

К. т. н. **В. И. Матюхин**¹ (✉), **С. Н. Фокин**², к. т. н. **А. В. Матюхина**¹,
Н. В. Ямшанова¹, к. т. н. **Е. В. Киселев**¹

¹ ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет»,
Екатеринбург, Россия

² ООО «Гражданпроект», г. Первоуральск Свердловской обл.,
Россия

УДК 66.041.55:[621.74.04:666.193.03

ОСОБЕННОСТИ ПЕРЕВОДА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРОХОДНЫХ ПЕЧЕЙ ДЛЯ ТЕРМООБРАБОТКИ КАМНЕЛИТЫХ ИЗДЕЛИЙ НА ГАЗОВОЕ ОТОПЛЕНИЕ

Окончательное формирование качественных показателей камнелитых образцов происходит на стадии термообработки в нагревательных печах, состоящих из двух туннельных печей: сушильно-прокалочной для подготовки литейного оборудования к заливке жидким расплавом и кристаллизационно-отпускной для снятия внутренних напряжений в структуре отливок. Для перевода электрической сушильно-прокалочной печи на газовое отопление необходимо установить: шесть скоростных горелочных устройств типа Вихрь 25 СВ-5, входной и выходной тамбуры, отбор газов из печи, рекуператор для подогрева воздуха на горение и систему воздухопроводов. В зоне кристаллизации необходимо снизить высоту свода до 100 мм от залитых изделий с равномерным размещением электрических нагревателей по всей длине зоны, а на внешнюю поверхность зоны кристаллизации установить дополнительную теплоизоляцию из волокнистых плиточных материалов толщиной не менее 50 мм. В зоне отжига предусматривается подача холодного воздуха от отдельного вентилятора с расходом до 1400 м³/ч при давлении не менее 421,49 Па через поперечный коллектор и восемь распределенных фурм с отсечными шиберами. Такое изменение конструкции комплекса туннельных печей при сохранении качества получаемой продукции сопровождается более эффективным использованием тепла с возможностью повышения теплового КПД в 3,28 раза, увеличением общих энергозатрат на 22,58 % и образованием дополнительного объема сбрасываемых газов не более 4000 м³/ч с температурой не выше 150 °С.

Ключевые слова: камнелитые изделия, сушильно-прокалочная и кристаллизационно-отпускная туннельные печи, комбинированное отопление, тепловой КПД, энергозатраты.

Одним их наиболее эффективных способов экономии металла при работе технологического оборудования для транспортировки дисперсных материалов в условиях интенсивного абразивного износа, а также высоких температур и давлений является расширенное применение каменного литья [1]. Значительные запасы сырья в сочетании с относительно низкими экономическими затратами для его производства позволяют существенно повысить экономическую эффективность большинства высокоэнергетических предприятий.

Двухстадийное производство камнелитых изделий [2] предусматривает первоначальное получение минерального расплава в высокотемпературных плавильных печах и заливку его в форму. Окончательное формирование качественных по-

казателей литых образцов достигается на стадии термообработки в нагревательных печах камерного или проходного типа при снятии внутренних напряжений в их структуре [3]. От эффективности работы этих агрегатов в значительной степени зависит экономика всего технологического процесса. Наиболее часто для реализации технологии термообработки камнелитых изделий используется электрическая энергия.

На Первоуральском заводе ремонта горного оборудования — единственном предприятии России, где производят камнелитые изделия установлен блок туннельных агрегатов для термообработки камнелитых плиток. Блок включает сушильно-прокалочную и кристаллизационно-отжиговую печи. Обе печи объединены по технологическому принципу, согласно которому исходные тележки с песчаной подушкой и размещенными на них металлическими поддонами с земляными формами проходят первоначально через сушильно-прокалочную печь для удаления избыточной физической влаги и тепловой подготовки форм к заливке в них минерального расплава. Печь имеет общую длину 14 м, ширину прохода 1250 мм, общую высоту прохода



