



On the basis of finite-difference mathematical model for calculation of thermal field of pipe cylindrical continuous casting there is investigated the dispending of heat flows in lengthwise and radial direction of casting.

Е. И. МАРУКОВИЧ, А. М. БРАНОВИЦКИЙ, Ю. А. ЛЕБЕДИНСКИЙ, Л. В. ЧЕШКО,
ИТМ НАН Беларуси

УДК 621.774

ОЦЕНКА ТЕПЛОВЫХ ПОТОКОВ В ОСЕВОМ НАПРАВЛЕНИИ ПРИ НЕПРЕРЫВНОМ ЛИТЬЕ ТРУБНОЙ ЗАГОТОВКИ

Один из способов получения полых заготовок — непрерывное горизонтальное литье. Этот способ литья может с успехом применяться для получения полых отливок из чугуна и цветных сплавов [1, 2]. Сравнительный анализ способов производства трубных заготовок показывает, что способ непрерывного горизонтального литья для получения заготовок небольших размеров более прост и экономичен по сравнению с центробежным и может использоваться в ряде отраслей промышленности. Актуальным является исследование закономерностей затвердевания металла в процессе непрерывного литья с целью получения новых промышленных изделий с улучшенными эксплуатационными свойствами. В частности, большое значение имеет анализ зависимости затвердевания отливки от таких параметров литья, как скорость вытяжки, теплофизические параметры кристаллизатора.

Принципиальная схема непрерывного горизонтального литья трубных заготовок представлена на рис. 1. Расплав 2 из металлоприемника 1 попадает в рабочую полость кристаллизатора, состоящего из металлического водоохлаждаемого корпуса 3 и графитовой рабочей втулки 4 с дорном 5, внутри которой расплав затвердевает, образуя отливку, которая циклически (движение-остановка) извлекается из кристаллизатора вытягивающим механизмом.

Для данного технологического процесса большой интерес представляет теоретическая численная оценка параметров процесса затвердевания трубной отливки во временных интервалах между протяжками. В частности, в статье исследуется вопрос оценки тепловых потоков вдоль оси полый заготовки при затвердевании. Данный вопрос для цилиндрических отливок рассмотрен в [3], где показано, что при затвердевании отливок из металлов с высокой теплопроводностью тепловой поток в отливке в продольном направлении уже при малых временных значениях после протяжки достигает значительных величин. Это вызывает значительный отток тепла из металлоприемника в отливку, что требует дополнительного разогрева

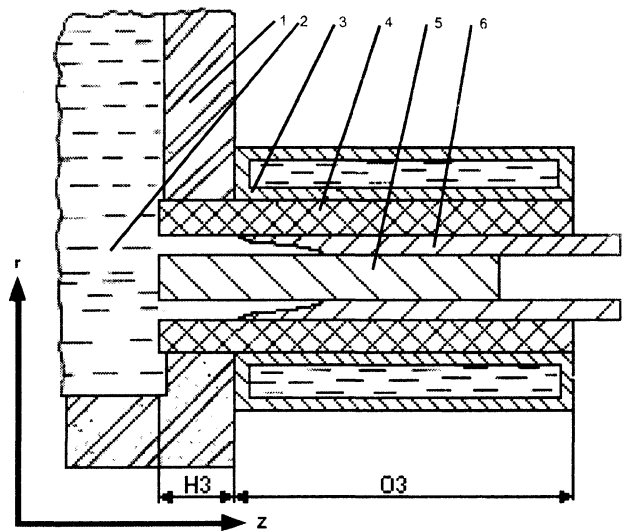


Рис. 1. Схема непрерывного литья трубной заготовки: 1 — металлоприемник; 2 — расплав; 3 — металлический кристаллизатор; 4 — графитовая втулка; 5 — дорн; 6 — отливка

металлоприемника. С помощью численного эксперимента были оценены временные интервалы между протяжками, при которых данный эффект становится существенным.

Настоящая статья посвящена вопросу оценки температурного поля и тепловых потоков для трубной заготовки. В частности, рассматривался тепловой поток в продольном направлении отливки для различных геометрических и теплофизических параметров кристаллизаторов типа установки, изображенной на рис. 1. Расчеты, приведенные в статье, служат для определения длины неохлаждаемой зоны кристаллизатора и времени охлаждения отливки в период остановки, при которых имеет место значительный тепловой поток из металлоприемника в кристаллизатор.

