



## ЭЛЕКТРОШЛАКОВАЯ НАПЛАВКА ТОРЦЕВЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ИЗДЕЛИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДВУХКОНТУРНОЙ СХЕМЫ ПИТАНИЯ ШЛАКОВОЙ ВАННЫ

И. В. ЗОРИН, Г. Н. СОКОЛОВ, кандидаты техн. наук, А. А. АРТЕМЬЕВ, инж., В. И. ЛЫСАК, д-р техн. наук (Волгоград. гос. техн. ун-т, РФ)

Установлена взаимосвязь электрических и технологических параметров режима электрошлаковой наплавки в токоподводящем кристаллизаторе с неплавящимся полым электродом, позволяющая управлять процессом наплавки сложнолегированного наплавленного металла с матрицей на основе алюминида никеля  $\gamma'$ -Ni<sub>3</sub>Al на торцевые поверхности изделий диаметром 25...90 мм. Показано, что при двухконтурной схеме питания шлаковой ванны постоянным током преобладающее влияние на тепловыделение в ней оказывают процессы, протекающие в сварочном контуре полый электрод–изделие.

*Ключевые слова:* электрошлаковая наплавка, токоподводящий кристаллизатор, моделирование, двухконтурная схема питания, полый электрод, топология тока и напряжения, мощность процесса, формирование наплавленного металла

Применение токоподводящего кристаллизатора (ТПК) [1, 2] позволяет эффективно использовать тепловую мощность шлаковой ванны для наплавки крупногабаритных изделий дискретными некомпактными материалами из стали и чугуна. Для наплавки новых типов жаропрочных сплавов, в частности, сложнолегированных суперсплавов на основе никеля, алюминида никеля  $\gamma'$ -Ni<sub>3</sub>Al и других элементов, необходимо применение композиционных наплавочных материалов с большим содержанием тугоплавких компонентов [3].

При обычных способах электрошлаковой наплавки (ЭШН) плавление таких материалов в низкотемпературном (до 2200 °С) шлаке практически не позволяет получить химически и физически однородный наплавленный металл.

Предложенный способ ЭШН с использованием двухконтурной схемы питания шлаковой ванны [4, 5] позволяет повысить температуру шлака до 3500 °С и обеспечить стабильное плавление в нем композиционных проволок. В отличие от известной схемы наплавки, разработанной в ИЭС им. Е. О. Патона [6], в данном способе наплавки применяют источники питания постоянным электрическим током, что повышает стабильность процесса ЭШН при малом объеме шлаковой ванны, а также дает возможность увеличить плотность тока в подэлектродной области шлака за счет однополярности токоподводящей секции и полого электрода.

Целью работы явилось исследование влияния электрических и технологических параметров ре-

жима ЭШН с полым неплавящимся электродом при двухконтурной схеме питания постоянным током на формирование сложнолегированного наплавленного металла с матрицей на основе алюминида никеля  $\gamma'$ -Ni<sub>3</sub>Al на цилиндрических торцах изделий диаметром от 25 до 90 мм.

Наплавку образцов из стали 40ХНМ с диаметром торцов 30, 55 и 90 мм осуществляли с использованием флюса АНФ-6. Сварочные контуры, содержащие полый графитовый электрод, а также токоподводящий кристаллизатор со сменной формирующей секцией, и устройство для плавления флюса подключали к источникам постоянного тока с номинальным значением тока 500 и 1000 А. Наплавку образцов диаметром менее 60 мм начинали путем расплавления флюса за счет тепла электрической дуги (твердый старт). При диаметре изделия, превышающем 60 мм, шлак заливали в полость ТПК при повышенном от номинального значения на 25...30 % напряжении между секцией и изделием (жидкий старт).

Использовали композиционную проволоку диаметром 5 мм с двухслойной оболочкой (никель НП-2 — наружный и алюминий А97 — внутренний слой оболочки) и наполнителем, в котором размещены проволоки из технически чистых молибдена, вольфрама, тантала, нихрома НП-Х20Н80Т и смеси металлических порошков алюминия, циркония, бориды молибдена и графита. Проволоку подавали через полость электрода со скоростью 4,5 мм/с.

