



УДК 669.187.56.001

ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛЕКТРОШЛАКОВОЙ ПЛАВКИ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ФЕРРОСПЛАВОВ ИЗ МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ

М. Л. Жадкевич, Ф. К. Биктагиров, В. А. Шаповалов,
А. П. Игнатов, А. В. Гнатушенко

Показано, что электрошлаковая плавка с нерасходуемыми электродами имеет много общего с многошлаковым рудно-термическим процессом. И в том, и другом случае выделение мощности происходит преимущественно в режиме сопротивления, которым является жидкий шлак. Поэтому для переработки минерального сырья с избирательным восстановлением металлов в случае получения большого количества шлакового расплава (кратность шлака 3–4 и более) вполне подходит электрошлаковая плавка, что нашло подтверждение, например при выплавке титанового шлака из ильменитового концентрата.

It is shown that electroslag melting with non-consumable electrodes has much in common with multi-slag ore-thermal process. In both cases the power generation occurs mainly in the condition of resistance, which is a molten slag. Therefore, the electroslag melting is rather suitable for processing of mineral raw material with a selective reduction of metals in case of producing large amount of slag melt (slag factor is 3–4 and more), that was confirmed, for example, in melting out of titanium slag from ilmenite concentrate.

Ключевые слова: электрошлаковая плавка, рудно-термические печи, минеральное сырье, ильменитовый концентрат, ферротитан, ванадийсодержащая лигатура

Большинство металлов в природе встречаются в виде соединений с другими элементами, например различные руды и минералы, в которых металлы находятся преимущественно в виде оксидов. Кроме природных соединений, в процессе различных производств скапливаются всевозможные отходы в виде шлаков, шламов, золы и т. п., также содержащие соединения металлов и могущие служить сырьем для их извлечения.

Электрошлаковая плавка с использованием нерасходуемых электродов для ведения электрошлакового процесса хорошо известна и широко применяется для нагрева или плавления контактирующего с жидким шлаком металла, ранее полученного в каком-либо другом плавильном агрегате, а также для переработки различных металлических и металлосодержащих отходов. Многочисленные примеры такого применения приведены в работах [1–3].

Вместе с тем электрошлаковая плавка может применяться и в производстве (выплавке) металлопродукции непосредственно из исходного минерального сырья (руд, концентратов, шлаков, различных неметаллических отходов) подобно тому, как это осуществляется в других металлургических агрегатах, в частности рудно-термических печах,

предназначенных для производства ферросплавов, лигатур и легирующих.

Схожесть электрошлаковой выплавки (ЭШВ) с рудно-термической отмечается в работе [4]. В отличие от чистой дуговой плавки, где энергия выделяется в столбе дуги, горящей между токоподводящим электродом и нагреваемым объектом, в наиболее распространенных видах рудно-термической плавки энергия выделяется как в дуге, так и в сопротивлении, которым может служить и токопроводящая шихта, и образующийся шлаковый расплав. В зависимости от перерабатываемого сырья, вида и содержания флюсоющих и восстановителя, а также ряда других факторов соотношение между этими видами энергии может быть различным.

При электрошлаковой плавке с нерасходуемыми электродами часть энергии может выделяется в дуговом режиме ввиду наличия переходного сопротивления на границе электрод–шлак и образования здесь микродуг, особенно в период плавления шлакообразующих (шихты). Потому, согласно работе [5], и рудно-термические, и электрошлаковые установки относятся к группе электродуговых печей сопротивления, при этом электрошлаковые — к печам со слабо развитым дуговым разрядом, где доля мощности, выделяемой в дуге, составляет менее 10... 20 % общей.

