



The temperature fields and thermal stresses in metallic moulds for production of aluminium and copper ingots were measured and calculated. The chemical composition of high-strength cast iron for moulds was suggested.

А. Б. ЧЕРНЯК, И. П. ВОЛЧОК, Запорожский национальный технический университет

УДК 621.74:669.042.22

ЭКОНОМНОЛЕГИРОВАННЫЙ ЧУГУН ДЛЯ ИЗЛОЖНИЦ ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ

Работа посвящена разработке состава высокопрочного чугуна для изложниц массой около 20 кг, применяемых для получения чушек алюминиевых и медных сплавов в условиях конвейерной разливки. Масса алюминиевой чушки составляла 6 кг, медной — 13,5 кг; температура заливки алюминиевых сплавов изменялась от 730 — 7000 °С (начало заливки) до 710 — 6800 °С (конец заливки), медных — от 1120 — 9800 до 1090 — 9500 °С. Продолжительность рабочего цикла изложниц равнялась 14 — 18 мин, при этом через 3,5 мин после заливки производилось их охлаждение водой, через 6 — 7 мин — извлечение слитка (чушки).

В качестве конструкционных материалов для изложниц были опробованы серый и высокопрочный чугуны. Высокопрочный чугун марок ВЧ35 — ВЧ45 обеспечил по сравнению с серым СЧ20 повышение стойкости изложниц в 2,0 — 2,5 раза, но в связи с высоким расходом изложниц (0,5 — 0,6 кг/т для алюминиевых и 3,4 — 3,9 кг/т для медных сплавов) из-за термоусталостных трещин, короблений и эрозии рабочих поверхно-

стей возникла необходимость в дальнейшем увеличении ресурса их работы.

С целью анализа термонапряженного состояния было проведено термометрирование изложниц в процессе их работы. На рис. 1 приведены эскиз изложницы для медных сплавов, схема установки в ней термопар и график изменения температур в течение 7 мин после заливки. Аналогичные зависимости были получены для изложницы для алюминиевых сплавов.

Результаты термометрирования показали, что максимальные температуры на внутренней поверхности изложниц (870 — 900 °С для медных сплавов и 550 — 570 °С для алюминиевых) достигались через 5 — 10 с с момента заливки, при этом разница между температурами на внутренней и наружной стенках изложниц (термопары 1 и 5, 2 и 6) достигала 260 — 300 °С при разливке медных сплавов и 80 — 100 °С при разливке алюминиевых сплавов. Столь высокий градиент температур (от 5 до 15 °С/мм) в стенках изложниц служил основной причиной их преждевременного выхода из строя по причинам, указанным выше.

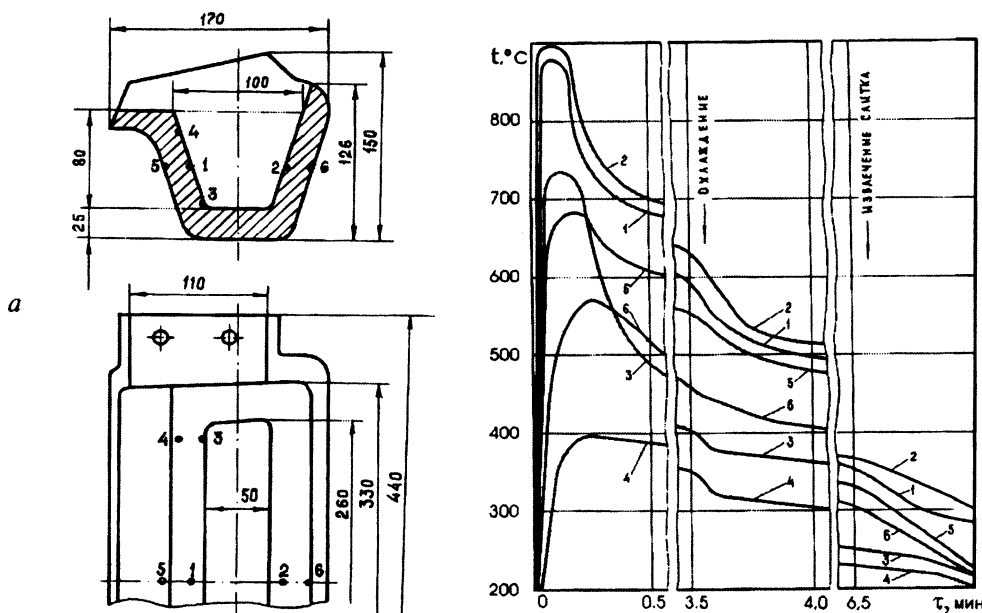


Рис. 1. Схема расположения термопар (а) и графики изменения температур (б) в изложнице для медных сплавов