В работе использована модель расчета процесса затвердевания цилиндрической непрерывнолитой отливки на основании уравнения теплопроводности:

$$\operatorname{div}(\lambda \operatorname{grad} T) = \frac{\partial}{\partial \tau}(c_p T), \quad (1)$$

где T — температура; λ — теплопроводность; c — теплоемкость; ρ — плотность металла; τ — время.

Ввиду радиальной симметрии уравнение (1) примет вид

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \lambda \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \frac{\partial}{\partial \tau} (c \rho T), \quad (2)$$

где r — радиальная координата в цилиндрическом сечении отливки; z — координата в осевом направлении отливки.

Подробная численная схема решения (1) методом сеток приведена в [3]. Здесь отметим лишь дополнительные граничные условия на границе отливка — дорн. При расчетах тепловым потоком в дорн пренебрегали, считая процесс непрерывного литья установившимся. Это соответствует условию на данной границе:

$$\frac{\partial T}{\partial r} = 0.$$

В качестве примера рассмотрим распределение температурного поля в отливке из бронзы. Как видно из рис. 2, область существенного перепада температур по горизонтальной оси расположена в пределах границы НЗ—ОЗ (НЗ — неохлаждаемая зона кристаллизатора, ОЗ — охлаждаемая зона, см. рис. 1). Отметим, что для тонких трубных заготовок данный перепад значительно выше, чем перепад значений температуры в поперечном сечении. Различие между значениями температур на внутренней поверхности трубы и в середине стенки отливки значительно ниже, чем в середине стенки и на внешней поверхности трубы. В зоне ОЗ зависимость температуры от координаты Z практически отсутствует.

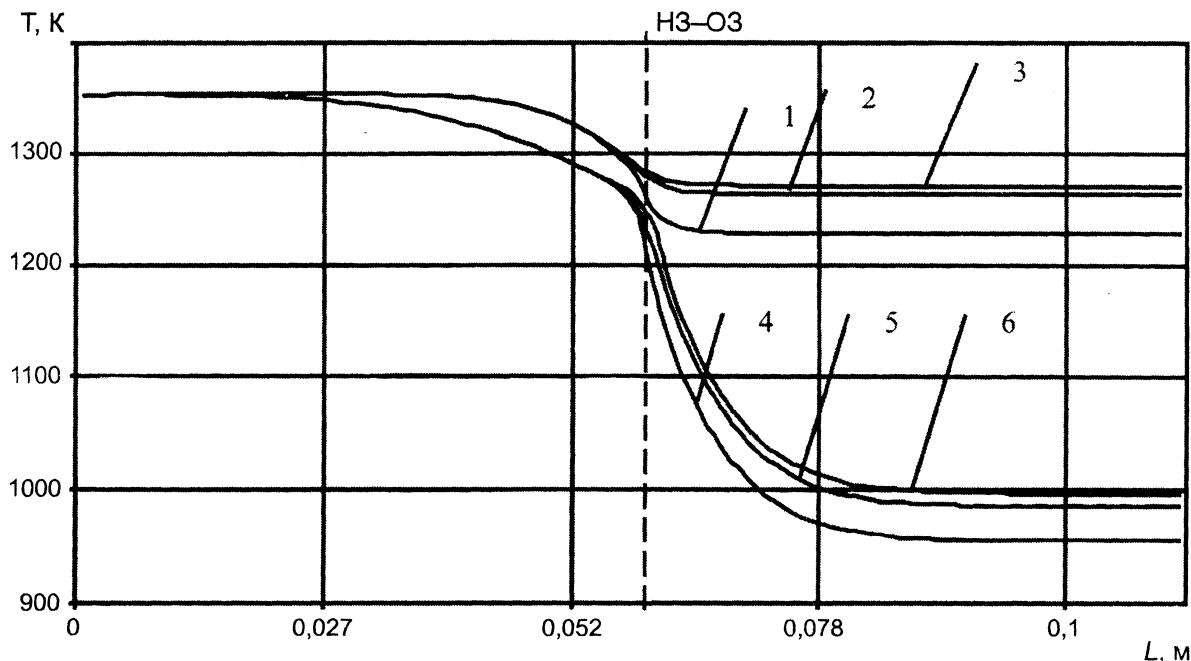


Рис. 2. Распределение температурного поля бронзовой отливки радиусом 50 мм и толщиной стенки 5 мм для $\alpha = 2000$ Вт/(м²·К): $\tau = 2,82$ с (1 — на внешней поверхности отливки; 2 — в середине отливки; 3 — на внутренней поверхности отливки); $\tau = 10,02$ с (4 — на внешней поверхности отливки; 5 — в середине отливки; 6 — на внутренней поверхности отливки)

Зона значительного перепада температуры по оси Z в пределах границы НЗ—ОЗ при коротком цикле вытягивания составляет 1–2 см и расширяется в обоих направлениях с увеличением цикла вытягивания, доходя до 5 см при 10-секундном цикле. Максимальный перепад температуры остается в зоне НЗ—ОЗ и превосходит 200 °С/см.