В. И. Матюхин

E-mail: matyhin53@mail.ru

1600 мм. Основанием для высокотемпературной части печи служит металлический тележечный конвейер, на поверхности которого устанавливаются открытые земляные формы. Тележки в рабочем пространстве размещаются встык друг к другу и перемещаются с помощью механического толкателя, привод которого находится на выходе из печи. Общая мощность электрической части печи 280 кВт, максимальная температура термообработки садки 600 °С, длительность сушки и прокаливания 2,5 ч. Далее тележки и формы, подготовленные к заливке минерального расплава, с помощью манипулятора поступают в кристаллизационно-отжиговую туннельную печь, в которой минеральный расплав с температурой около 1400 °С заливается в формы. Дальнейшая термообработка залитых образцов совместно с тележками, поддонами и земляными формами осуществляется в двух технологических зонах, разделенных сводовым шибером: в зоне кристаллизации длиной 5 м и в зоне отжига длиной 27 м.

Максимальная температура кристаллизатора, обеспечивающая формирование мелкодисперсной структуры камнелитых изделий, ограничивается 820–850 °С и поддерживается электрическими нагревателями, расположенными на боковой поверхности рабочего пространства рекристаллизационной зоны. Общая мощность нагревателей составляет 160 кВт. После завершения кристаллизации (1,25 ч) нагретые тележки с залитыми формами перемещаются в зону отжига. Температура в рабочем пространстве зоны отжига поддерживается за счет организованного отбора теплоты потоком холодного воздуха при естественной конвекции с окружающей средой и изменяется в пределах от 650 до 100 °С. Общая продолжительность термообработки изделий в печи составляет 8 ч с обеспечением общей производительности по каменному литью 2500 кг/ч.

Электрический обогрев комплекса туннельных печей характеризуется нерациональным распределением подведенной к технологическим агрегатам тепловой энергии. Результаты

исследования теплового баланса этого комплекса оборудования показали (табл. 1), что основной статьей прихода тепла сушильно-прокалочной печи является электрическая энергия, доля которой в общем приходе тепла достигает 280 кВт. Вместе с ней дополнительное тепло поступает с обратными тележками (39,44 кВт). Значительная длина теплового агрегата и существенная продолжительность термообработки комплекта литейного оборудования перед заливкой минерального расплава создают глубокий подогрев транспортных тележек до 200 °С, металлических поддонов до 475 °С, земляных форм до 577 °С. Ограниченные тепловые потери в окружающую среду от футеровки печи обеспечивают высокий тепловой КПД этого агрегата (не менее 55 %).

Разогретые тележки, поддоны и земляные формы с помощью манипулятора перемещаются в рабочее пространство кристаллизационно-отжиговой печи, обеспечивая приход 153,45 кВт тепла, а заливка минерального расплава формирует дополнительный источник тепла в количестве 119,1 кВт.

Для создания заданных температурных условий термообработки литейного оборудования и изделий в зону кристаллизации подается также дополнительное тепло в количестве до 160 кВт от электрических нагревателей, расположенных на внутренней поверхности печи. Значительный общий запас тепла, поступающего в зону, и требование технологии к формированию мелкокристаллической структуры камнелитых изделий обеспечиваются тепловой выдержкой комплекта тележек, поддонов, земляных форм и изделий со значительной потерей тепла в окружающую среду (до 190,36 кВт) в течение 1,25 ч. Остальная часть тепла с изделиями и вспомогательным оборудованием поступает в зону отжига.

Тепловая работа комплекта туннельных печей, отапливаемых только электричеством, характеризуется значительным приходом тепла (280 + 160 = 440 кВт), физическим теплом минерального расплава (119,1 кВт) и физическим теплом тележек, поддонов и форм (39,44 кВт).