Для снижения интенсивности электроэрозии рабочей части полого электрода с диаметром  $d_3 = 12$  мм значения проходящего через него тока ограничивали 150...300 А. Это позволяло сформировать в объеме шлака, находящегося в полусфере на торце электрода, область с температурой



свыше 3300 °С, где реализуются теплофизические условия для расплавления присадочного материала, содержащего тугоплавкие компоненты [7].

Электрофизические процессы в шлаковой ванне изучали на установке, состоящей из модельного кристаллизатора и полого графитового электрода диаметром  $d_3 = 12$  мм с рабочим торцом, выполненным в виде полусферы. Материалом для модели кристаллизатора служили медные кольца диаметром 50 мм и толщиной 3 мм, которые помещали в стеклянную полость цилиндрической формы. В качестве изделия использовали медный цилиндр. Шлаковую ванну имитировал 26%-й раствор NaCl. Соотношение электропроводности к модельному раствору и перегретого шлака АНФ-6 составляло 16:1. При измерении поля потенциалов в электролите положение исследуемой координаты в электролитической ванне задавали посредством вертикального перемещения зондов и горизонтального перемещения кристаллизатора. По разности потенциалов в двух соседних координатах определяли напряженность  $E$  поля и рассчитывали плотность тока как произведение  $E\kappa$ . В экспериментах на солевой раствор подавали напряжение по 1 В от каждого источника питания. Мощность  $q$  тепловыделения в объеме шлаковой ванны определяли через плотность тепловых источников  $q = \kappa E^2$ .

При ЭШН для каждого диаметра наплавляемого торца необходимо обеспечить определенный объем шлаковой ванны, который контролируется по уровню ее поверхности в полости кристалли-

затора (рис. 1). Экспериментально установлено, что при увеличении диаметра торца наплавляемого изделия уровень поверхности шлаковой ванны следует повышать до значения ее высоты  $H_{ном}$ . При превышении уровня шлаковой ванны до максимального значения  $H_{max}$  выделяющейся в шлаке тепловой мощности недостаточно и наплавленный металл плохо формируется. При уменьшении уровня шлаковой ванны ниже некоторого минимального значения  $H_{min}$  шлак перегревается, что приводит к нарушению устойчивости процесса ЭШН и неудовлетворительному формированию наплавленного металла. Подобный эффект наблюдается при минимальном расстоянии  $h_n$  от нижнего уровня шлаковой ванны до нижнего края токоподводящей секции, вследствие чего значение  $h_n$  выдерживают в пределах  $0,20 \dots 0,25 D_{ш}$ . Поддержка постоянного уровня поверхности металлической ванны позволяет получать наплавленный металл высокого качества.

Анализ результатов моделирования поля потенциала, а также данных экспериментов позволил установить, что для удовлетворительного формирования наплавленного металла указанные выше параметры должны соответствовать условию:

$$h_n + H_{ном} + 2 \leq D_{ш} - 0,5d_3, \quad (1)$$

где  $D_{ш}$  — средний диаметр шлаковой ванны.

Значение  $H_{ном}$  можно также рассчитать по формуле

$$H_{ном} = bD_{и} + h, \quad (2)$$

где  $b$  — коэффициент пропорциональности, равный 0,17;  $h$  — необходимая минимальная глубина шлаковой ванны при диаметре торца изделия 25 мм.