Увеличение суммарного коэффициента теплоотдачи α , рассчитанного по всем поверхностям кристаллизатора [4], приводит к уменьшению ширины зоны перепада температур по оси Z . При этом перепад температур превышает 300 °С/см (рис. 3). Увеличение толщины трубы приводит к сглаживанию перепада температур по оси Z и

к смещению зоны перепада в область меньших значений координаты Z . Тем не менее область основного перепада температуры остается на границе НЗ—ОЗ.

Проанализируем пространственное распределение тепловых потоков в отливке. На рис. 4 показано пространственное распределение теплового потока в продольном сечении стенки трубной заготовки на границе. Верхняя горизонталь соответствует границе отливка—кристаллизатор, нижняя — границе дорн—отливка. Левая граница сечений соответствует началу НЗ кристаллизатора, правая — на расстоянии 6 см от НЗ—ОЗ. Яркость на изображаемых сечениях пропорциональна величине теплового потока.

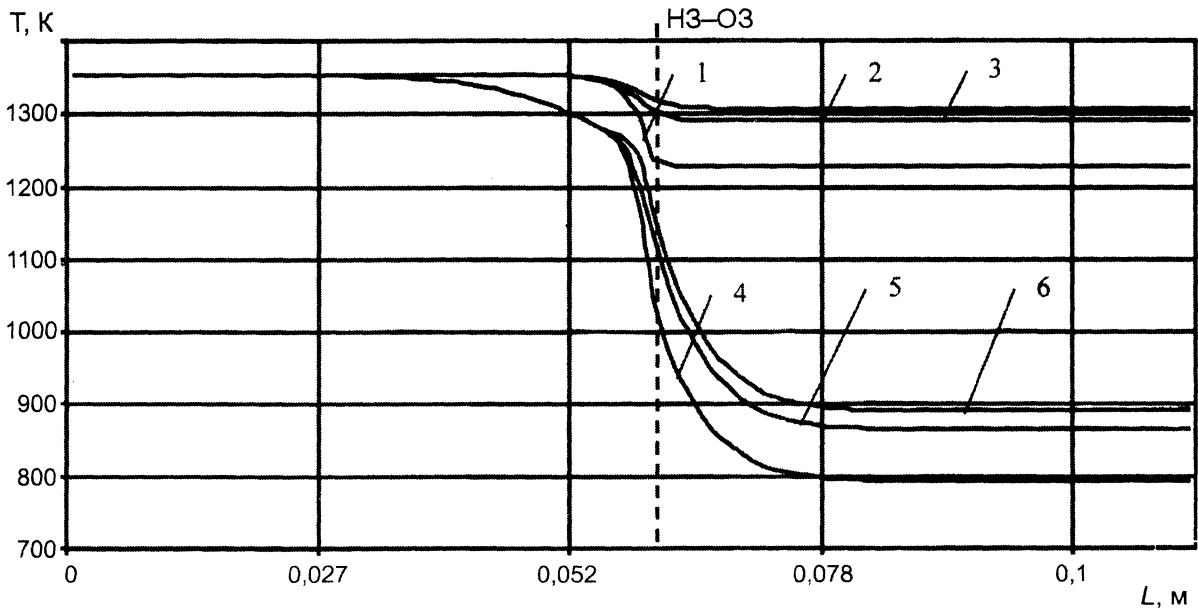


Рис. 3. Распределение температурного поля бронзовой отливки радиусом 50 мм и толщиной стенки 15 мм для $\alpha=6000$ Вт/(м²·К): $\tau = 0,42$ с (1 – на внешней поверхности отливки; 2 – в середине отливки; 3 – на внутренней поверхности отливки); $\tau = 4,42$ с (4 – на внешней поверхности отливки; 5 – в середине отливки; 6 – на внутренней поверхности отливки)