Таблица 1. Сводный тепловой баланс электрического печного комплекса для подготовки и отжига камнелитых изделий

Приход тепла			Расход тепла		
Статья	кВт	%	Статья	кВт	%
1. Электрическая энергия для отопления:			1. Физическое тепло тележек, поддонов и изделий	84,42	14,10
сушильно-прокалочной печи	280	46,78	2. Физическое тепло горячего воздуха	145,21	24,26
зоны кристаллизации	160	26,73	3. Затраты тепла на испарение влаги из формы	84,20	14,07
Сумма	440	73,51	4. Потери тепла в окружающую среду:		
2. Физическое тепло расплава	119,1	19,90	через боковые стенки	232,67	38,87
3. Физическое тепло тележек, поддонов и форм	39,44	6,59	через торцевые заслонки	52,04	8,70
			Сумма	284,71	47,57
Итого приход тепла	598,54	100,0	Итого расход тепла	598,54	100,0

При наличии существенных источников тепловых потерь в окружающую среду через боковые стенки, через торцевые заслонки и с оборудованием ($232,67 + 52,04 + 84,42 = 369,13$ кВт, или 61,64 %) в нем присутствует ряд неорганизованных источников тепла в виде горячего воздуха (145,21 кВт, или 24,26 %), который также теряется в окружающую среду. Часть физического тепла возвратного оборудования (39,44 кВт) возвращается на вход сушильно-прокалочной печи. Суммарный тепловой КПД комплекта оборудования туннельных печей при отоплении электричеством составляет не более 14,07 %.

Одним из эффективных способов снижения экономических затрат для производства литых изделий и их отжига является перевод системы отопления туннельных печей на природный газ [4]. Экономические расчеты показывают, что при сметной стоимости замены оборудования около 4,5 млн руб. итоговая экономия эксплуатационных затрат составит более 13 млн руб.

Результаты предварительного теплового расчета туннельных печей позволили предложить комбинированный вариант перевода электрических печей на газовое отопление. При этом были предусмотрены следующие возможности:

- создание гибкого управления тепловым режимом сушильно-прокалочной печи с использованием газового отопления при минимизации тепловых потерь с отходящими газами;

- модернизация электрического отопления зоны кристаллизации печи для повышения эффективности и гибкости управления;

- создание условий для управляемого охлаждения тележек, поддонов, форм и изделий в зоне отжига;

- минимизация тепловых потерь в окружающую среду с поверхностей туннельных печей;

- обеспечение установкой необходимого набора КИП.

Предлагаемая схема организации термообработки камнетитых изделий (см. рисунок) начинается с размещения тележек с поддонами и сырыми земляными формами 1. Тележки поступают на вход сушильно-прокалочной печи 4 через тамбур шириной 400 мм для минимизации выбиваний газов и подсосов холодного воздуха. Навстречу нагреваемым изделиям движется горячий теплоноситель от шести горелочных устройств 7 типа Вихрь 25 СВ-5, установленных на боковой стороне печи в шахматном порядке со стороны выхода нагретых элементов садки. При сжигании в горелках $40,68$ м³/ч природного газа с воздухом, поступающим от вентилятора 8 в количестве 2010 м³/ч с температурой 184 °С через подогреватель рекуператорного типа 21 на распределительные коллекторы 6, формируется тепловой поток газов с температурой около 650 °С. Отработанные в сушильно-прокалочной печи газы с избыточной температурой около 310 °С собираются в сборном поперечном коллекторе 2 и