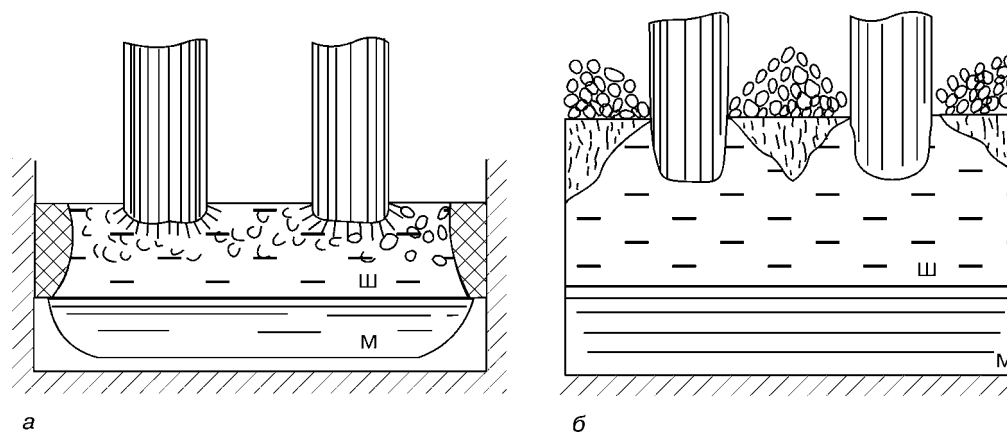


Рис.1. Схема расположения материалов в ванне многошлаковой рудно-термической печи при плавке ферровольфрама (а) и медно-никелевого штейна (б); Ш – шлак; М – металл

Теория и практика рудно-термической выплавки ферросплавов хорошо изучена и разработана [6, 7]. Ввиду использования различного сырья и получения разнообразной продукции (от наиболее распространенных ферромарганца и ферросилиция и до таких, как сплавы железа с редкоземельными металлами) ферросплавное производство отличается многообразием применяемых технологий и оборудования. По характеру проведения плавки наиболее близки к электрошлаковому рудно-термические процессы, в которых энергия выделяется в массе шлака, работа ведется с закрытыми дугами (погруженными в шлак электродами) и горячим колошником. Это так называемые многошлаковые процессы, когда плавка шихты сопровождается образованием большого количества шлака, а кратность шлака, т. е. соотношение между массой образующегося шлака и металла, достигает 2,5...3,5 и более. А с учетом разницы в удельном весе жидкого шлака и металла объем первого многократно превышает объем второго.

Именно для многошлаковых процессов энергетически более выгодна плавка путем преобразования электрической энергии в тепловую за счет сопротивления шлака. В этом случае мощность выделяется внутри шлаковой ванны во всем ее объеме, образуются мощные конвективные потоки, обеспечивающие равномерный прогрев шлака и интенсификацию расплавления подаваемой на плавку шихты.

При дуговом режиме плавки тепло воспринимают лишь близлежащие к дуговому разряду слои шлака, а остальная его масса нагревается за счет теплопереноса в шлаковой ванне. Эффективный коэффициент теплопроводности шлака, особенно при горении дуги над шлаком, вследствие более слабого в этом случае термогравитационного и электромагнитного перемешивания расплава оказывается меньшим, чем при ведении плавки в режиме сопротивления. Кроме того, отсутствие дуги и местного перегрева шлака уменьшает угар легкоокисляющихся, а также имеющих сравнительно низкую температуру плавления и высокую упругость паров компонентов.

На рис. 1 показана характерная схема плавильной ванны рудно-термической печи при выплавке ферровольфрама и медно-никелевого штейна [6]. В первом варианте из-за высокого удельного веса вольфрамового концентрата шихта тонет в слое жидкого шлака, и плавка протекает преимущественно с открытым зеркалом шлаковой ванны. Более легковесная шихта может покрывать полностью или частично поверхность шлака (рис. 1, б). Но и в том, и другом случае электроды погружены в жидкий шлак, мощность, выделяемая за счет сопротивления этого шлака, значительно превышает мощность, выделяемую в дуговом переходе, т. е. по сути осуществляется электрошлаковая плавка. Поэтому многие положения и зависимости, определенные для подобной рудно-термической плавки, применимы и для электрошлаковой. Однако они касаются в основном массового производства в большегрузных рудно-термических печах, позволяющих выплавлять десятки и сотни тонн продукции в сутки. А в случае ЭШВ нужно иметь ввиду, что она ориентирована главным образом на мелкосерийное производство в печах емкостью от сотни килограммов до нескольких тонн. Кроме того, электрошлаковые установки имеют свои особенности, связанные как с применяемыми источниками питания, так и с режимом их эксплуатации.

Вследствие меньших размеров печей ЭШВ, работающих с горячим колошником, их тепловой КПД обычно ниже, чем рудно-термических. По этому параметру электрошлаковые печи, работающие с открытым зеркалом шлаковой ванны, приближаются к дуговым, где ввиду наличия открытой дуги также относительно велики потери тепла излучением и с отходящими газами [4]. Электрический КПД электрошлаковых печей из-за работы в режиме сопротивления весьма высок и составляет 0,85...0,95. Благодаря этому общий энергетический КПД печей ЭШВ находится на уровне значений этого показателя для дуговых печей.

