

42. Шестаков Н.А., Сергеев Ю.Н., Тимофеев В.Н., Седунов В.К., Жуков О.В. Прессование профилей из стружки цветных металлов // Кузнечно-штамповочное производство, 1986. — № 10. — С. 36–37.
43. Шиняев Л.Я., Литвинцев А.И., Пивкина О.Г. Исследование структуры и свойств сплавов системы Al-Si при кристаллизации под высоким давлением // ФТВД, 1982. — № 8. — С. 86–89.
44. Золоторевский В.С., Бычков Р.Б. О перспективах использования литейных алюминиевых сплавов из вторичного сырья взамен сплавов из первичных металлов // Цветные металлы, 1986. — № 6. — С. 7–10.
45. Захаров В.В., Кукушкин Ю.Н., Царев А.И., Фисенко И.А. Скоростное прессование труднодеформируемых алюминиевых сплавов // Цветные металлы, 1985. — № 8. — С. 103–106.
46. Елагин В.И., Захаров В.В., Кукушкин Ю.Н. Некоторые металлургические вопросы прессования алюминиевых сплавов // Цветные металлы, 1981. — № 8. — С. 72–74.
47. Береснев Б.И., Езерский К.И., Трушин Е.В., Каменецкий Б.И. Высокие давления в современных технологиях обработки материалов. — М.: Наука, 1988. — 245 с.
48. Береснев Б.И., Булычев Д.К. Механические свойства алюминия и меди после выдавливания их жидкостью высокого давления // Физика металлов и металловедение, 1963. — 16, вып. 1. — С. 117–123.
49. Булычев Д.К., Береснев Б.В., Гайдуков М.Г. и др. О возможности залечивания пор и трещин в металлах в процессе пластической деформации под высоким гидростатическим давлением // Физика металлов и металловедение, 1964. — 18, вып. 3. — С. 778–783.
50. Булычев Д.К., Береснев Б.В., Гайдуков М.Г. Дефекты структуры и пластическая деформация меди при высоких давлениях // Докл. АН СССР, 1964. — Т. 156. — № 1. — С. 67–71.
51. Механические свойства материалов под высоким давлением // Под ред. Х.И. Пью. — М.: Мир, 1973 (В пер.). Вып. 2.: Применение высоких давлений в технологических процессах. — 370 с.: ил.
52. Мочалов Г.А., Мартынов Е.Д., Береснев Б.И. Механические свойства молибдена после гидроэкструзии // Физика металлов и металловедение, 1968. — 25, вып. 2. — С. 357–360.
53. Береснев Б.И., Верещегин Л.Ф., Рябинин Ю.Н. О влиянии гидростатического давления на изменение механических свойств алюминия после больших пластических деформаций // Физика металлов и металловедение, 1959. — вып. 1. — С. 128–132.

© Шевелев А.И., 2003

УСЕНКО Ю.И., ИВАНОВ В.И., СКАЧКОВ В.А., КОВАЛЬ Н.В., ТИЩЕНКО П.И., ТИМОШЕНКО С.Н. (НМЕТАУ, Г.ДНЕПРОПЕТРОВСК, ЗГИА, Г.ЗАПОРОЖЬЕ, ДОННТУ, Г.ДОНЕЦК)

## **СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕПЛОЙ РАБОТЫ ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ОТЖИГА СТАЛЬНОГО ПРОКАТА В БУНТАХ И РУЛОНАХ<sup>1</sup>**

*Представлены результаты экспериментальных исследований и электротеплового моделирования тепловой работы одностопных колпаковых электропечей типа СГЗ и ПСК-210 при отжиге стального проката в бунтах и рулонах.*

Повышение требований к качеству отжига проволоки в бунтах и холоднокатаной ленты в рулонах вызывает необходимость совершенствования тепловой работы оборудования для его реализации.

В сталепроволочном цехе ОАО «Запорожский сталепрокатный завод» отжиг бунтов проволоки марки БСтОМ различных типоразмеров осуществляют в одностопных электропечах типа СГЗ с равномерным размещением установленной мощности (180 кВт) в двух зонах по высоте нагревательного колпака. Проволоку загружают в стопу из трех бунтов массой до 1,0 т и отжигают по режиму, предусматривающему на-

<sup>1</sup> В работе принимали участие Ю.Ф.Горшков, В.И.Кулибанов, П.И.Назар, А.А.Яковлев и В.А.Скуднов

грев в среде защитного газа при максимальной тепловой нагрузке печи до температуры  $750^{\circ}\text{C}$  и охлаждение под отключенным колпаком до температуры  $150^{\circ}\text{C}$ .