С применением моделей теории теплопроводности и термовязкоупругопластичности были выполнены аналитические расчеты величины и распределения термических напряжений, возникающих в стенке изложниц в наиболее опасный момент (через 9,5 с после окончания заливки) и в наиболее термонапряженном сечении (центральная часть изложниц). На рис. 2 представлены изменения во времени максимального в сечении эффективного (полного) напряжения σ_3 , температуры t в его точке и отношения σ_3 к пределу текучести при сжатии σ_T^c для двух сплавов: с теплопроводностью $\lambda=30$ Вт/(м·К) (сплошные линии) и $\lambda=60$ Вт/(м·К) (пунктирные линии). Из рисунка видно, что максимальные по сечению напряжения наступают в начальный период теплообмена, до 15-й секунды после заливки металла.

Результаты показали, что из компонентов напряжений максимальные значения имеют нормальные к сечению напряжения σ_{33} . Нормальные σ_{11} , σ_{22} и касательные $\sigma_{12}=\sigma_{21}$ напряжения носят локальный характер и по величине существенно меньше σ_{33} , т. е. поля нормального σ_{33} и эффективного σ_3 напряжения примерно одинаковы. Поэтому при оценке сопротивления материала изложницы деформациям и разрушению σ_3 приписывался знак σ_{33} и затем проводили сопоставление с пределом текучести при растяжении $+\sigma_3/\sigma_T^p$ или при сжатии $-\sigma_3/\sigma_T^c$ (рис. 3).

Как видно из рисунка, напряжения σ_3 и σ_{33} не превышают предел текучести при растяжении σ_T^p на наружной поверхности изложницы. В то же время на глубине примерно до 6 мм от внутренней поверхности термические напряжения по абсолютному значению превышают предел текучести при сжатии σ_T^c (в изложнице для алюминиевых сплавов зона, соответствующая $|\sigma_3|=|\sigma_T^c|$, составила около 1 мм). Таким образом, металл рабочих поверхностей изложниц работает в условиях малоциклового выносливости, что подтверждается интенсивным образованием термоусталостных трещин, особенно в изложницах для медных сплавов. Из рис. 2 и 3 следует, что увеличение теплопроводности материала приводит к более благоприятному распределению температур в изложницах и снижению величины термических напряжений; при этом максимальные сжимающие напряжения уменьшаются, а растягивающие — увеличиваются, в результате чего напряженность поверхностей изложницы выравнивается.

Полученные результаты и литературные данные показывают, что для повышения долговечности изложниц необходимо увеличение прочности (при комнатных и высоких температурах), термостойкости и теплопроводности материала для их изготовления. Согласно качественной характе-

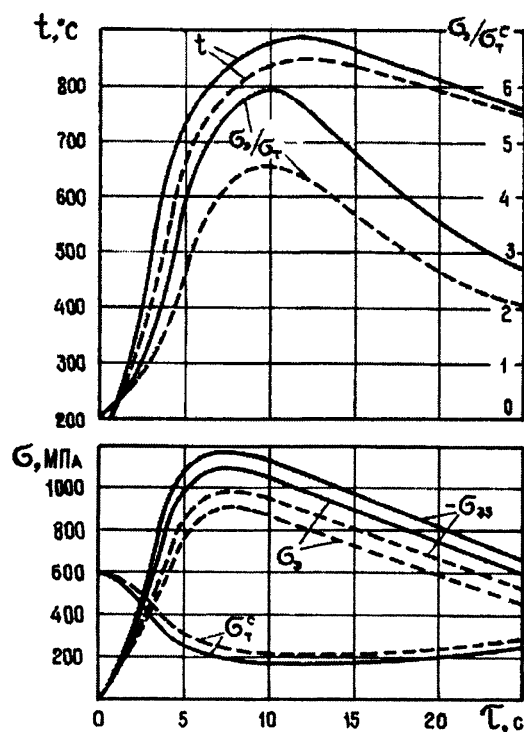


Рис. 2. Изменение во времени температуры t , предела текучести σ_T^c , нормальных напряжений σ_{33} , эффективного напряжения σ_3 и отношения σ_3/σ_T^c (сплошные линии — $\lambda=30$ Вт/(м·К), пунктирные — $\lambda=60$ Вт/(м·К))