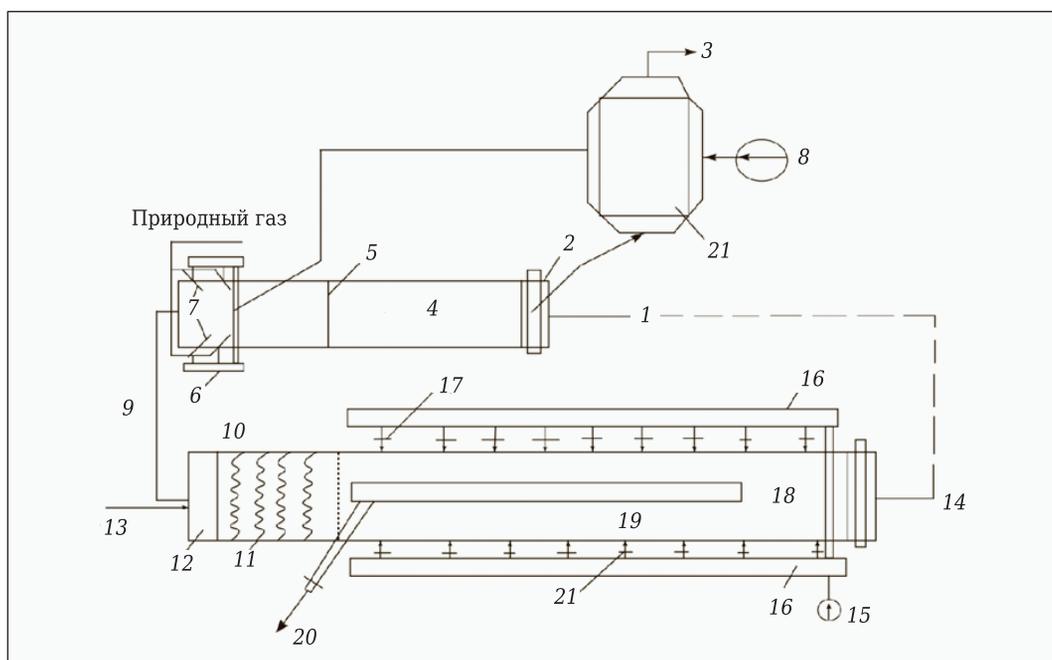


Схема модернизации туннельных печей: 1 — подача тележек с поддонами и формами; 2 — сборный коллектор газов из сушильно-прокалочной печи; 3 — отсос газов; 4 — сушильно-прокалочная печь; 5 — вертикальный разделительный шибер; 6 — распределительный коллектор воздуха на горение; 7 — горелочные устройства; 8 — подача вентиляторного воздуха; 9 — передача тележек; 10 — рекристаллизационная зона; 11 — электронагреватели; 12 — тамбур; 13 — заливка расплава; 14 — выход охлажденных тележек с поддонами, формами и изделиями; 15 — подача охлаждающего воздуха; 16 — распределительный коллектор воздушного дутья с шиберами; 17 — воздушные фурмы; 18 — сборный коллектор горячего воздуха; 19 — зона отжига; 20 — сброс горячего воздуха; 21 — рекуператор

отводятся через теплообменник рекуператорного типа с площадью теплообменной поверхности около 170 м² в атмосферу с температурой около 150 °С при помощи дымососа типа ВЦ4-75-5 в рассеивающую трубу 3.

Нагретые в сушильно-прокалочной печи до 200 °С тележки массой 500 кг с поддонами массой 147,2 кг (~475 °С) и земляными формами массой 160 кг (~577 °С), обладая физическим теплом 153,45 кВт, поступают через передаточный конвейер 9 и заливочный тамбур 12 в рекристаллизационную зону 10 кристаллизационно-отжиговой печи. Здесь в земляные формы заливается минеральный расплав 13 с температурой около 1400 °С в количестве около 2500 кг/ч с общим приходом тепла 119,1 кВт. Заданная температура 850–900 °С поддерживается в этой зоне с помощью электрических нагревателей 11 тепловой мощностью 160 кВт. Для создания наиболее благоприятных условий теплопередачи [4] нагреватели располагаются параллельно поверхности камнелитых изделий на расстоянии от них не менее 100 мм. После частичной рекристаллизации расплава тележки с изделиями поступают в зону отжига 19. Для регламентированного охлаждения изделий в рабочем пространстве зоны подается холодный воздух от вентилятора 15 в распределительные коллекторы 16 и через фурмы с регулирующими шиберами 17. После охлаждения изделий в противоточном режиме горячий воздух собирается через сводовые патрубки в сборный коллектор 18, из которого поступает на утилизацию 20. Охлажденные тележки с поддонами, земляными формами и изделиями поступают из печи для доохлаждения и разборки. Для улучшения процесса теплопередачи излучением от электрических нагревателей к формам и изделиям по результатам расчета лучистого теплообмена было установлено минимальное расстояние между ними 100 мм.