Опыт эксплуатации печей данного типа показывает, что температурное поле боковой поверхности кладки нагревательного колпака характеризуется значительной неравномерностью. Ее наличие обусловлено существенным отставанием уровня температуры в нижней части колпака, граничащей с массивным стендом, от ее уровня в его верхней части, что сопровождается неравномерным распределением температуры на поверхности стопы бунтов проволоки. Как следствие, значительная часть нижнего бунта нагревается намного медленнее, чем основная масса стопы (величина перепада температуры между сходственными точками верхнего и нижнего бунтов составляет  $150\text{--}160^{\circ}\text{C}$ ), и его температура не достигает величины ( $620^{\circ}\text{C}$ ), обеспечивающей получение заданного уровня физико-механических свойств проволоки.

С целью ликвидации указанного недостатка в электропечах типа СГЗ проводили комплекс исследований, направленных на технически обоснованное перераспределение установленной мощности между различными зонами нагревательного колпака, а также на разработку рационального режима отжига обрабатываемой стальной проволоки.

На электроинтеграторе типа ЭИ-12 с использованием электротепловой модели [1] изучали<sup>2</sup> влияние размещения источников тепловой энергии (нагревателей) в рабочем объеме колпаковой электропечи типа СГЗ на качество нагрева стопы бунтов стальной проволоки. Изменяли значения мощности кольцевых поясов нагревателей ленточного типа в различных зонах рабочего объема печи и оценивали равномерность нагрева боковой поверхности бунтов проволоки по высоте стопы.

Проведенными экспериментами установлено, что распределение установленной мощности по высоте нагревательного колпака печи, при котором обеспечивается равномерный подвод теплоты к различным бунтам проволоки достигается, с одной стороны, при увеличении установленной мощности нижней (первой) зоны колпака от  $90,0$  до  $95,0$  кВт, а, с другой, при уменьшении до  $75,3$  кВт установленной мощности его верхней (второй) зоны. При этом размещение мощности кольцевых поясов нагревателей по высоте нижней зоны колпака описывает уравнение:

$$P_i = (0,42 \delta_i^2 - 0,87 \delta_i + 1) 10^{-2} \cdot P, \quad (1)$$

где  $P_i$ ,  $P$  — мощность  $i$ -го кольцевого пояса нагревателей нижней зоны колпака и общая мощность зоны, кВт соответственно;  $\delta_i$  — относительная высота размещения  $i$ -того кольцевого пояса нагревателей нижней зоны,  $\delta_i = h_i/H$ ;  $h_i$  — расстояние от продольной оси  $i$ -го кольцевого пояса нагревателей до основания колпака, м;  $H$  — высота нижней зоны колпака, м.

В то же время не зафиксировали заметное улучшение равномерности распределения температуры по высоте стопы бунтов проволоки при перераспределении мощности между кольцевыми поясами нагревателей верхней зоны, при этом условия их размещения в данной зоне существенно усложняются.

Промышленные испытания колпаковой электропечи [2] показали, что при предлагаемом перераспределении тепловой мощности в ее рабочем объеме наблюдается существенное повышение равномерности роста температуры наружных витков бунтов проволоки: в конце периода нагрева величина температурного перепада по высоте стопы не превышает  $20\text{--}25^{\circ}\text{C}$ , т.е. находится в допустимых технологических пределах.

Далее определяли рациональные температурно-временные параметры режима отжига, позволяющие обеспечить как стабильное качество термической обработки проволоки марки БСтОМ, так и достаточно высокую интенсивность ее нагрева. Известно,