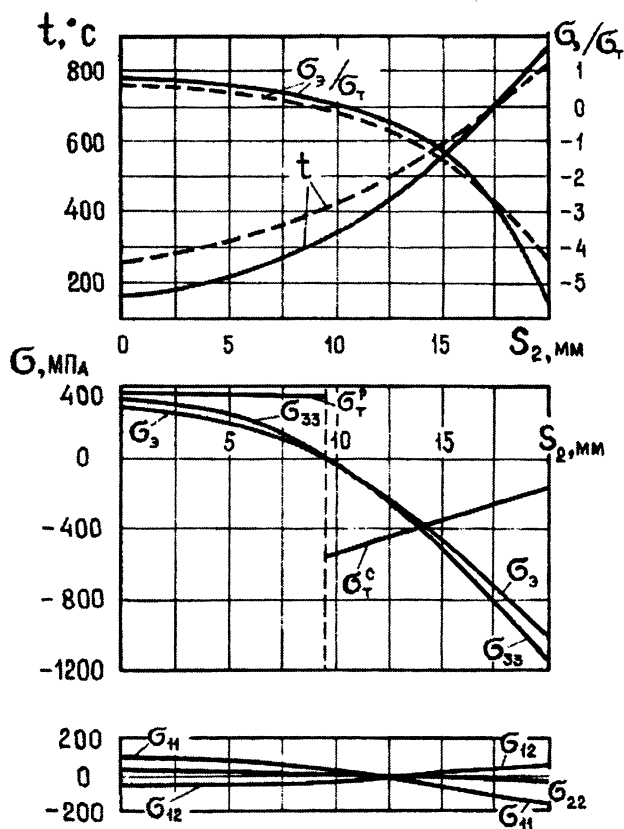


Рис. 3. Изменение по толщине стенки S_2 температуры t , эффективного напряжения σ_3 , пределов текучести σ_T^p и σ_T^c , отношения $+\sigma_3/\sigma_T^p$ и компонентов тензора напряжений σ_{11} , σ_{22} , σ_{12} , σ_{21}

ристике термостойкости — параметру тепловых напряжений [1]:

$$K = \frac{\sigma_B \lambda}{\alpha E}, \text{ Вт/м}, \quad (1)$$

где σ_B — предел прочности при растяжении, МПа; λ — теплопроводность, Вт/(м·°C); α — коэффициент термического расширения, 1/°C; E — модуль упругости, МПа, долговечность изделий, работающих при термоциклических нагрузках, зависит также от коэффициента термического расширения σ и модуля нормальной упругости E .

С целью анализа влияния физических и механических свойств чугуна на его сопротивление разрушению при термоциклических нагрузках проведена серия плавов по плану 2^3 , при котором в качестве независимых переменных были приняты: содержание кремния — 1,16–2,84%, марганца — 0,33–0,67 и хрома — 0,13–0,47 % при практически постоянном содержании других элементов: 3,51–3,58 % С, 0,11–0,16 % Р, 0,004–0,007 % S. В качестве функций отклика были приняты модуль упругости E , предел прочности σ_B , термостойкость N (число циклов до разрушения при испытании на высокотемпературном микроскопе ИМАШ 20-75 по режиму 250–900°C при постоянном растягивающем напряжении 15 МПа), теплопроводность λ , коэффициент термического расширения α и параметр тепловых напряжений K . Статистическую обработку экспериментальных данных проводили на персональном компьютере с помощью программы «Advanced Grapher 1.63, Copyright© 1998-2001 Serpik Soft», подбирая уравнения регрессий с минимальным стандартным отклонением и максимальным значением коэффициентов корреляции r .