Проигрывая рудно-термическим по энергетическим затратам, печи ЭШВ имеют и ряд преимуществ. Рудно-термические печи чаще всего предназначены для производства определенного ферросплава из

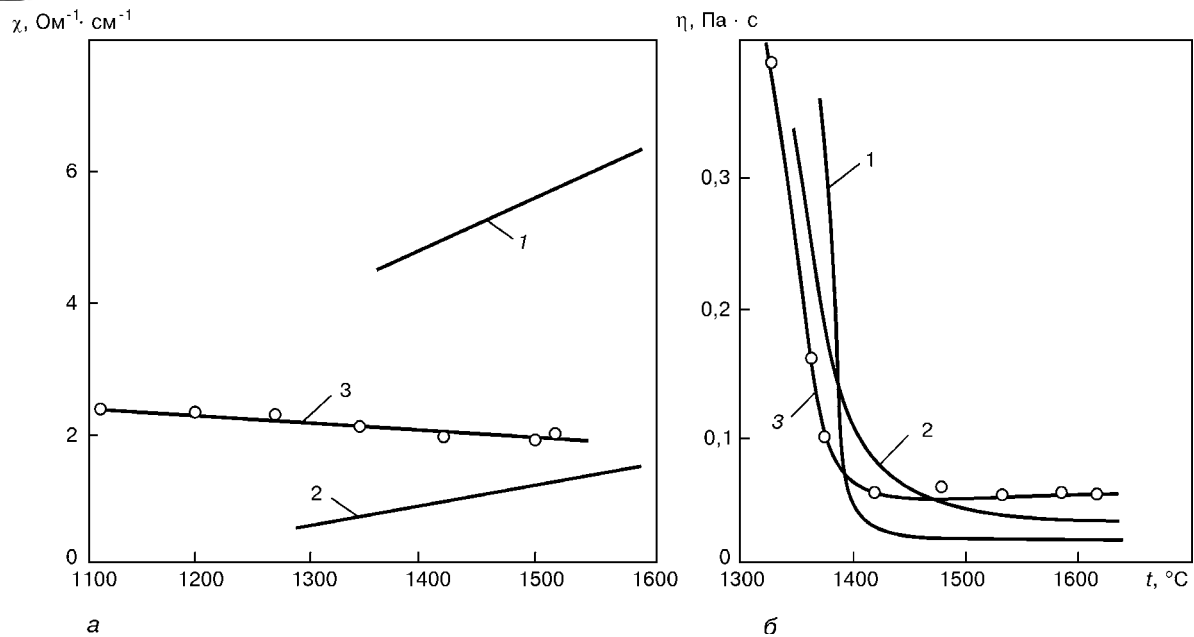


Рис. 2. Физические свойства ильменитового концентрата и некоторых шлаков ЭШП: а — электропроводность χ ; б — вязкость η ; 1 — АНФ-1П; 2 — АНФ-6; 3 — ильменит

сырья конкретного месторождения. Исходя из этого выбирается источник питания, конструкция печи и режим ее работы. В случае изменения состава шихтовых материалов, например при переходе на сырье из другого месторождения, зачастую необходимы значительные затраты на переустройство печи и отработку технологии плавки.

Электрошлаковые печи более мобильны и могут без особых изменений использоваться для плавки разнообразного сырья, в том числе имеющего сравнительно небольшие запасы. Кроме того, они проще в обслуживании, для них требуются значительно меньшие капитальные вложения при вводе в эксплуатацию, они могут располагаться вблизи скопления или сбора перерабатываемого материала.

Еще одним весьма важным преимуществом сравнительно небольших печей благодаря возможности гибкого варьирования технологическим процессом является увеличение степени извлечения требуемого компонента из исходного материала в получаемый металл, т. е. уменьшение потерь важных и дорогостоящих элементов.

Таким образом, электрошлаковая плавка минерального сырья с целью получения ферросплавов и лигатур, как правило, применима в тех случаях, когда при переработке шихты образуется большое количество шлакового расплава, нагрев которого может осуществляться преимущественно в режиме сопротивления. Высокая кратность шлака получается при использовании сырья с небольшим содержанием основного компонента или когда в шихту для достижения шлаковым расплавом необходимых плавильных свойств (температуры плавления, электропроводности, вязкости) вводят большое количество флюсующих добавок.