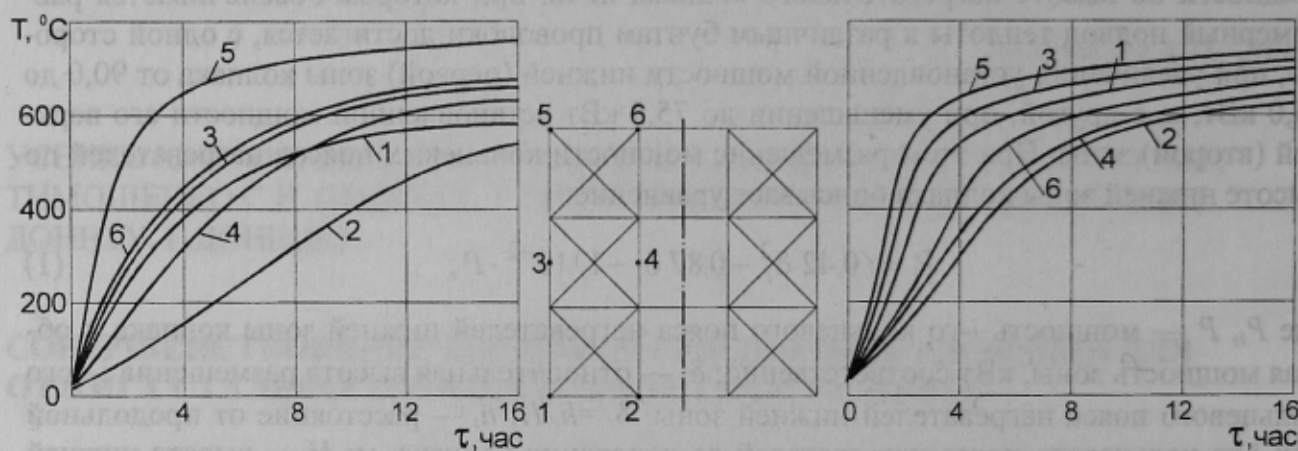
<sup>2</sup> С участием Ю.В.Михеева и Е.Н.Воробьевой

что подъем температуры внутренних витков бунтов данной проволоки в колпаковых электропечах типа СГЗ ограничивается из-за наличия значительного температурного перепада по сечению бунтов, величина которого в конце периода нагрева достигает 80–90<sup>0</sup>С.

Для изучения возможности интенсификации процесса отжига исследуемой проволоки его моделировали на электроинтеграторе ЭИ-12. Исходными данными для моделирования служили среднемассовая температура проволоки в начале и в конце отжига, варьируемыми величинами — командные (максимальные) температуры для каждой зоны нагревательного колпака, продолжительность периодов нагрева и выдержки бунтов проволоки под отключенным колпаком на отдельных стадиях обработки, выходным параметром служил конечный перепад температуры по сечению бунтов отжигаемой проволоки, значение которого задавали (20±5<sup>0</sup>С).

Как показали результаты моделирования, вышеуказанным требованиям в наибольшей степени удовлетворяет режим отжига, при котором стальную проволоку нагревают в течение 8,9 ч (в нижней зоне при командной температуре 850<sup>0</sup>С, в верхней зоне — при температуре 820<sup>0</sup>С) с последующей выдержкой в течение 2,3 ч под отключенным колпаком.

Опытно-промышленные опробования предложенного режима осуществляли на одной из электропечей типа СГЗ сталепроволочного цеха, оборудованной нагревательным колпаком с перераспределенной мощностью. Идентичность условий экспериментов достигали путем отжига бунтов проволоки марки БСтОМ одинаковых размеров, массы и металла одной плавки по существующему и предложенному режимам. Контроль скорости нагрева проволоки (по высоте стопы и сечению бунтов) осуществляли по показаниям шести гибких термоэлектрических термометров типа ХА (рис.1).



**Рис. 1.** Динамика изменения температуры в различных точках стопы бунтов стальной проволоки марки БСтОМ при отжиге по существующему (а) и предложенному (б) режимам

Проведенными экспериментами установлено существенное снижение перепада температуры между сходственными точками верхнего и нижнего бунтов проволоки (для наружных витков его величина составила 25–30, для внутренних — 40–45<sup>0</sup>С) в конце периода нагрева в печи, что способствовало выравниванию температурного поля по объему стопы. При этом все участки бунтов проволоки находились в интервале отжигаемости (при температуре выше 620<sup>0</sup>С) достаточно длительное время (6,6–7,2 ч). Сокращение продолжительности периода подъема температуры проволоки при отжиге по предложенному режиму по сравнению с величиной, предусмотренной технологической инструкцией, составляет 3,5 ч.

Балансовые испытания электропечи данного типа (табл.1), проведенные после перераспределения мощности по высоте нагревательного колпака, при существующем и предложенном режимах отжига с использованием известной методики [3], показали, что при отжиге по предложенному режиму наблюдается увеличение доли полезно использованной теплоты на 5,6%, а также снижение потерь теплоты на нагрев стенда печи и через ее футеровку на 4,9 и 2,1% соответственно.

