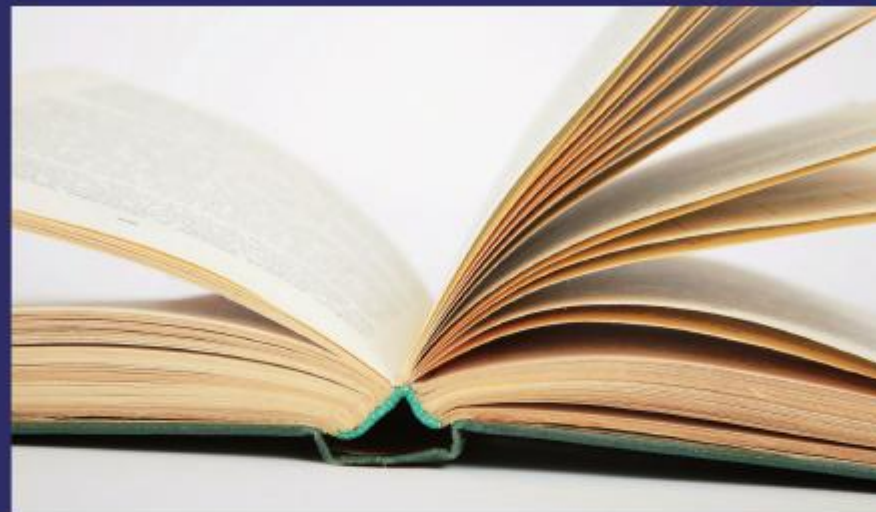


Монография содержит исследования по тепловой работе широкого класса промышленных печей. Рассмотрены условия эксплуатации, анализ механизмов разрушения футеровок металлургических агрегатов. Представлены материалы изучения теплофизических свойств применяемых огнеупорных и теплоизоляционных материалов. Приводится методика расчёта напряженно-деформированного состояния различных типов конструкций футеровок. Предлагаются способы контроля за тепло-напряженным состоянием высокотемпературных ограждений печей. Рассмотрены примеры расчета наиболее ответственных элементов огнеупорной кладки и даны рекомендации конструктивного характера. Книга предназначена для инженерно-технических работников, специализирующихся в области надежности работы футеровок промышленных печей; она может быть также использована студентами, магистрантами и аспирантами металлургических и теплоэнергетических специальностей, изучающих вопросы повышения надежности работы высокотемпературных агрегатов.

Тепловые условия разрушения футеровок



Александр Никифоров
Евгений Приходько

Тепловые условия разрушения футеровок высокотемпературных установок

Монография

Никифоров Александр Степанович доктор технических наук; профессор, заведующий кафедрой «Теплоэнергетика» Павлодарского Государственного университета им. С. Торайгырова. Приходько Евгений Валентинович кандидат технических наук; ассоциированный профессор кафедры «Теплоэнергетика» Павлодарского Государственного университета им. С. Торайгырова.



978-3-659-64754-3

Никифоров, Приходько

LAP LAMBERT
Academic Publishing

Александр Никифоров
Евгений Приходько

Тепловые условия разрушения футеровок
высокотемпературных установок

Александр Никифоров
Евгений Приходько

**Тепловые условия разрушения
футеровок высокотемпературных
установок**

Монография

LAP LAMBERT Academic Publishing

Impressum / Выходные данные

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek: Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Alle in diesem Buch genannten Marken und Produktnamen unterliegen warenzeichen-, marken- oder patentrechtlichem Schutz bzw. sind Warenzeichen oder eingetragene Warenzeichen der jeweiligen Inhaber. Die Wiedergabe von Marken, Produktnamen, Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen u.s.w. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutzgesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Библиографическая информация, изданная Немецкой Национальной Библиотекой. Немецкая Национальная Библиотека включает данную публикацию в Немецкий Книжный Каталог; с подробными библиографическими данными можно ознакомиться в Интернете по адресу <http://dnb.d-nb.de>.

Любые названия марок и брендов, упомянутые в этой книге, принадлежат торговой марке, бренду или запатентованы и являются брендами соответствующих правообладателей. Использование названий брендов, названий товаров, торговых марок, описаний товаров, общих имён, и т.д. даже без точного упоминания в этой работе не является основанием того, что данные названия можно считать незарегистрированными под каким-либо брендом и не защищены законом о брендах и их можно использовать всем без ограничений.

