузанов, А. А. Кетов, С. В. Островский // Журн. прикладной химии. 1998. Т. 71. № 2. С. 276—282.

20. Зиновьев В. Е. Теплофизические свойства металлов при высоких температурах: Справ. М.: Металлургия. 1989.

21. Влияние материала пенoкерамического фильтра на микроструктуру дюралюмина / В. Н. Анциферов, С. Е. Порозова, Л. В. Никулин и др. // Огнеупоры и техническая керамика, 1997. № 7. С. 11—14.

22. Stamper J. M. The Filtration of Steel Castings with Ceramic Foam Filter // Refratt. e later. 1987. Vol. 12. N 6. P. 294—296.

23. Kendrick R., Hack J. A. The Practical Application of Ceramic Foam Filters to Nonferrous Metals // Foundryman. 1988. N 5. P. 228—251.

24. Stanford P., Kendrick R. The elimination of conventional running systems in aluminium sand and gravity die-casting foundries. // The Foundryman, 1990. Vol. 83. № 6. P. 262—267.

25. Леонов А. Н., Дечко М. М. Теория проектирования пенoкерамических фильтров для очистки расплавов металлов // Огнеупоры и техническая керамика, 1999. № 12. С. 14—20.

26. Применение пенoкерамических фильтров при получении отливок из вторичных алюминиевых сплавов / А. А. Андрушевич, А. Н. Леонов, М. М. Дечко и др. // Литейное производство, 1998. № 5. С. 18—20.

Penoker

High Temperature Ceramic Foam
for Filtration and Catalysis