**Табл. 1.** Тепловой баланс колпаковой газовой печи до (вариант I) и после (вариант II) реализации предложенных мероприятий

Статьи теплового баланса	Вариант I		Вариант II	
	кВт	%	кВт	%
Приход теплоты:				
- от нагревательных элементов	3103,7	100,0	2712,3	100,0
Расход теплоты				
- на нагрев стопы бунтов	1210,5	39,0	1210,5	44,6
- на нагрев муфеля и защитного газа	286,6	9,2	286,6	10,6
- на нагрев стенда печи	638,4	20,6	426,5	15,7
- потери через футеровку печи	968,2	31,2	788,7	29,1
Итого	3103,7	100,0	2712,3	100,0

Сопоставление количественных показателей качества проволоки (временное сопротивление на разрыв  $\sigma_B$ , относительное удлинение  $\delta$ ) после отжига по существующему и разработанному режимам (табл.2) зафиксировало снижение среднеквадратичного отклонения на 20–35% от среднего значения после отжига по предложенному режиму. Микроструктура отожженной проволоки также характеризовалась достаточно высокой однородностью для всех бунтов стопы. В цехе ХПЛ металлургического завода «Красная Этна» (г.Нижний Новгород) стальную холоднокатаную ленту загружают в стопу из десяти рулонов общей массой 19–20 т и отжигают в колпаковых электропечах типа ПСК-210. Печи оборудованы нагревателями ленточного типа, расположенными на внутренней боковой поверхности нижней (142 кВт) и верхней (90 кВт) зон колпака, а также центральным нагревателем цилиндрической формы (33 кВт), размещенным в тупиковой трубе муфеля и обогревающим внутреннюю боковую поверхность стопы рулонов.

**Табл. 2.** Качественные показатели проволоки марки БСтОМ после отжига по существующему (I) и предложенному (II) режимам

Бунт	Предел прочности $\sigma_B$ , МПа		Относительное удлинение $\delta$ , %	
	I	II	I	II
Верхний	315,8 – 359,2	339,1 – 357,6	31,5 – 34,9	33,1 – 35,2
	330,4 (3,1)	347,7 (2,5)	33,1 (1,6)	33,9 (1,2)
Средний	306,3 – 353,5	335,6 – 356,3	29,0 – 33,6	32,5 – 34,3
	321,2 (3,7)	343,5 (2,8)	31,7 (2,1)	33,2 (1,5)
Нижний	279,6 – 342,4	331,8 – 355,2	24,8 – 29,6	31,8 – 33,7
	309,5 (4,1)	339,6 (3,2)	27,2 (2,9)	32,9 (1,9)

Примечание: в числителе приведены пределы изменения показателя; в знаменателе — среднее значение (среднеквадратичное отклонение)

Эффективность тепловой работы колпаковых печей данного типа снижается из-за наличия значительной неравномерности распределения температуры как по высоте стопы, так и в радиальном направлении рулонов, что существенно ухудшает качество

отжига стальной ленты. На нагрев нижних рулонов стопы отрицательное влияние оказывают охлажденный стенд печи и начальное неравномерное распределение температуры по высоте кладки нагревательного колпака.

С целью повышения равномерности нагрева рулонов стальной ленты по объему стопы в колпаковых электропечах типа ПСК-210 на электроинтеграторе ЭИ-12 решали задачу внешнего теплообмена в их рабочем объеме.

На начальном этапе определяли распределение температуры нагревателей по высоте рабочего объема печи при равенстве величин тепловых потоков, подводимых к разным участкам стопы рулонов, и различном значении ее суммарной мощности. Исследования показали, что максимальную величину температуры и мощности нагревателей наблюдали для нижнего участка рабочего объема, а минимальную — для его верхнего участка.

Далее установили, что степень перераспределения мощности нагревателей, обеспечивающих равномерный подъем температуры рулонов по высоте стопы, возрастает с повышением температуры кладки нагревательного колпака и неравномерности температурного поля по его высоте, а также при уменьшении температуры кладки стенда печи.

Кроме того, были зафиксировано, что с увеличением установленной мощности печи степень перераспределения мощности в верхней части ее рабочего объема уменьшается, а в нижней — увеличивается. При одной и той же мощности печи повышение температуры кладки нагревательного колпака сопровождается ростом температуры нагревателей. Так, при повышении температуры кладки колпака от 600–800 до 700–900<sup>0</sup>С в нижней четверти рабочего объема печи зафиксировано увеличение температуры нагревателей на 75<sup>0</sup>С.