$$E = (1,865 - 0,35 \text{ Mn} - 7,2 \cdot 10^{-2} \text{ Si} - 0,35 \text{ Cr} + 1,5 \text{ MnCr} + 0,14 \text{ SiCr} - 0,18 \text{ MnSi} - 0,6 \text{ MnSiCr}) \cdot 10^6, \text{ МПа}, r = 0,97, \quad (2)$$

$$\sigma_B = 963 + 244 \text{ Mn} - 485 \text{ Si} + 83 \text{ Si}^2 + 280 \text{ Cr} + 46 \text{ MnCr}, \text{ МПа}, r = 0,99, \quad (3)$$

$$N = 18,6 + 8,4 \text{ Mn} - 21 \text{ Mn}^2 + 28,2 \text{ Si} - 7,9 \text{ Si}^2 - 0,9,6 \text{ MnCr}, \text{ циклов}, r = 0,69, \quad (4)$$

$$\lambda = 25,5 - 16,2 \text{ Mn} + 34,5 \text{ Si} - 10,2 \text{ Si}^2 - 22,4 \text{ Cr}, \text{ Вт/(м} \cdot \text{K)}, r = 0,76, \quad (5)$$

$$\alpha = (9,96 + 3,5 \text{ Mn} + 0,73 \text{ Si} + 6,13 \text{ Cr} - 9,8 \text{ MnCr} - 3,0 \text{ SiCr} - 1,56 \text{ MnSi} + 5,2 \text{ MnSiCr}) \cdot 10^{-6}, 1/^\circ\text{C}, r = 0,96, \quad (6)$$

$$K = 2479 - 2083 \text{ Mn} + 2360 \text{ Mn}^2 - 759 \text{ Si} + 62 \text{ Si}^2 + 1393 \text{ Cr} - 2840 \text{ Cr}^2 - 30 \text{ MnSi} - 880 \text{ MnCr} + 90 \text{ SiCr}, \text{ Вт/м}, r = 0,97. \quad (7)$$

Согласно полученным уравнениям регрессий, между содержанием кремния и исследуемыми свойствами чугуна (за исключением E и α) наблюдались зависимости второго порядка, при этом экстремальные точки соответствовали для σ_B — 2,9 % Si (минимум показателя), для N — 1,8 % Si (максимум), для λ — 1,7 % Si (максимум), для K — 6,1 % Si (минимум). Объясняются полученные результаты двойственным влиянием кремния на свойства чугуна: ферритизацией матрицы, способствующей снижению прочности и повышению теплопроводности, и легированием твердого раствора, вызывающим повышение прочности и снижение теплопроводности. Для термостойкости N оптимальной структурой оказалась ферритно-перлитная. Параметр тепловых напряжений K снижался с увеличением содержания кремния. Это позволяет сделать вывод о том, что K в значительной мере зависит прежде всего от предела прочности σ_B .

Марганец вследствие склонности к перлитизации способствовал повышению прочности во всем исследуемом интервале (0,3–0,7 % Mn) и существенному снижению теплопроводности. Минимальные значения параметра, тепловых напряжений K соответствовали 0,44 % Mn, максимальные (в пределах исследуемых концентраций) — 0,3 и 0,7 % Mn.

Хром оказал отрицательное влияние на все показатели свойств, кроме σ_B и K . Предел прочности возрастал во всем интервале концентраций хрома (0,1–0,5 %), параметр тепловых напряжений — только с ростом содержания хрома до 0,24 %. Известно [2], что хром оказывает дестабилизирующее действие на глобуляризацию графита и поэтому его содержание в высокопрочных чугунах обычно не превышает 0,1–0,2%.

Марганец и хром способствовали повышению модуля нормальной упругости E и коэффициента термического расширения α , действие кремния было обратным. Это свидетельствует о том, что величина указанных параметров в нашем случае определялась прежде всего степенью ферритизации металлической матрицы.

Анализ экспериментальных данных графическим и аналитическим методами позволил определить оптимальные концентрации элементов, обеспечивающие получение наиболее высоких значений σ_B , N , λ и K и минимальных E и α (табл. 1), что в свою очередь дало основания рекомендовать для изложниц чугуна состава, мас. %: С — 3,4–3,6; Mn — 0,20–0,35; Si — 1,8–2,2; Cr — 0,1–0,2. Содержание углерода 3,4–3,6 % было принято на основании литературных данных [3,4].

С целью дальнейшего повышения физико-механических и служебных свойств чугуна для изложниц применяли микролегирование титаном и ванадием и легирование медью.