В зоне кристаллизации образуется несколько источников вторичных тепловых ресурсов: физическое тепло тележек, форм, прокладок и камнелитых изделий (232,67 кВт), утилизацию которых можно осуществить только через стадии отжига изделий и охлаждения транспортируемых материалов (190,36 кВт), и тепловые потери теплопроводностью через торцевые заслонки (52,04 кВт).

На выходе из зоны отжига элементы садки будут иметь повышенный нагрев: тележки со средней температурой 121 °С, формы с температурой 38 °С, изделия с температурой 30 °С, поддоны со средней температурой 33 °С, а также горячий воздух со средней температурой около 300 °С. Отвод горячего воздуха из зоны отжига производится через 8 сводовых отверстий диаметром 150 мм, расположенных равномерно по длине зоны. Каждый отвод имеет регулировочный шибер. Наружная поверхность зоны отжига

должна предусматривать дополнительную теплоизоляцию в виде волокнистой плиты толщиной 50 мм.

Для управления работой зоны отжига необходимо предусмотреть приборы КИП для контроля расхода воздуха на зону или его давления, давления в отсасывающих патрубках, температуры по длине рабочего пространства (через каждые 2 м длины) с выводом показаний на приборы, а также предусмотреть блокировку при отсутствии нагреваемых изделий в печи.

В соответствии с тепловым и гидравлическим расчетами комплекса туннельных печей для термообработки камнелитых изделий при газовом отоплении необходимо произвести следующие изменения:

- в сушильно-прокалочной печи установить шесть горелочных устройств типа Вихрь 25 СВ-5, входной и выходной тамбуры, отбор газов из печи, рекуператор для подогрева воздуха на горение и систему воздухопроводов;

- в зоне кристаллизации снизить высоту свода до 100 мм от залитых изделий с равномерным размещением электрических нагревателей по всей длине зоны. На внешней поверхности зоны установить дополнительную теплоизоляцию из волокнистых плиточных материалов толщиной не менее 50 мм;

- в зоне отжига предусмотреть подачу холодного воздуха от отдельного вентилятора с расходом до 1400 м³/ч при давлении не менее 421,49 Па. Подача воздуха осуществляется первоначально в поперечный распределительный коллектор из стальной трубы диаметром не менее 320 мм, а далее в распределительную трубу по длине зоны такого же диаметра с восемью отверстиями диаметром 100 мм. Каждая фурма обеспечивается регулировочным шибером.

Сводный тепловой баланс комплекса туннельных печей, отапливаемых природным газом, приведен в табл. 2. Анализ полученных данных показывает, что предлагаемый вариант реконструкции комплекса туннельных печей, отапливаемых природным газом, характеризуется более эффективным использованием тепла для технологического процесса, чем при обогреве электричеством. Тепловой КПД при этом повышается от 14,10 % до 8,72 + 11,72 = 20,44 %, т. е. на 44,96 %. Однако реализация такой реконструкции потребует повышения общего расхода тепла от 598,54 до 733,66 кВт, т. е. на 22,58 %, что связано с особенностями организации процесса сжигания газообразного топлива. При этом реконструкция туннельных печей и совершенствование процесса термообработки садочного оборудования и камнелитых изделий обеспечивают уменьшение величины их остаточного нагрева от 84,42 до 63,96 кВт, т. е. на 24,24 %, и повышение остаточного теплосодержания литейного оборудования в сушильно-прокалочной печи от