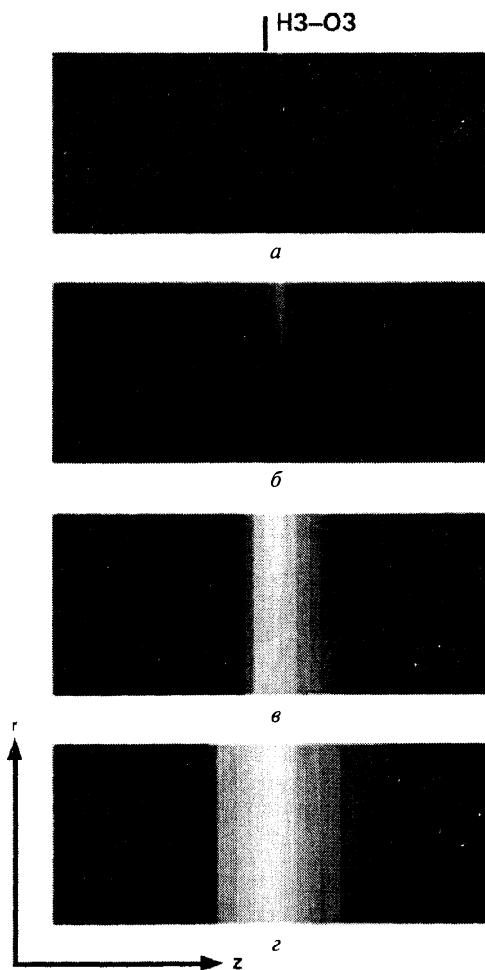


Рис. 4. Распределение теплового потока в продольном направлении на границе НЗ-ОЗ для бронзовой отливки при $\alpha=6000$ Вт/(м²·К) (более яркие участки соответствуют максимальному тепловому потоку): а – время после заливки 0,02 с; б – 0,82; в – 1,62; г – 2,22 с

Зона, в которой тепловой поток в продольном направлении заметно отличен от нуля, расширяется с увеличением величины цикла вытягивания. На рис. 4, а она ограничена небольшой областью вблизи границы слитка с кристаллизатором в точке перехода НЗ-ОЗ. В дальнейшем зона расширяется в обоих направлениях по горизонтали и вертикали, достигая внутренней поверхности отливки. Однако ввиду большой длины зоны НЗ для установки непрерывного горизонтального литья трубных заготовок зона значительного теплового потока не достигает металлоприемника даже при больших циклах вытягивания.

Были выполнены расчеты для оценки тепловых потоков в осевом направлении по сравнению с потоком в радиальном направлении посередине зоны ОЗ для толщин стенки отливки 5, 10 и 15 мм и радиусов ее наружной поверхности 25, 50 и 75 мм. Тепловой поток, как и температурное поле отливки, практически одинаков во всей зоне ОЗ и практически для всех внешних радиусов трубы при условии одинаковой толщины стенки. Расчеты проводили для трех металлов заготовки – бронзы, меди и серого чугуна, для кристаллизаторов с суммарным коэффициентом теплоотдачи 2000, 4000 и 6000 Вт/(м²·К) [2]. Все расчетные данные, приведенные в статье, соответствуют случаю перегрева расплава 100 К.

Для толщин стенки 10 и 15 мм тепловой поток в радиальном направлении незначительно зависит от величины цикла, однако при толщине стенки 5 мм поток с увеличением цикла вытягивания заметно уменьшается. Время, при котором это происходит, существенно зависит от суммарного

коэффициента теплоотдачи кристаллизатора. Для бронзы и чугуна при $\alpha=2000$ Вт/(м²·К) данное время приблизительно составляет 6–7 с, при $\alpha=4000$ Вт/(м²·К) – 4–5 с и при $\alpha=6000$ Вт/(м²·К) – 3–4 с, для меди при $\alpha=2000$ Вт/(м²·К) – 5 с, при $\alpha=4000$ Вт/(м²·К) – 3 с и при $\alpha=6000$ Вт/(м²·К) – 2 с.

Зависимость величины теплового потока в радиальном направлении отливки от времени цикла вытягивания носит сложный характер (рис. 5). Для меди радиальный поток в отливке убывает медленнее, чем для остальных материалов при большой толщине стенки, и быстрее, чем для остальных материалов при малой толщине стенки. Соответственно для чугуна, наоборот, радиальный поток убывает быстрее, чем для остальных материалов при большой толщине стенки, и медленнее, чем для остальных материалов при малой толщине стенки. Бронза занимает промежуточное положение. Это связано с тем, что медь имеет большую теплопроводность, чем бронза, а тем более чугун.