Таблица 1. Оптимальные концентрации легирующих элементов

Показатель	Массовая доля элементов, %		
	Mn	Si	Cr
σ_B	0,70	1,2	0,4
N	0,30	1,8	—
λ	0,30	1,7	0,1
K	0,45	—	0,1
E	0,20	2,5	0,1
α	0,20	2,5	0,1

Титан и ванадий, подобно хрому, являются сильными карбидообразующими элементами. Согласно литературным данным, например [5,6], при их суммарном содержании до 0,1 % имеет место активизация процессов графитизации и измельчения графитной фазы, что наряду со стабилизацией карбидов перлита снижает скорость эрозионного разрушения изложниц.

Медь также способствует графитизации, являясь одновременно сильным перлитизатором [2,4]. Кроме того, медь, легируя твердый раствор, существенно повышает прочностные свойства чугуна и, образуя тонкие прослойки на поверхностях раздела графит — металл и медьсодержащие фазы, приводит к заметному росту теплопроводности.

В условиях фракционной разливки проводили микролегирование высокопрочного чугуна состава, мас. %: C — 3,45; Mn — 0,42; Si — 1,89; P — 0,12; S — 0,007, присадками 0,1 % Cr, 0,05 % Ti и 0,05 % V (присадки подавали в печь перед выпуском металла в разливочный ковш, на дне которого размещалась железокремниймагниева лигатура). Результаты испытаний (табл. 2) показали возможность некоторого повышения прочности и термостойкости без существенного снижения теплопроводности в результате микролегирования хромом, титаном и ванадием чугуна для изложниц. На опытной партии изложниц (12 шт. из ВЧ45 и 12 шт. из ВЧ50 с присадками хрома, титана и ванадия) установлено снижение расхода изложниц для разливки алюминиевых сплавов на 18 % и медных сплавов на — 21 %.

Таблица 2. Влияние микролегирования на свойства высокопрочного чугуна

Присадка, %			σ_B , МПа	δ , %	НВ	N , цикл	λ , Вт/(м·К)
Cr	Ti	V					
—	—	—	486	9,6	192	36	38,4
0,1	—	—	502	6,9	216	39	37,6
0,1	0,05	0,05	529	5,5	227	46	35,9

Было изучено влияние возрастающих от 0 до 3 % присадок электролитической меди на строение, теплофизические, механические и служебные свойства чугуна исходного состава, мас. %: C — 3,4; Si — 1,97; Mn — 0,25; Cr — 0,11; Ti — 0,038; V — 0,06; Mg — 0,030–0,055. Легирование медью осуществлялось в тигле 120-килограммовой индукционной печи, модифицирование — лигатурой ЖКМ-2 в разливочном 20-килограммовом ковше, нагретом до 800°C.

Концентрация меди 0,4 % привела к получению полностью перлитной структуры (в исходном чугуне количество перлита составляло 85 %), при 0,64 % Si размеры глобул графита уменьшились примерно в 2 раза, при 0,93 % Si произошло превращение шаровидного графита в вермикулярный. При этом внутри графитовых включений и рядом с ними появились выделения медистой фазы, содержание которой возрастало с увеличением концентрации меди.

Положительным фактором влияния меди является снижение примерно на 13 % коэффициента термического расширения и повышение теплопроводности на 32 % при 2,91 % Cu (табл. 3). Изменение этих показателей, на наш взгляд, привело к повышению термостойкости почти в 3 раза. С целью имитации условий работы изложниц

термостойкость определяли на образцах, имеющих благодаря двум сквозным отверстиям значительную разностенность (рис. 4), путем нагрева до 900°C, выдержки 5 мин и охлаждения в воде. О термостойкости судили по числу циклов, которые выдерживал образец до появления сквозной трещины или разрушения.