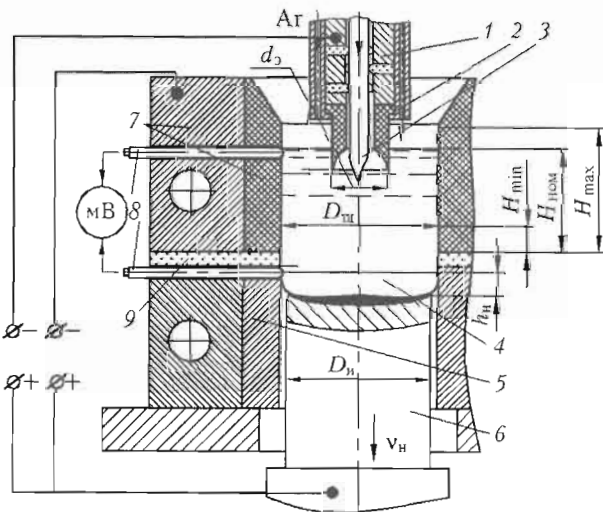


Рис. 1. Схема электрошлаковой наплавки в ТПК: 1 — токоподвод к полюсу электроду; 2 — полый графитовый электрод; 3 — композиционная проволока; 4 — шлаковая ванна; 5 — сменная формирующая секция; 6 — торец наплавляемого изделия; 7 — изолятор; 8 — датчики для контроля уровней шлаковой и металлической ванны; 9 — разъемные графитовая и медная токоподводящие секции;  $v_n$  — скорость наплавки; остальные обозначения см. в тексте

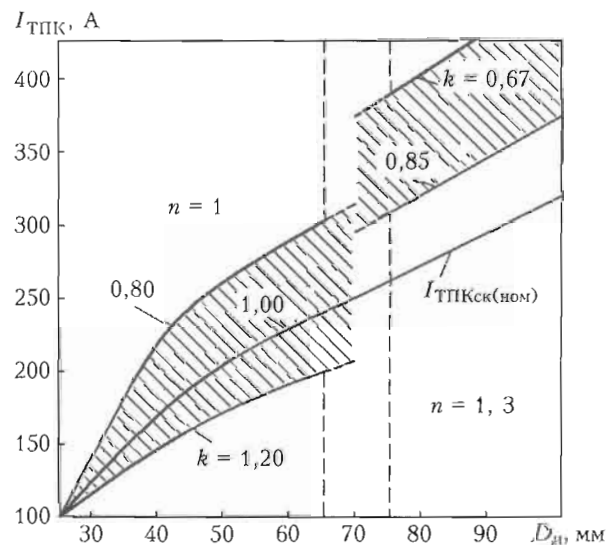


Рис. 2. Номограмма диапазонов соотношения токов  $k$  токоподводящей секции  $I_{ТПК}$  и полых электродов  $I_э$  в зависимости от диаметра наплавляемого изделия  $D_{и}$ ;  $n$  — количество полых электродов