Еще одной областью применения электрошлаковой плавки минерального сырья служат процессы, в которых конечным продуктом является получае-

мый при плавке шлак, обогащенный требуемым компонентом за счет избирательного восстановления в металлическую фазу и удаления из него других компонентов. Классический пример такого процесса — выплавка титанового шлака.

Современное титановое производство базируется на многостадийной переработке так называемого титанового шлака, полученного рудно-термической плавкой титаносодержащего концентрата, в частности ильменитового. Последний представляет собой в основном (на 90... 93 %) соединение оксидов железа с оксидами титана типа $\text{FeO} \cdot \text{TiO}_2$ с небольшими примесями SiO_2 , Al_2O_3 , MnO и др. Содержание титана в ильмените в пересчете на TiO_2 обычно составляет 50... 55 %.

Для производства титановой губки необходимо получение шлака, содержащего не менее 80 % оксидов титана, не более 5 % оксидов железа, а также минимум других оксидов. Повышения в шлаке концентрации TiO_2 достигают путем избирательного восстановления из ильменита оксидов железа. Для этого в шихту вводят углеродсодержащий восстановитель, чаще всего молотый кокс. Оксиды железа в условиях такой плавки являются термодинамически менее стойкими, чем оксиды титана, и восстанавливаются в первую очередь. В итоге получаемый шлаковый расплав постепенно обогащается оксидами титана.

Ввиду образования при плавке ильменита большого количества шлака (кратность шлака обычно составляет 5–6), процесс ведут с погруженными в шлак электродами преимущественно в режиме сопротивления, чему способствует высокая электропроводность исходного ильменита. Для системы $\text{FeO} - \text{TiO}_2$ при содержании оксида титана 45... 50 % электропроводность расплава в условиях температуры 1300... 1500 °C находится на уровне $30 \text{ Ohm}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$ [8].



Согласно проведенным исследованиям, электропроводность ильменитового концентрата Иршанского горно-обогатительного комбината составляет $2,0...2,5 \text{ Ом}^{-1}\cdot\text{см}^{-1}$ (рис. 2, а), т. е. имеющиеся в нем примеси повышают сопротивление. По этому показателю он близок к шлаку типа АНФ-6. Причем ильменит имеет такую проводимость даже в твердом состоянии при температуре около $1000 \text{ }^\circ\text{C}$, которая практически не изменяется и при переходе из твердого состояния в жидкое.

Для расплава ильменита характерна слабая зависимость электропроводности от температуры. Более того, в отличие от других солеоксидных расплавов, электропроводность ильменита с повышением температуры падает. Это свидетельствует о том, что титаносодержащие шлаки отличаются не ионной, а электронной проводимостью. Поэтому с увеличением содержания в них TiO_2 сопротивление расплава резко уменьшается и высокотитановые шлаки по электропроводности приближаются к металлам [9].

Температура плавления ($1320...1350 \text{ }^\circ\text{C}$) и вязкость (рис. 2, б) исходного ильменита также близки таковым некоторых шлаков, применяемых в электрошлаковых технологиях. Проведенные в электрошлаковой печи мощностью 260 кВ·А эксперименты показали, что при правильно подобранных электрических параметрах плавка ильменита в режиме сопротивления не вызывает никаких затруднений.

Ильменитовый концентрат, помимо использования в производстве титановой губки, является основным сырьем для получения ферротитана. В работе [10] описана технология выплавки из ильменита 25...35 % ферротитана алюмотермическим способом. При этом первоначальная энергия, необходимая для шлакообразования и достижения требуемой температуры, когда активно начинает протекать восстановление оксидов титана, выделяется за счет тепла реакций взаимодействия алюминия с вводимыми в шихту окислителями.

Для снижения температуры плавления образующегося шлака в шихту также вводят флюсующие компоненты. Это способствует, помимо необходимого для восстановления оксидов титана и железа, дополнительному использованию алюминия. Уменьшить расход алюминия можно за счет расплавления ильменита в электротермической, например в электрошлаковой, печи и последующего ввода в подготовленный железотитанистый шлак восстановителя. Путем достижения требуемых температурных параметров и применения различных вариантов ввода алюминия можно повысить степень восстановления титана в металл, а также создать условия для лучшего отделения металла от шлака. Такая технология выплавки низкопроцентного ферротитана успешно применяется на ряде предприятий Украины, имеющей большие запасы ильменитового концентрата.