Таблица 3. Влияние меди на свойства высокопрочного чугуна

Содержание Cu, %	$\alpha_{20}^{740} \cdot 10^6$ 1/°C	λ_{20}^{100} , Вт/(м · К)	$P_{act} P_{900}$, %	Термостойкость, цикл	σ_B , МПа, при		δ , %, при	
					°C		°C	
					20	900	20	900
0	20,2	34,4	0,90	3,0	556	50,3	5,2	26,4
0,40	17,6	29,3	0,90	4,3	625	83,3	4,4	25,8
0,64	17,6	35,6	0,92	5,3	689	113,0	2,4	11,6
0,93	17,6	38,9	1,08	6,7	679	96,6	1,2	8,0
1,60	17,5	41,8	1,11	7,3	582	79,0	0,6	5,6
2,32	17,4	43,9	1,15	8,3	505	66,3	0	1,6
2,91	17,8	45,4	1,28	7,0	390	41,0	0	0,8

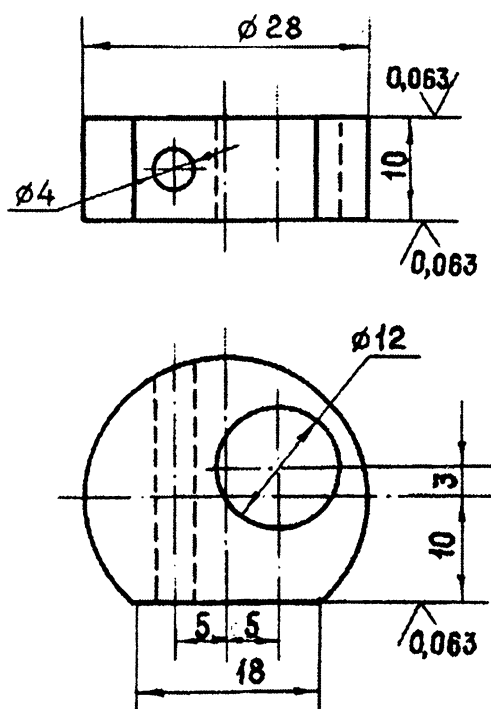


Рис. 4. Образец для определения термостойкости

При содержании меди более 0,6 % начиналось увеличение роста чугуна P_{900} (выдержка в атмосфере печи сопротивления при температуре 900°C в течение 100 ч). В связи с тем что при 0,93 % Cu произошло превращение шаровидного графита в вермикулярный, можно предположить, что имел место рост второго рода, при котором увеличение объема чугуна происходит вследствие окисления внутренних слоев металла вдоль графитовых пластин.

Зависимости пределов прочности при 20 и 900°C от содержания меди описывались кривыми с максимумом при 0,64 % Cu (табл. 3). Повышение прочностных свойств на 24 % при 20°C и на 125 % при 900°C можно объяснить твердорастворным упрочнением металлической матрицы, а также появлением в структуре чугуна частиц медистой фазы, играющих роль барьеров для дислокаций. При содержании меди более 0,64 % происходит монотонное снижение прочности, прежде всего вследствие изменения формы графита и охрупчивания металлической матрицы. С точки зрения прочностных свойств оптимальным является содержание меди 0,6–1,0 %. При этом весьма важной является возможность повышения прочности при 900°C более чем в 2 раза. Это позволяет снизить величину отношения σ_3/σ_T (см. рис. 2, 3) и уменьшить развитие процессов термоусталостного разрушения на рабочих поверхностях изложниц.

В целом результаты работы позволили рекомендовать для изготовления изложниц высоко-

прочный чугун состава, мас. %: С — 3,43,6; Si — 1,8–2,2; Mn — 0,20–0,35; Cr — 0,1–0,2; Ti — 0,02–0,06; V — 0,02–0,06; Cu — 0,6–1,0 Mg — 0,04–0,06. Его применение обеспечило повышение стойкости изложниц для алюминиевых сплавов в 1,5 раза и для медных — в 1,6 раза по сравнению с изложницами из чугуна марок ВЧ35–ВЧ45.

Литература

1. Твердопаливні ракетні двигуни. Матеріали і технології / Ф. П. Санін, Л. Д. Кучма, Є. О. Джур, А. Ф. Санін. Дніпропетровськ: Вид. ДДУ, 1999.

2. Вашенко К. И., Шумихин В. С. Плавка и внепечная обработка чугуна для отливок. Киев: Вища шк., 1992.

3. Волчок И. П., Колотилкин О. Б., Шейко С. П. Конструкционные материалы для стеклоформующего инструмента. Запорожье: Издат. центр «Павел», 1997.

4. Неижко И. Г. Графитизация и свойства чугуна. Киев: Наукова думка, 1989.

5. Гаврилин И. В. Структура и свойства жаростойкого и износостойкого чугуна для изготовления стеклоформ // Литейное производство. 2001. № 8. С. 5–6.

