

В. Г. Лисиенко

Н. В. Соловьева

О. Г. Трофимова

**АЛЬТЕРНАТИВНАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ:  
проблема легирования,  
модельные оценки эффективности**

В. Г. Лисиенко, Н. В. Соловьева,  
О. Г. Трофимова

# **АЛЬТЕРНАТИВНАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ: ПРОБЛЕМЫ ЛЕГИРОВАНИЯ, МОДЕЛЬНЫЕ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ**

Под редакцией действ. члена АИН им. А. М. Прохорова,  
проф., д-ра техн. наук В. Г. Лисиенко



“Теплотехник”  
Москва, 2007

УДК 681.5  
ББК 32.965  
С 83

С 83 Лисиенко В. Г., Соловьева Н. В., Трофимова О. Г. Альтернативная металлургия: проблема легирования, модельные оценки эффективности / Под ред. В. Г. Лисиенко. — М.: Теплотехник, 2007. — 440 с.

В монографии рассмотрены основные проблемы, связанные с развитием бескоксовой металлургии. Особое внимание уделено вопросам получения качественных сталей и сплавов на примере легирования ванадием и производства ферроникеля. Описаны разработанные новые процессы легирования стали ванадием и получения ферроникеля. Рассмотрены современные методы энергоэкологического анализа (в разработке УГТУ – Уралэнергочермета). На этих примерах проведен подробный энерго-экологический анализ с целью модельной сравнительной оценки эффективности процессов.

Издание будет полезно для научных и инженерных работников в области металлургии и управления, а также студентов и аспирантов, работающих в этих областях.

Ил. 88. Табл. 77. Библиогр. список 298 назв.

Работа представлена в авторской редакции.

## СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	6
ВВЕДЕНИЕ	9
В1. Бескоксвые процессы и проблемы легирования	9
В2. Ванадий и его перспективы	11
В3. Никель, особенности потребления и производства	20
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК К ВВЕДЕНИЮ	35
1. БЕСКОКСОВЫЕ И МАЛОКОКСОВЫЕ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ	37
1.1. Получение чугуна и полупродукта	37
1.1.1. Процесс РОМЕЛТ	37
1.1.2. Многофункциональный плавильный агрегат	45
1.1.3. Процесс Коррекс	47
1.1.4. Восстановительно-кислородный процесс (малококсовый)	49
1.1.5. Струйно-эмульсионный реактор	52
1.2. Прямое получение железа, металлизация	59
1.2.1. Процесс Мидрекс	62
1.2.2. Процесс Хил	69
1.2.3. Процессы конверсии газа	80
1.3. Сопоставление альтернативных бескоксвых процессов	81
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК К ГЛАВЕ 1	84
2. ПОДХОДЫ К СОЗДАНИЮ И УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЮ КОМБИНИРОВАННЫХ ПРОЦЕССОВ ПРЯМОГО ЛЕГИРОВАНИЯ СТАЛИ И СПЛАВОВ	87
2.1. Ванадий и его традиционная переработка. Бескоксвые методы	87
2.2. Некоторые особенности процесса РОМЕЛТ в связи с технологией ЛП-В	117
2.3. Процессы деванадации чугуна и получения ванадиевого шлака	127
2.4. Титаномагнетитовые окатыши и их металлизация	163
2.5. Плавка в дуговой электропечи при легировании стали ванадием	182
2.5.1. Технология плавки в мощных и сверхмощных дуговых сталеплавильных электропечах	182
2.5.2. Технология прямого легирования при выплавке ванадийсодержащих сталей	184
2.5.3. Перспективы использования дуговой электропечи для прямого легирования стали ванадием	186
2.6. Разработка процесса ЛП-В – комбинированного восстановительного процесса с прямым легированием стали ванадием	188
2.7. Разработка альтернативных бескоксвых процессов производства ферроникеля	192
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК К ГЛАВЕ 2	214

3. СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ И УТОЧНЕНИЕ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ НОВОГО БЕСКОКСОВОГО ПРОЦЕССА ВЫПЛАВКИ ЛЕГИРОВАННОЙ ВАНАДИЕМ СТАЛИ – ПРОЦЕССА ЛП	220
3.1. Усовершенствование варианта схемы процесса ЛП	220
3.2. Особенности функционирования отдельных агрегатов процесса ЛП. Материальные и тепловые балансы	224
3.2.1. Материальный и тепловой балансы выплавки чугуна в агрегате ПЖВ	226
3.2.2. Материальный и тепловой балансы металлизации окатышей в шахтной печи	245
3.2.3. Деванадация чугуна ПЖЗ. Материальный и тепловой балансы выплавки стали в дуговой электропечи	254
3.2.4. Баланс перехода ванадия в сталь	265
3.3. Синхронизация работы отдельных агрегатов процесса ЛП. Расчёт оптимальной пропорции потоков процесса ЛП	267
3.4. Некоторые модификации и перспективы использования процессов ЛП для переработки высокотитанистых титаномагнетитов	275
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК К ГЛАВЕ 3	279
4. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ БЕСКОКСОВЫХ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ	282
4.1. Полный (сквозной) энерго-экологический анализ энерготехнологических процессов	282
4.1.1. Связь энергоёмкости с загрязнением окружающей среды	282
4.1.2. Технологическое топливное число. Технологическое экологическое число	286
4.1.3. Структурированная методика полного сквозного энерго-экологического анализа энерго-технологических процессов	288
4.1.4. Диссипативная методика полного сквозного энерго-экологического анализа энерго-технологических процессов	294
4.1.5. Алгоритм полного энерго-экологического анализа энерготехнологий	298
4.1.6. Программный модуль полного энерго-экологического анализа как элемент экспертной системы	302
4.2. Модели оценки эффективности процессов тепломассообмена	309
4.3. Математическая модель оценки эффективности процесса ЛП	319
4.3.1. Структура математической модели оценки эффективности процесса ЛП	319
4.3.2. Алгоритмы и программное обеспечение расчёта материальных и тепловых балансов процесса ЛП	325
4.3.3. Алгоритмы и программное обеспечение энерго-экологического анализа процесса ЛП	339

4.3.4. Алгоритмы и программное обеспечение расчёта параметров теплообмена шахтной печи процесса ЛП	342
4.3.5. Алгоритмы и программное обеспечение расчёта основной (оптимальной) пропорции потоков процесса ЛП	342
4.3.6. Оценка адекватности математической модели оценки эффективности процесса ЛП	346
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК К ГЛАВЕ 4	355
5. ЭНЕРГО-ЭКОЛОГОЭФФЕКТИВНОСТЬ В МЕТАЛЛУРГИИ И ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ БЕСКОКСОВЫХ ПРОЦЕССОВ	362
5.1. Сравнительный энергетический и энерго-экологический анализ металлургических процессов	362
5.1.1. Проблемы энергосбережения в металлургии	362
5.1.2. Энерго-экологические проблемы и показатели при производстве стали	368
5.1.3. Энергетические и экологические проблемы металлургии стали и производства современных конструкционных материалов	374
5.1.4. Энергоемкость различных технологических циклов	385
5.1.5. Роль доли чугуна в шихте и сопоставление энергоемкости различных технологических процессов	386
5.1.6. Энергоемкости ванадиевых сплавов и сталей. Сравнительная энергоёмкость процесса ЛП	391
5.2. Сравнительный анализ процессов теплообмена в восстановительных агрегатах	405
5.3. Анализ эффективности использования трубчатой вращающейся печи в процессе ЛП	417
5.4. Энергоёмкость нового процесса получения никеля в двухванной печи	428
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК К ГЛАВЕ 5	431
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	437