При электроплавке ильменитового концентрата дополнительным резервом повышения рентабель-

ности производства ферротитана является использование для перевода железа из шлака в металл вместо алюминия значительно более дешевого углеродсодержащего восстановителя. Для этого, аналогично титановому производству, выплавляют обогащенный титаном шлак, подвергаемый затем не хлорированию и магниитермическому восстановлению с получением титановой губки, а алюмотермическому восстановлению с выплавкой ферротитана. При этом для получения 70 % ферротитана нет необходимости глубокого удаления из ильменита оксидов железа. С уменьшением в системе FeO-TiO_2 доли оксидов железа резко изменяются физические свойства расплава. Так, при содержании 5...7 % FeO температура плавления повышается до $1600...1700 \text{ }^\circ\text{C}$, а электропроводность составляет более $100 \text{ Ом}^{-1}\cdot\text{см}^{-1}$ [9]. Поэтому при плавке высокотитанового шлака в шихту добавляют флюсующие (известь или соду), снижающие температуру плавления и электропроводность расплава. При электрошлаковой плавке ильменита с целью получения 70 % ферротитана в случае восстановления 80 % титана, содержащегося в концентрате, остаточное содержание FeO может составлять 15...18 %. Это значительно облегчает проведение плавки, в том числе сокращается ее время, поскольку с уменьшением количества FeO и снижения его активности замедляются процессы восстановления оксидов железа углеродом. Кроме того, уменьшается расход флюсующих компонентов, влияние которых на последующий процесс восстановления алюминием оксидов титана неоднозначен.

Проведенный комплекс исследований показал, что электрошлаковая плавка позволяет получать из ильменитового концентрата 70%-й ферротитан, практически по всем параметрам соответствующий требованиям технических условий на указанный продукт [11]. В настоящее время ведутся работы по корректировке и оптимизации данной технологии.

В качестве еще одного примера электрошлаковой плавки минерального сырья можно отметить технологию переработки зол и шламов тепловых электростанций, работающих на мазуте. Последние содержат от 10 до 30 % соединений ванадия. Разрабатываются различные процессы утилизации подобных отходов с извлечением ванадия [12, 13]. Пирогидрохимические способы требуют расхода большого количества дорогостоящих реагентов и экологически небезопасны. Проблемой металлургических способов является наличие в золах значительного количества серы и углерода, которые загрязняют получаемый при их плавке феррованадий.

В последнее время появились данные о разработке технологий предварительной подготовки подобных зол, позволяющих их гранулировать и уменьшать содержание нежелательных примесей [14, 15]. В этом случае металлургические способы переработки, в частности основанные на силико- или алюмотермическом восстановлении оксидов ванадия из расплава, становятся наиболее эффектив-



ными, поскольку позволяют максимальное извлечение ванадия. Среди них из-за образования большого количества шлака при плавлении шихты, включающей восстановители и флюсующие для связывания продуктов реакции, наиболее приемлемой является электрошлаковая плавка. Проведенные с участием сотрудников ИЭС им. Е. О. Патона лабораторные и опытно-промышленные плавки подтвердили этот факт. Из золы ТЭС с использованием в качестве восстановителя 75 % FeSi выплавлен феррованадий, содержащий 35... 37 % ванадия, пригодный для легирования стали [16].

Не только процесс переработки ванадийсодержащих зол, но и выплавка стандартного феррованадия из технического пентаоксида ванадия V_2O_5 , тем более ванадийсодержащих лигатур из ванадийсодержащего конверторного шлака, должны успешно протекать в электрошлаковом режиме.

Согласно данным работ [17, 18], разработанная технология одностадийной переработки конверторного шлака, содержащего 16... 20 % V_2O_5 и примерно столько же SiO_2 , с получением в ферросплавных печах лигатуры с 10... 12 % ванадия предусматривает введение в шихту извести, 75%-го ферросилиция и плавикового шпата, причем в таких количествах, чтобы образующиеся металлический и шлаковый расплавы имели массовое соотношение примерно 1:4, а объемное — не менее 1:12.

Состав получаемого шлака на 80... 85 % состоит из соединений оксидов кальция и кремния ($CaO-SiO_2$, $2CaO-SiO_2$), а по данным работы [8] электропроводность, температура плавления и вязкость таких расплавов, тем более при наличии до 5 % CaF_2 , благоприятствуют протеканию плавки в режиме сопротивления.