Coverbild / Изображение на обложке предоставлено: www.ingimage.com

Verlag / Издатель:

LAP LAMBERT Academic Publishing

ist ein Imprint der / является торговой маркой

OmniScriptum GmbH & Co. KG

Heinrich-Böcking-Str. 6-8, 66121 Saarbrücken, Deutschland / Германия

Email / электронная почта: info@lap-publishing.com

Herstellung: siehe letzte Seite /

Напечатано: см. последнюю страницу

ISBN: 978-3-659-64754-3

Copyright / АВТОРСКОЕ ПРАВО © 2014 OmniScriptum GmbH & Co. KG

Alle Rechte vorbehalten. / Все права защищены. Saarbrücken 2014

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1 ХАРАКТЕРИСТИКА ТЕПЛОЙ РАБОТЫ ФУТЕРОВОК ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ УСТАНОВОК	9
1.1 Принципы исследования термонапряженного состояния огнеупорной кладки высокотемпературных установок	9
1.2 Применение периклазовых огнеупоров в футеровках промышленных печей	13
1.3 Основные свойства огнеупорных материалов	15
1.4 Исследование зависимости предела прочности от температуры	29
1.5 Оценка термостойкости футеровки под воздействием высокотемпературной среды	37
2 ЗАВИСИМОСТЬ ИНТЕНСИВНОСТИ ИЗНОСА ФУТЕРОВОК ОТ УСЛОВИЙ ИХ ЭКСПЛУАТАЦИИ	48
2.1 Характеристика условий службы футеровки руднотермических печей	48
2.2 Специфика работы кладки конвертеров	52
2.3 Условия эксплуатации ферросплавных печей	56
2.4 Характеристика условий службы футеровки вращающихся печей	59
2.5 Условия эксплуатации сталеразливочных ковшей	63
2.6 Анализ механизмов разрушения конструкций футеровок	69
3 МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА СТОЙКОСТЬ ОГНЕУПОРНОЙ КЛАДКИ	76
3.1 Методы моделирования термонапряженного состояния футеровки	76
3.2 Модели расчета футеровок высокотемпературных установок	83

3.3	Определение термических напряжений	93
4	МЕТОДЫ И СРЕДСТВА КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ КЛАДКИ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ АГРЕГАТОВ	102
4.1	Проблемы контроля параметров футеровки в процессе ее эксплуатации	102
4.2	Контроль за стойкостью кладки по изменению электрического сопротивления	106
4.3	Способ локального оперативного диагностирования теплового состояния футеровки	110
4.4	Расчетный метод бесконтактного способа контроля температуры кладки ВТУ	114
5	НЕСТАЦИОНАРНЫЕ РЕЖИМЫ ЭКСПЛУАТАЦИИ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ УСТАНОВОК	122
5.1	Исследование режимов разогрева печей кальцинации и спекания	122
5.2	Режимы охлаждения и их влияние на термостойкость футеровки	128
5.3	Влияние геометрических и теплофизических параметров на службу огнеупоров в кладке ВТУ	132
6	КОМПЛЕКСНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ СЛУЖБЫ КОНВЕРТЕРОВ	145
6.1	Экспериментальное определение температурных полей в огнеупорной части фурменного пояса	145
6.2	Нестационарные режимы работы кладки конвертера	153
6.3	Моделирование термонапряженного состояния фурменной зоны	160
6.4	Расчет кладки конвертера на температурные воздействия с учетом влияния магнетитовой засыпки	173
7	АНАЛИЗ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО	184

	СОСТОЯНИЯ КОНСТРУКЦИЙ РУДНОТЕРМИЧЕСКИХ ПЕЧЕЙ	ФУТЕРОВКИ
7.1	Изучение тепловой работы ВТУ	184
7.2	Закономерности пропитывания подины штейновым расплавом	188
7.3	Тепловое состояние кладки боковых стен	207
7.4	Подбор огнеупорных материалов	215
8	ФУТЕРОВКА СТАЛЕРЕЗЛИВОЧНОГО КОВША ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ПРОЦЕССОВ	219
8.1	Сушка футеровки сталеразливочных ковшей как начальный этап процесса разогрева	219
8.2	Расчет термических напряжений в футеровке сталеразливочного ковша при сушке и нагреве	230
	Список литературы	235