Как свидетельствуют результаты проведенных исследований, для обеспечения равномерного нагрева наружной боковой поверхности стопы рулонов необходимо в нижней четверти рабочего объема печи сосредоточить до 58% установленной мощности с уменьшением ее величины в направлении от стенда к своду, а в верхней четверти нагреватели должны отсутствовать.

На электротепловой модели также исследовали распределение удельных тепловых потоков на внутренней боковой поверхности рулонов ленты по высоте стопы при неизменности мощности по длине центрального нагревателя. Установлено, что в случае применения центрального нагревателя мощностью 33 кВт при температуре поверхности стальной ленты равной 600<sup>0</sup>С тепловые потоки, подводимые к верхней четверти стопы рулонов, примерно в пять раз превышают тепловые потоки, подводимые к ее нижней четверти.

Подбором параметров источников (центрального нагревателя), обеспечивающих равенство подвода тепловых потоков к различным участкам по высоте стопы, определяли распределение мощности по длине центрального нагревателя, при котором внутренняя боковая поверхность стопы рулонов нагревается с минимальной температурной неравномерностью. По результатам проведенных исследований установлено, что для решения поставленной задачи в нижней трети центрального нагревателя необходимо разместить 40–50%, а в верхней трети — 10–30% его установленной мощности.

Рациональное перераспределение мощности нагревателей по высоте колпака печей типа ПСК-210 осуществляли по принципу ее размещения в печах типа ПСК-180 согласно зависимости [4]:

$$P_i = 32,95 h_i^2 - 67,10 h_i + 45,05, \quad (2)$$

где  $P_i$  — мощность  $i$ -го пояса нагревателей колпака, кВт;  $h_i$  — расстояние от основания колпака до  $i$ -го пояса нагревателей, м.

Мощность центрального нагревателя увеличили до 42 кВт и сосредоточили 40% установленной мощности в его нижней трети.

Как показала промышленная проверка разработанных предложений по рациональному размещению установленной мощности в рабочем объеме действующих колпаковых электропечей ПСК-210<sup>3</sup>, зафиксировано существенное повышение равномерности нагрева стопы рулонов стальной ленты со стороны ее внутренней боковой поверхности: величина перепада температуры по высоте стопы на внутренней и наружной боковых поверхностях, а также в середине намотки рулонов, уменьшается от 110, 100 и 120 до 35, 25 и 40<sup>0</sup>С соответственно. Длительность подъема температуры в отстающей точке нижнего рулона стопы до минимально допустимого уровня (620<sup>0</sup>С) сокращается с 26,2 до 22,0 ч (рис.2), что позволяет снизить удельный расход электроэнергии с 0,192 до 0,139 кВт·ч/кг.

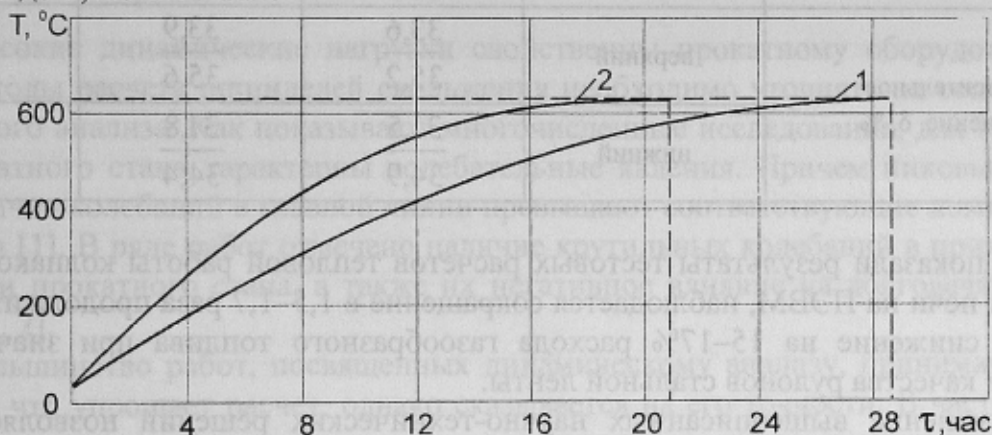


Рис. 2. Кривые изменения температуры в отстающей точке нижнего рулона стопы при нагреве в колпаковой электропечи существующей конструкции (1) и колпаковой электропечи с перераспределенной мощностью (2)

Временное сопротивление разрыву ( $\sigma_B$ ) и относительное удлинение ( $\delta$ ) образцов холоднокатаной ленты (табл.3) после отжига в колпаковой электропечи с перераспределенной мощностью существенно улучшились и удовлетворяют требованиям стандарта. Наряду с этим значительно повышается равномерность распределения механических свойств по длине ленты для различных рулонов стопы. Так, более 75% образцов имели значения показателей  $\sigma_B$  и  $\delta$  в пределах 320–350 МПа и 33,4–35,6% соответственно, 90–95% образцов — 290–370 МПа и 32,8–36,7% соответственно.