Таблица 2. Сводный тепловой баланс печного комплекса туннельных печей, отапливаемых природным газом

Приход тепла			Расход тепла		
Статья	кВт	%	Статья	кВт	%
1. Химическое тепло природного газа для отопления сушильно-прокалочной печи	332,16	48,61	1. Физическое тепло тележек, поддонов и изделий на выходе из зоны отжига	63,96	8,72
2. Тепло нагревателей	192,5	28,17	2. Физическое тепло отходящих газов из сушильно-прокалочной печи	96,46	13,14
3. Физическое тепло расплава	119,10	17,45	3. Физическое тепло горячего воздуха	282,13	38,46
4. Физическое тепло тележек, поддонов и форм	39,44	5,77	4. Затраты тепла на испарение влаги из формы	85,97	11,72
5. Физическое тепло горячего дутья	50,46		5. Потери тепла в окружающую среду:		
Итого приход тепла	733,66	100,0	через боковые стенки	68,56	
			через торцевые заслонки	136,58	
			Сумма	205,14	27,96
			Итого расход тепла	733,66	100,0

84,2 до 85,97 кВт, т. е. на 2,1 %, при сокращении тепловых потерь в окружающую среду от 284,71 до 205,14 кВт, т. е. на 27,95 %. Кроме того, в тепловом балансе в составе тепловых отходов появляется статья организованного отбора воздуха в количестве 145,21 кВт, который может быть использован на теплоэнергетические или технологические нужды. С учетом этого теплового потока суммарный тепловой КПД установки возрастает до $21,95 + 24,26 = 46,21$ %, т. е. в 3,28 раза. Таким образом, переход электрического отопления комплекса туннельных печей для термообработки камнелитых изделий на комбинированное отопление (природный газ и электричество) при сохранении качества получаемой продукции сопровождается:

– более эффективным использованием тепла с возможностью повышения теплового КПД в 3,28 раза;

– увеличением общих энергозатрат на термообработку 22,58 %;

– образованием дополнительного организованного объема сбрасываемых газов в количестве не более 4000 м³/ч с температурой не выше 150 °С.

Библиографический список

1. **Лебедева, Г. А.** Каменное литье как рационально-стойкий материал / Г. А. Лебедева, Г. П. Озерова // Строительные материалы. — 1998. — № 5. — С. 14, 15.
2. **Игнатова, А. М.** Правила управления структурой и свойствами каменного литья / А. М. Игнатова // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. — 2010. — Т. 12, № 3. — С. 94–102.
3. **Вагин, В. В.** Каменное литье / В. В. Вагин, Б. И. Пурогов. — М. : ГНТИ МЛ, 1962. — 96 с.
4. **Телегин, А. С.** Тепломассоперенос / А. С. Телегин, В. С. Швыдкий, Ю. Г. Ярошенко ; под ред. Ю. Г. Ярошенко. — М. : ИКЦ «Академкнига», 2002. — 455 с. ■

Получено 17.04.21

© В. И. Матюхин, С. Н. Фокин, А. В. Матюхина, Н. В. Ямшанова, Е. В. Киселев, 2021 г.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ

14-я ТИХООКЕАНСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ ПО ТЕХНОЛОГИИ КЕРАМИКИ И СТЕКЛА (PACRIM) И ЕЖЕГОДНОЕ СОБРАНИЕ ПО СТЕКЛУ И ОПТИЧЕСКИМ МАТЕРИАЛАМ (GOMD 2021)

14TH PACIFIC RIM CONFERENCE ON CERAMIC AND GLASS TECHNOLOGY including
Glass & Optical Materials Division Meeting (GOMD 2021)

December 12-17, 2021 | Vancouver, BC, Canada | ceramics.org/pacrim14

12–17 декабря 2021 г. Ванкувер, Канада ceramics.org/pacrim14