6. Жуков А. А. Теория графитизации к началу XXI века // Литейное производство. 2000. №2. С. 8–9.



02.03 — 14Г.24. Установка для обработки пыли, образующейся в электродуговой печи.

Новости чер. металлургии за рубежом. 2001, № 1, с. 47–48. Рус.

Фирма "Metals Recycling Technologies", США, разработала установку для обработки пыли, образующейся в электродуговой печи, которая успешно эксплуатируется на фирме AmeriStreet Corporation". Пыль, которую обрабатывают на данной установке, поступает с других заводов в грузовиках, в железнодорожных вагонах или ее передают пневматическим способом. При выгрузке пыли ее смешивают с другими отходами, содержащими оксиды металлов. Затем эту смесь просеивают и передают в дозирующее устройство, где смешивают пыль, оксиды и уголь. Из смесителя смесь транспортируется в устройство для брикетирования. Брикетные поступают в печь с вращающимся подом, где располагаются в один слой и находятся примерно в течение 14 мин. Скорость вращения пода при этом регулируется. Печь работает при температуре порядка 1288°C. В печи есть 24 горелки, которые расположены в шести зонах. В каждой зоне обеспечивается регулирование температуры. Газы и частицы выходят из печи через систему каналов с огнеупорной футеровкой. Через эту систему газы поступают в охладительную камеру, в которой смешиваются с атмосферным воздухом. При этом происходит охлаждение, а затем газы поступают в пылеуловитель всасывающего типа с рукавными фильтрами. Частицы (в основном частицы оксидов цинка) отделяются от потока газа и воздуха с помощью тканевых фильтров пылеуловителя. Затем оксиды цинка транспортируются из пылеуловителя в бункер для хранения, откуда транспортируются либо в автоцистерны, либо в железнодорожные вагоны с крышками или вагоны-цистерны. Брикетные, содержащие железо, загружают обратно в электродуговую печь. Химический состав пыли, образующейся в электродуговой печи, зависит от типа лома, используемого для выплавки стали, технологии плавки и способа удаления газа из печи и цеха.

02.03 — 14Г.25. Утилизация пыли при выплавке стали в электродуговой печи.

Новости чер. металлургии за рубежом. 2001, № 1, с. 46–47. Рус.

Фирма "J&L Specialty Steel Inc." в Питтсбурге, США, провела исследования по утилизации пыли, образовавшейся в электродуговой печи и на установке аргоно-кислородного обезуглероживания стали. В качестве восстановителя использовали коксовую мелочь. Пыль образуется в воздушной атмосфере при высокой температуре, поэтому большинство элементов, содержащихся в пыли, окисляется. Использование метода дифракции рентгеновских лучей показало, что основными кристаллическими фазами, присутствующими в пыли, являются магнетит (Fe_3O_4), гематит (Fe_2O_3) и оксид хрома (CrO). Эту пыль просеивали, чтобы получились частицы с размерами 0,425 мм для производства окатышей. Отходы огнеупора — доломита использовали в качестве связующего вещества (5%). Активированный уголь (15%) использовали в качестве восстановителя. Пыли перемешали, а окомковывание смеси осуществляли в тарельчатом грануляторе. Затем проводили грохочение окатышей, сушку при комнатной температуре в течение четырех суток и предварительное восстановление. Для плавления использовали индукционную печь емкостью 23 кг. Плавку начинали путем расплавления небольшого количества чистого железа, после чего в печь подавали порциями окатыши. По окончании процесса расплавления окатышей в печь вводили алюминий для восстановления оксидов в шлаке. Продолжительность плавки составляла 1 — 1 ч 30 мин. Химический состав стали и шлака определяли с использованием методов оптической эмиссионной спектроскопии и рентгеновской эмиссионной спектроскопии. При плавлении обычных окатышей степень извлечения никеля и железа высокая. Когда алюминий не вводят для восстановления оксидов металлов в шлаке, степень извлечения хрома мала. При вводе алюминия, отношение массы которого к массе окатышей составляет 9,4%, степень извлечения хрома увеличивается на 22,8% и становится равной 60,4%. Один из важных вопросов — влияние утилизации пыли на химический состав стали. Установлено, что процесс прямой утилизации дымовой пыли не оказывает вредного влияния на химический состав стали, выплаваемой в электродуговой печи.