Список литературы

1. Современные огнеупоры: ресурсосбережение и применение в металлургических технологиях: Сб. научн. тр. / под ред. проф., д.т.н. А.Н. Смирнова. – Донецк: Ноулидж. – 2013. – 179 с.
2. Троянкин Ю.В. Оптимизация графика разогрева печей // Сталь. 1997. №12. с. 70 – 72.
3. Иванов Н.Н. Пути совершенствования тепловой подготовки сталеразливочных ковшей // Сталь. 1997. №12. с. 20 – 24.
4. Ярушина Т.В., Шатилов О.Ф., Коптелов В.Н. Новые углеродсодержащие огнеупоры ОАО «Комбинат Магнезит» для футеровки сталеразливочных ковшей // Новые огнеупоры. 2003. №1. с. 14 – 19.
5. Модуль упругости и прочность на сжатие [Электронный ресурс]. URL: http://www.elter.ru/measuring/modul_Yunga (дата обращения 07.05.2013).
6. Кашеев И.Д., Стрелов К.К., Мамыкин П.С. Химическая технология огнеупоров — М.: Интермет Инжиниринг, 2007. — 752 с.
7. Suto, M. Wear of MgO bricks used for RH degasser / M. Suto, Y. Kawata // Taikabutsu=Refractories. – 2004. – №3. – P. 125
8. Стрелов К.К., Кашеев И.Д., Мамыкин П.С. Технология огнеупоров. М.: Металлургия, 1988. – 528с.
9. Приходько Е.В., Никифоров А.С., Шанов И.В. Инновационный патент № 21807 РК. Способ термомеханических испытаний материалов и устройство для его осуществления, опубл. 15.10.2009, бюл. № 10. – 4с.: ил.
10. Стрелов К.К. Структура и свойства огнеупоров.- Москва: Металлургия, 1982.- 208 с.
11. Стрелов К.К., Кашеев И.Д. Теоретические основы технологии огнеупорных материалов. – Москва: Металлургия, 1996.- 608 с.
12. Кингери У.Д. Введение в керамику. – Москва: Стройиздат, 1967.- 499 с.

13. Волков- Гусович Т.Д., Янич Р.М. Взаимосвязь параметра сопротивления разрушению и критических величин разности температур для керамических материалов // Огнеупоры и техническая керамика.- 1997, №2.- С.22-24.
14. Даукнис В.И., Казакевичус К.А., Працяквичус Г.А. Исследование термической стойкости огнеупорной керамики. – Вильнюс: Минтис, 1971.- 151 с.
15. Перас А.Я. Оценка трещиностойкости и трещиностойчивости огнеупоров //Огнеупоры.- 1985, №9. -С.11-14.
16. Griffith A.A. The phenomenon of rupture and floin solids //Phil.Trans. Roy. Soc.- 1920.-V.A221, № 4.-P.163-198.
17. Hasselman D.P.H. Figures-of-Merit for the Thermal Stress Resistance of Hige-Temperature Brittle Materials: A'Review //Ceram. Int.-1978, № 4.-P.147-150.
18. Якушев В.К. Процессы разрушения футеровок тепловых агрегатов.- Алмата: Наука, 1987. -208 с.
19. Писаренко Г.С., Руденко В.П., Третьяченко Г.Н. и др. Прочность материалов при высоких температурах.- Киев: Наукова думка, 1966.- 796 с.
20. Weibull W. A Statistical theory of the Strength of materials //The Royal Swidish Ins. For Enqeen. Reas.-1939, № 151.-P.2083-2091.
21. Swain M.V. Inelastic Deformation of Mq-PSZ and its Significance for strength - Toughness Relationship of Zirconia Toughened Ceramics //Acta metal. - 1985.- V33. № 11.-P.2083-2091.
22. Гогоци Г.А. Неупругость керамики и огнеупоров испытываемых на термостойкость //Проблемы прочности. -1973, № 10. - С. 26-29.
23. Гогоци Г.А. К вопросу о классификации монодеформирующихся материалов по особенностям их поведения при нагружении //Проблемы прочности. -1977, № 1. -С. 77-82.
24. Гогоци Г.А. К вопросу о термостойкости гетерогенной керамики и огнеупоров //Огнеупоры. -1993, № 11.- С. 2-8.