На рис. 6 показана зависимость относительно теплового потока $q_{\text{прод.}}/q_{\text{рад.}}$ от времени, имеющая место на границе НЗ–ОЗ для тех же материалов и геометрических размеров заготовки, что и на рис. 5. Из рисунка видно, что для случая малой толщины стенки, когда происходит быстрое охлаждение отливки в зоне ОЗ, значение

продольного теплового потока с увеличением цикла может на порядок превосходить значение радиального потока для меди (кривая 1), в несколько меньшей степени этот эффект выражен для бронзы (кривая 2), для чугуна он менее значителен (кривая 3). Для больших толщин стенки отливки значение относительного продольного теплового потока увеличивается несущественно и приближается к 1 при увеличении цикла вытягивания до 10 с.

По результатам расчетов можно сделать следующие выводы о распределении теплового потока в трубной заготовке:

1) на границе НЗ–ОЗ трубной отливки имеется зона с резким перепадом температуры и весьма значительным тепловым потоком вдоль оси слитка;

2) протяженность данной зоны растет с увеличением цикла вытягивания слитка и может достигать 5 см;

3) значительный тепловой поток в неохлаждаемой зоне кристаллизатора наблюдается через 2–3 с от начала процесса охлаждения;

4) тепловой поток в продольном направлении внутри неохлаждаемой зоны кристаллизатора может на порядок превышать тепловой поток в радиальном направлении для металлов с большой теплопроводностью.

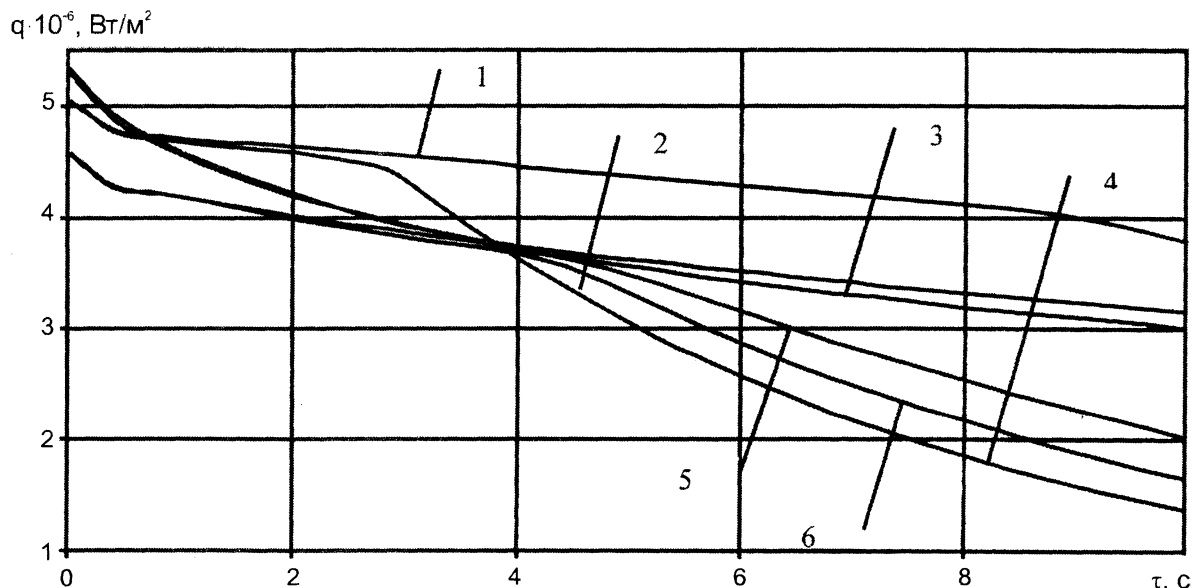


Рис. 5. Зависимость теплового потока в радиальном направлении отливки от времени цикла вытягивания: 1 – для медной отливки с толщиной стенки 15 мм; 2 – для медной отливки с толщиной стенки 5 мм; 3 – для бронзовой отливки с толщиной стенки 15 мм; 4 – для бронзовой отливки с толщиной стенки 5 мм; 5 – для чугунной отливки с толщиной стенки 15 мм; 6 – для чугунной отливки с толщиной стенки 5 мм