Выполненные анализ и экспериментальные исследования показали, что электрошлаковая плавка как способ переработки минерального сырья имеет свои области применения и может с успехом использоваться для получения из соответствующей неметаллической шихты ферросплавов, лигатур и легирующих.

1. Биктагиров Ф. К. Применение электрошлакового процесса с нерасходуемыми электродами для плавки, рафиниро-

- вания и обработки металлов. Сообщ. 1 // Пробл. спец. электрометаллургии. — 2002. — № 4. — С. 11–17.
2. Биктагиров Ф. К. Применение электрошлакового процесса с нерасходуемыми электродами для плавки, рафинирования и обработки металлов. Сообщ. 2 // Соврем. электрометаллургия. — 2003. — № 1. — С. 5–9.
3. Рябцев И. А., Кусков Ю. А., Кузьменко О. Г. Переработка металлоотходов с использованием электрошлаковых технологий // Вестн. машиностроения. — 2003. — № 11. — С. 76–80.
4. Лютый И. Ю., Латаш Ю. В. Электрошлаковая выплавка и рафинирование металлов. — Киев: Наук. думка, 1982. — 188 с.
5. *Электротермические* процессы химической технологии / Я. Б. Данцис, В. А. Ершов, Г. М. Жилов и др. — Л.: Химия, 1984. — 464 с.
6. Струнский Б. М. Рудно-термические плавильные печи. — М.: Металлургия, 1972. — 368 с.
7. Гасик М. И., Лякишев Н. П., Емлин Б. И. Теория и технология производства ферросплавов. — М.: Металлургия, 1988. — 784 с.
8. Атлас шлаков / Под ред. И. С. Куликова. — М.: Металлургия, 1985. — 208 с.
9. *Металлургия титана* / В. А. Гармата, Б. С. Гуляницкий, В. Ю. Крамник и др. — М.: Металлургия, 1978. — 424 с.
10. *Алюмотермия* / Н. П. Лякишев, Ю. Л. Плинер, Г. Ф. Игнатенко и др. — М.: Металлургия, 1978. — 784 с.
11. *Применение* электрошлаковой плавки для получения ферротитана из ильменитового концентрата / Ф. К. Биктагиров, В. А. Шаповалов, А. П. Игнатов, А. В. Гнатушенко. — Тбилиси, 2004. — С. 79–86.
12. *Словинский-Сидак Н. П., Жуковский Т. Ф.* Утилизация ванадийсодержащих отходов ТЭС // Теплоэнергетика. — 1997. — № 2. — С. 55–58.
13. *Восстановление* оксидов ванадия в железоуглеродистом расплаве / В. Н. Костяков, В. Л. Найдик, Е. Б. Полетаев и др. // Процессы литья. — 2004. — № 2. — С. 3–5.
14. Черноусов П. И., Иванов А. В., Пашков Н. Ф. Новая технология извлечения ванадия из золы тепловых электростанций, работающих на мазуте // Изв. вузов. Черн. металлургия. — 2000. — № 11. — С. 64.
15. *Ванадий* из золы / Ю. Юсфин, П. Черноусов, А. Петелин и др. // Металлы Евразии. — 1998. — № 5. — С. 72–73.
16. *Безотходная* переработка золы и шламов тепловых электростанций, сжигающих мазут / П. П. Процько, К. К. Прохоренко, И. И. Лычко, К. А. Ющенко // Материалы семинара по охране окружающей среды (г. Алушта, 1998 г.). — Киев: О-во «Знание», 1998. — С. 7–8.
17. Филиппенков Д. А., Дерябин Ю. А., Смирнов Л. А. Эффективные технологии легирования стали ванадием. — Екатеринбург, 2001. — 210 с.
18. Байрамов Б. И., Зайко В. П. Выплавка ванадийсодержащих лигатур // Сталь. — 1981. — № 7. — С. 37–39.

Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, Киев
Поступила 30.11.2004

НОВАЯ КНИГА

Проблемы сварки, металлургии и родственных технологий:

Сборник трудов IX международной
научно-технической конференции (21–22 октября 2004 г.). —
Тбилиси: Ассоциация сварщиков Грузии, 2004. — 163 с.

В сборнике отражены научные достижения в области сварки, металлургии и нанесения покрытий. Рассмотрены перспективы развития этих направлений.