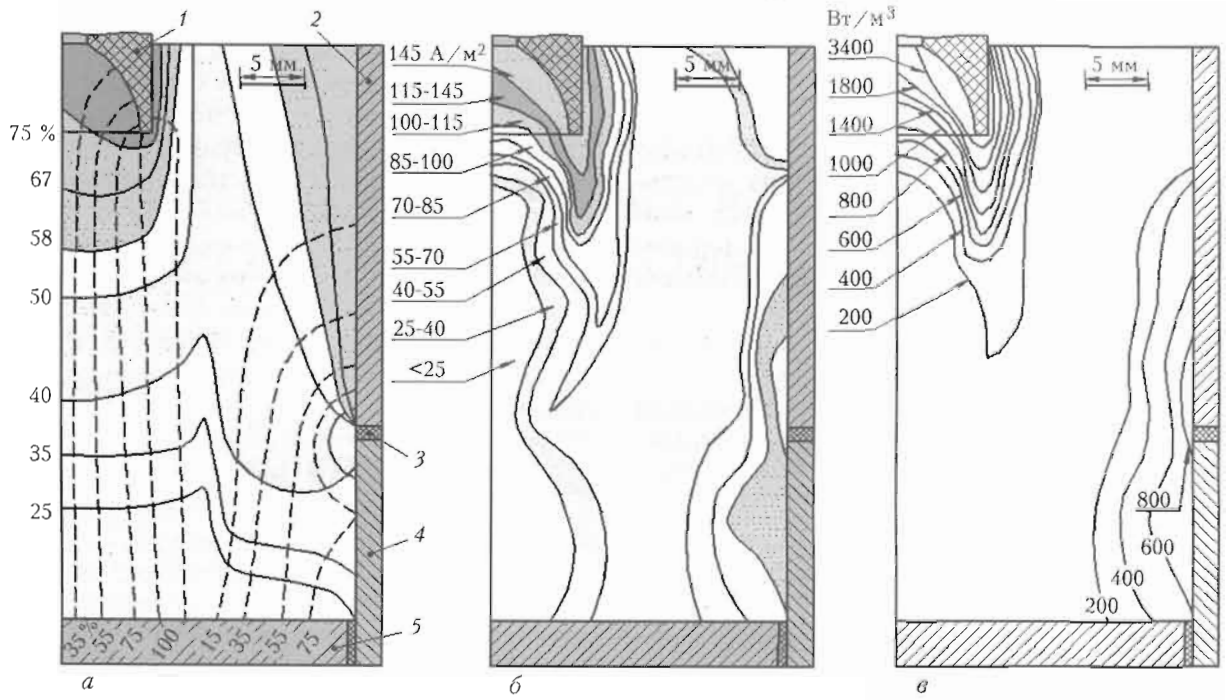


Рис. 3. Схема распределения тока (штриховые кривые) и напряжения (сплошные) электрических полей (а), плотности тока (б) и объемных тепловых источников (в) в шлаковой ванне при  $k \approx 1$ : 1 — электрод; 2 — токоподводящая секция; 3 — изолятор; 4 — формирующая секция; 5 — изделие

Если неравенство (1) выполняется, то управлять распределением тепла в шлаковой ванне можно путем регулирования значений тока в каждом из сварочных контуров, соотношение определяется коэффициентом  $k = I_{\text{ТПК}}/I_3$  в диапазонах 0,8...1,2 [7] и 0,67...0,85, что обеспечивает устойчивость процесса ЭШН торцов диаметром соответственно 25...60 и более 60 мм (см. рис. 2).

Исследования топологии тока и напряжения на физической модели процесса ЭШН показали, что электрическое поле в шлаковой ванне кристаллизатора неоднородно (рис. 3). Области в шлаковой ванне с наибольшими потенциалами расположены вблизи полого электрода и у стенки токоподводящей секции кристаллизатора, причем

плотность тока в области шлака, граничащей с электродом, на 30...50 % выше, чем у поверхности токоподводящей секции. Согласно расчетным данным, такой эффект обуславливает четырехкратное увеличение тепловыделения в приэлектродной области шлаковой ванны по сравнению с выделением тепла в области шлака, прилегающей к нижней части токоподводящей секции кристаллизатора. Это предопределяет превалирующую роль полого неплавящегося электрода как источника нагрева объема шлака, контактирующего с электронейтральным наплавочным материалом.

Повысить количество тепла, выделяемого в шлаке, при наплавке изделий большого диаметра можно либо использованием крупногабаритных полых электродов с соответствующим увеличением тока на них, либо одновременным повышением тока на токоподводящей секции кристаллизатора и полом электроде. В первом случае не обеспечивается необходимая плотность тока для создания в шлаке высокотемпературной области, находящейся в его сферической полости, а во втором повышение значение тока на полом электроде приводит к перегреву и выплескам шлака. Установлено, что выровнять тепловое поле в объеме шлаковой ванны, диаметр  $D_{\text{ш}}$  которой составляет половину диаметра изделия, можно при введении в нее двух-трех полых электродов, расположенных по окружности на расстоянии  $l$  между их центрами, равном  $\pi D/n$  [5]. Такое расположение электродов обуславливает гарантированное перекрытие высокотемпературных областей в шла-