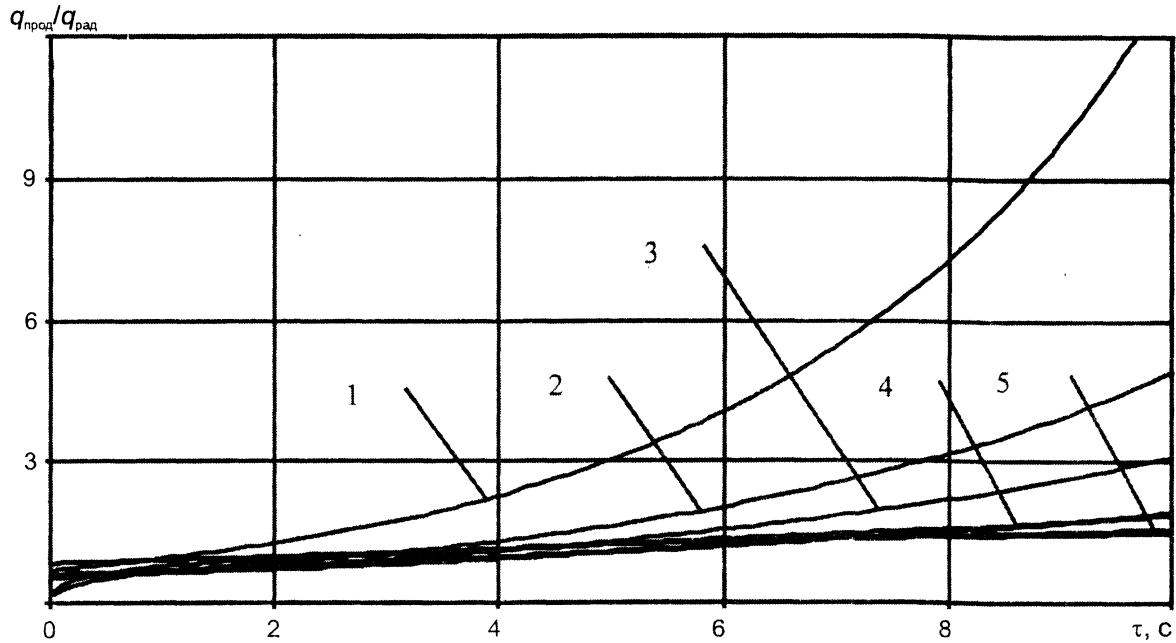


Рис. 6. Зависимость относительного теплового потока $q_{\text{прод}}/q_{\text{рад}}$ от времени цикла вытягивания для отливки радиусом 50 мм: 1 – для меди толщиной 5 мм; 2 – для бронзы толщиной 5 мм; 3 – для чугуна толщиной 5 мм; 4 – для меди толщиной 15 мм; 5 – для бронзы толщиной 15 мм

Литература

1. Баранов О. А., Ветров Б. Г., Поль В. Б. и др. Непрерывное литье чугуна. М.: Metallurgy. 1968.
2. Панченко И. Г., Яковлева Н. Г., Осинцев О. Г. Разработка и внедрение литья полых заготовок непрерывным горизонтальным способом на Кольчугинском заводе ОЦМ // Материалы науч.-тех. совещ. на тему: «Непре-

рывные и совмещенные методы литья и прокатки цветных металлов и их сплавов». Л., 1974.

3. Марукович Е. И., Брановицкий А. М., Харьков В. А. Двухмерная математическая модель для расчета затвердевания цилиндрической непрерывной отливки // Литье и металлургия. 2002. № 1.

4. Марукович Е. И., Брановицкий А. М., Харьков В. А. Расчет затвердевания цилиндрической непрерывной отливки // Литье и металлургия. 2001. № 2.



ОГНЕУПОРЫ

ПРОМЭНЕРГО МАШ

Реализуем со склада в г. Минске

Изделия ОГНЕУПОРНЫЕ ведущих Российских производителей

Кирпич огнеупорный ША-5, ША-6, ША-9 ША-22, ША-44, ША-45, ША-47
Изделия фасонные
Шамот молотый, глина, мертель
Изделия для футеровки ковшей, вагранок, вращающихся печей

Кирпич строительный керамический
Графит ГЛ-1 (серебристый)

Предприятие "ПРОМЭНЕРГОМАШ"

тел/факс (017) 508-01-74
(029) 663-23-71