25. Кузнецов А.Т., Козушкин И.В., Сенявин Н.К., Шершнев А.А. Напряженно-деформированное состояние и разрушение огнеупоров при тепловом воздействии //Огнеупоры.-1987, №2.- С.52-56.
26. Иванов Д.А., Балабанов С.А., Фомин Г.А, Аладьев Н.А., Вальяно Г.Е. К вопросу о термостойкости керамических материалов //Огнеупоры и техническая керамика.-1998, №3.-С.5-10.
27. Никифоров А.С. Оценка термонапряженного состояния футеровки металлургических печей // Доклады Национальной Академии наук Республики Казахстан. – 2003, №6. - С.103-107.
28. Кунио Асан, Хирочи Оба и др. Огнеупоры и футеровки. –Москва: Металлургия, 1976.- 415 с.
29. Никифоров А.С. Исследование термонапряженного состояния фурменной зоны конвертера // Промышленность Казахстана.-2002, № 6 (15). - С.86-87.
30. Никифоров А.С. Служба футеровки ферросплавной печи под воздействием высоких температур//В кн. «Проблемы и перспективы развития ферросплавного производства. – Актобе: NOBEL, 2003.-С.110.
31. Лариков В.А., Гилёва Ю.М. Причины взрывных «хлопков» под сводом рудно-термических печей и их предупреждения на Джезказганском медеплавильном заводе //Цветная металлургия. Научно-технический бюллетень.-1988, №10.- С.56.
32. Гречко А.В. Повышение стойкости огнеупорной футеровки в агрегатах автогенной плавки сырья цветной металлургии //Огнеупоры и тех.керамика.- 1997, №2.-С.34-38.
33. Регель В.Р., Слуцкер А.И., Томашевский Э.Р. Кинетическая природа прочности твердых тел. – Москва: Наука, 1974.- 560 с.
34. Никифоров А.С. Исследование условий работы электродов рудно-термических печей //ИВУЗ «Цветная металлургия».- 2003, № 4. - С.80-82.
35. Никифоров А.С. Моделирование теплового состояния высокотемпературных агрегатов// В сб. «Проблемы вузовской и прикладной

- науки в РК». – Астана, Евразийский университет им. Гумилева Л.Н, 1999, ч.2. - С.380-383.
36. Никифоров А.С. Надежность работы футеровок металлургических печей. – Павлодар: ЭКО, 2003.- 110 с.
37. Онаев И.А. Физико-химические свойства шлаков цветной металлургии.- Алма-Ата: Наука, 1972. -118 с.
38. Никифоров А.С. Анализ теплового состояния вращающихся печей // Вестник Карагандинского технического университета. 2002. № 1. с.11-12
39. Хорошавин Л.Б., Овчинников И.И., Гимпельман Е.Я. Коэффициент оптимальности футеровок тепловых агрегатов // Огнеупоры. 1994. №12. с. 26 – 27.
40. Александрова С.П., Федорова В.В., Чернова Н.П. Исследование шлакоустойчивости огнеупоров футеровки дуговой сталеплавильной печи //Огнеупоры.- 1995, № 9. -С.18-20.
41. Дерабин В.А. Влияние градиента температур на капиллярную миграцию компонентов шлака в огнеупорных изделиях //Огнеупоры. -1992, №5. - С.15-19.
42. Шам П.И., Елистратова Н.Ю., Анисимов Н.К. и др. Исследование износа футеровки большегрузных электросталеплавильных печей //Известия ВУЗов.- Черная металлургия.- 1991, № 5.- С.25-27.
43. Кащеев И.Д. Основы формирования защитных покрытий на огнеупорах //Огнеупоры. - 1991, № 3.- С.5-7.
44. Сизов В.И. Новые решения в футеровке отечественных дуговых сталеплавильных печей //Огнеупоры. - 1993, № 5. - С.37-38.
45. Никифоров А.С., Плевако А.П. Расчет и анализ напряженного состояния подины печи РТП-1 // Вестник Павлодарского университета. - 2003, № 5 (14). - С.104-107.
46. Шкляр Ф.Р., Сургучева Е.Л., Калугин Я.П. Оценка конструкционной термостойкости футеровки //Огнеупоры.- 1988, № 5. – С. 9-13.
47. Троянкин Ю.В. Проектирование и эксплуатация огнетехнических установок. –Москва: Энергоатомиздат, 1988. - 257 с.