Повышение эффективности использования тепловой энергии в колпаковых электропечах данного типа может быть достигнуто путем применения двух разнородных автономных источников ее подвода: топливного (со стороны наружной боковой поверхности стопы рулонов) и электрического (со стороны ее внутренней боковой поверхности) [5].

В печи, оборудованной горелочными устройствами, размещенными в нагревательном колпаке, и центральным сводовым нагревателем, расположенным в тупиковой трубе муфеля, в значительной степени устраняются недостатки, характерные как для электрических (ограниченная мощность из-за недостаточной поверхности для размещения нагревателей, высокая стоимость и дефицитность электроэнергии), так и для газовых печей (низкие температура и степень черноты продуктов горения в тупиковой трубе).

На базе одностопной газовой печи с колпаком цилиндрической формы разработали математическую модель печи с комбинированным подводом тепловой энергии, а

<sup>3</sup> В экспериментах принимали участие В.М.Макаренко и А.В.Некрасов

также составили алгоритм и программу на языке ТУРБО-ПАСКАЛЬ для расчета процесса нагрева под термообработку стопы рулонов.

**Табл. 3.** Механические характеристики стальной ленты после отжига до (числитель) и после (знаменатель) модернизации колпаковой электропечи ПСК-210

Параметры	Рулон	Толщина стальной ленты, мм		
		менее 1,5	1,5–2,0	более 2,0
Предел прочности $\sigma_B$ , МПа	верхний	$\frac{332}{345}$	$\frac{335}{348}$	$\frac{338}{350}$
		нижний	$\frac{316}{338}$	$\frac{321}{342}$
	верхний		$\frac{33,6}{35,2}$	$\frac{33,9}{35,6}$
		нижний	$\frac{31,5}{34,9}$	$\frac{31,8}{34,4}$

Как показали результаты тестовых расчетов тепловой работы колпаковой электрогазовой печи на ПЭВМ, наблюдается сокращение в 1,5–1,7 раза продолжительности нагрева и снижение на 15–17% расхода газообразного топлива при значительном улучшении качества рулонов стальной ленты.

Применение вышеописанных научно-технических решений позволяет значительно улучшить условия генерации и переноса теплоты в рабочем объеме электропечей указанного типа и существенно повысить качество отжигаемого стального проката в бунтах и рулонах.

### Список литературы

1. Усенко Ю.И., Горшков Ю.Ф., Иванов В.И. Электротепловое моделирование внешнего теплообмена в колпаковой электропечи // Изв. Вузов. Черная металлургия, 1992. — № 4. — С. 81–82.
2. Усенко Ю.И., Иванов В.И., Кулибанов В.И. и др. Повышение эффективности использования энергии нагревательных элементов в колпаковых электропечах типа СГЗ // Металлургическая и горнорудная промышленность, 1996. — № 2 (180). — С. 63–66.
3. Каплан В.Г., Спивак Э.И. Методика испытаний нагревательных печей в черной металлургии. — М.: Металлургия, 1970. — 462 с.
4. Усенко Ю.И., Горшков Ю.Ф., Иванов В.И. и др. Совершенствование тепловой работы колпаковых электропечей типа ПСК-210 // Металлургическая и горнорудная промышленность, 1995. — № 1 (175). — С. 70–72.
5. А.с. № 1735690 (СССР), МКИ<sup>5</sup> F27 В 11/00. Электрогазовая колпаковая печь для отжига металла в рулонах / Ю.И.Усенко, В.И.Иванов, В.А.Скачков и др. - № 4730510/02. Заявл. 17.08.89. Оpubл. 23.05.92. — Бюл. № 19.

© Усенко Ю.И., Иванов В.И., Скачков В.А., Коваль Н.В., Тищенко П.И., Тимошенко С.Н., 2003