48. Басьяс И.П., Кащеев И.Д., Сизов В.И., Фарафанов Г.А., Белозеров М.М. Футеровка дуговых электросталеплавильных печей. – Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 1994. - 72 с.

49. Никифоров А.С. Повышение надежности работы футеровки руднотермической печи //Комплексное использование минерального сырья.-2002, № 6. - С. 70-72.

50. Коваленко А.Д. Основы термоупругости. Киев, Наукова думка, 1970. 307 с.

51. Рихтмайер Р., Мортон К. Разностные методы решения краевых задач. М.: Мир.1972. 418 с.

52. Crank Y., Nicolson P. A practical method for numerical evaluation of solutions of partial differential equations of the heat-conduction type // Proc. Cambridge Philos. Soc. 43 (1947). p.50-67

53. Яненко Н.Н. Метод дробных шагов решения многомерных задач математической физики. Новосибирск. Наука. 1967. 195 с.

54. Коновалов А.Н. Об одной итерационной схеме решения статических задач теории упругости // Ж. вычисл. матем. и матем. физики. 1964. Т.4. № 5.с.942-945

55. Боли Б., Уэйнер Д. Теория температурных напряжений. М. Мир.1964.518 с

56. Волков Б.А. Численные методы. М. Наука. 1982. 256 с.

57. Тимошенко С.П. Курс теории упругости. Киев. Наукова думка.1972. 501 с.

58. Иванов В.И. Курс дозиметрии. – Москва: Атомиздат, 1978. - 392 с.

59. Бошняк Л.Л. Измерения при теплотехнических исследованиях.- Ленинград: Машиностроение, 1974.- 448 с.

60. Олейник Б.Н., Лаздина С.И., Лаздин В.П., Жагулло О.М. Приборы и методы температурных измерений.-Москва: Из-во стандартов, 1987.- 296 с.

61. Теория и техника теплофизического эксперимента./Ю.Ф. Гортышов, Ф.Н.Дресвянников, Н.С. Идиатуллин и др.-Москва: Энергоатомиздат, 1985. - 360 с.

62. Клокова Н.П. Тензодатчики для измерений при повышенных температурах. – Москва: Машиностроение, 1965. – 120 с.

63. Жуков А.Г., Горюнов А.Н., Кальфа А.А. Тепловизионные приборы и их применение.- Москва: Радио и связь, 1983. -168 с.

64. Свет Д.Я. Оптические методы измерения истинных температур.-Москва: Наука, 1980. - 544 с.

65. Лазерный контроль атмосферы. / Под ред.Хинкли Э.Д.-Москва: Мир, 1979.- 416 с.

66. Вавилов В.П. Тепловые методы неразрушающего контроля: Справочник, - Москва: Машиностроение, 1991.- 240 с.

67. Турингин А.М., Новицкий П.В., Левшина Е.С. и др. Электрические измерения неэлектрических величин.-Ленинград: Энергия, 1975. -576 с.

68. Предварительный патент Республики Казахстан № 16934. Способ определения температуры внутренней поверхности футеровки промышленных печей /Никифоров А.С., Приходько Е.В., Плевако А.П. опубликован 15.02.2006. Бюл. №2.-3 с: ил.

69. Предварительный патент Республики Казахстан № 16015. Способ определения теплофизических параметров материалов /Никифоров А.С., Приходько Е.В; опубликован 15.07.2005. Бюл. №7.- 4 с: ил.

70. Кремер Н.Ш. Теория вероятностей и математическая статистика.-Москва: ЮНИТИ – ДАНА, 2000. - 543 с.

71. Рафалович И.М. Теплопередача в расплавах, растворах и футеровке печей и аппаратов. – Москва: Энергия, 1977. -303 с.

72. Огнеупоры для промышленных агрегатов и топок. Справочник в 2-х кн. /Под ред Кащеева И.Д. –Москва: Интернет Инжиниринг, 2000. - 663 с.

73. Якушев В.К., Басина И.В. и др. Влияние скорости разогрева тепловых агрегатов на стойкость футеровки // Комплексное использование минерального сырья. 1982. № 1. с.68-71

74. Боровиков Г.Ф., Башкова А.И., Гусак Г.И. Повышение стойкости футеровки вращающихся печей для обжига известняка // Сталь. 1994. № 7. с.83-85

75. Шубин В.И. Футеровка цементных вращающихся печей. - М. Стройиздат. 1975. 186 с.
76. Михеев М.А., Михеева И.М. Основы теплопередачи. - М. Энергия. 1973. 320 с.
77. Шалыгин Л.М. Конвертерный передел в цветной металлургии.- Москва: Металлургиздат, 1965. - 242 с.
78. Ванюков А.В., Зайцев В.Я. Теория пирометаллургических процессов. – Москва: Металлургия, 1993. - 384 с.
79. Огнеупоры и их применение /Под ред.Инамуры Я.-Москва: Металлургия, 1984. - 448 с.
80. Парамонов А.М. Оптимизация конструкции теплового ограждения промышленных печей //Промышленная энергетика. -2001, №3. - С.41-43.
81. Лурье А.И. Теория упругости. – Москва: Наука, 1970.- 509 с.
82. Зенкевич О., Морган К. Конечные элементы и аппроксимация. – Москва: Мир, 1986. - 318 с.
83. Латышев В.И. Термонапряженное состояние полуплоскости, ослабленной конечным числом круговых отверстий //В сб. Работы по механике сплошных сред. - Тула.- 1974. - С.132-135.
84. Vadasz P., Tomasek K., Rabatin L/ Corrosion of refractories by copper smelting slags //Met. I odlew. - 2000. – 26, №1. - С.21-29.
85. Струнский Б.М. Расчеты руднотермических печей.-Москва: Металлургия, 1982. - 113 с.
86. Чунаев В.В., Словиковский В.В., Журавлева С.Н., Нагорных С.И. Испытание плавленозернистых периклазохромитовых огнеупоров в конвертерах никелевого производства// Цветные металлы. - 1982, №22.- С.39-40.
87. Саттарова А.С., Тихонова Т.А. Исследование состава и структуры огнеупоров после службы в конвертерах //Комплексное использование минерального сырья. -1982, №11. - С.58-61.

88. Фадеев О.Н., Кашеев И.Д., Худяков И.Ф., Харитиди Г.П. Влияние оксида алюминия в железосиликатных расплавах на минералообразование в процессе и взаимодействия с магнезитом //Комплексное использование минерального сырья. - 1985, №7. - С.69-72.
89. Огнеупоры для нагревательных и термических печей: Справочное издание / Ладышев М.Г., Гусовский В.Л., Кашеев Н.Д.-Москва: Теплоэнергетик, 2002. - 240 с.
90. Китаев Б.И., Зобнин Б.Ф., Ратников В.Ф. и др. Теплотехнические расчеты металлургических печей.- Москва: Металлургия, 1970. - 528 с.
91. Меджибожский М.Я., Капустин Е.А., Шемякин А.В. и др. Скорость плавления металлического лома в мартеновских печах при продувке ванны кислородом // ИВУЗ. Черная металлургия. -1972, № 11. - С. 39-42.
92. Никифоров А.С., Приходько Е.В. К вопросам определения теплопроводности огнеупорных материалов //Вестник Павлодарского университета. - 2003, № 5(14). - С.107-109.
93. Бегляров Э.М. Исследование термостойкости высокотемпературных материалов //Огнеупоры. -1988, № 5. - С.16-17.
94. Огнеупорные материалы и их свойства: Справочное издание.- Висбаден, 1994. - 102 с.
95. Стрелов К.К., Кашеев И.Д. Технический контроль производства огнеупоров.-Москва: Металлургия, 1986.- 240 с.
96. Долотов Г.П., Кондаков Е.А. Печи и сушила литейного производства. М.: Машиностроение, 1984. – 232с.
97. Жарницкий М.Д. Режим разогрева футеровок сталеразливочных и промежуточных ковшей // Сталь. 1995. №11. с. 20 – 22.
98. ГОСТ 2642.1-86 Огнеупоры и огнеупорное сырьё. Метод определения гигроскопической влаги – Взамен ГОСТ 2642.1-81; Введ. 27.05.86. – М.: Изд – во стандартов, 1986. – 8с.