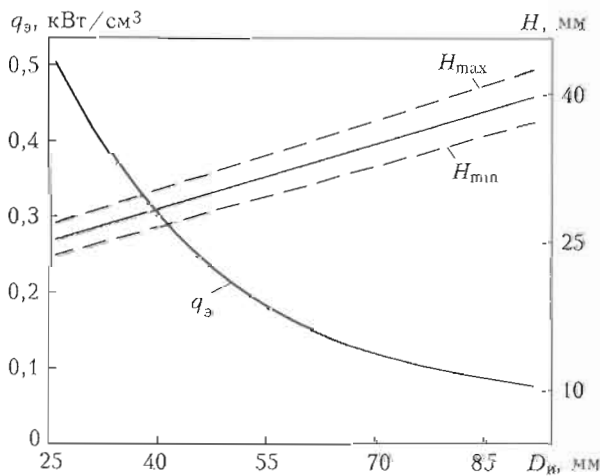


Рис. 4. Зависимость удельной мощности шлаковой ванны  $q_3$  и ее уровня  $H$  от диаметра наплавляемого изделия  $D_{\text{из}}$

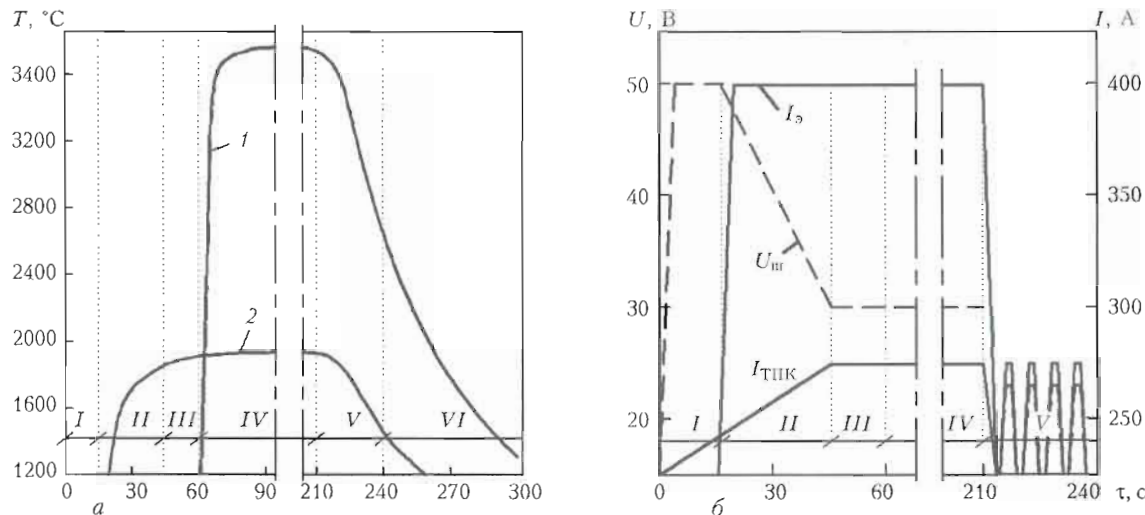


Рис. 5. Термические циклы наплавки (а), полученные в приэлектродной области шлаковой ванны (1) и в шлаковой ванне на уровне ниже кромки токоподводящей секции (2), и циклограмма процесса ЭШН цилиндрического торца изделия диаметром 90 мм (б):  $U_{ш}$  — напряжение на шлаковой ванне; I — заливка шлака; II — нестабильный электрошлаковый процесс; III — начало вращения шлаковой ванны; IV — подача проволоки в шлак; V — формирование наплавленного металла; VI — охлаждение металла после наплавки

ковой ванне, образующихся в зоне погружения полых электродов при их возвратно-вращательном движении с частотой  $30...33 \text{ мин}^{-1}$  и амплитудой  $A = 2Dл/n$ . При этом  $k < 0,85$ .

Поскольку вся подводимая через токоподводящую секцию и полый электрод мощность выделяется в шлаковой ванне в виде тепла, то очевидно, что соотношение затрачиваемой на процесс ЭШН мощности  $q_3$  к объему шлака (рис. 4) можно рассматривать как удельную характеристику степени эффективности использования реализуемой тепловой мощности в единице объема шлака при изменении диаметра наплаваемого изделия. На рис. 5 показано, что при увеличении диаметра изделия в 3 раза удельной мощности шлаковой ванны требуется в 5 раз меньше. Такой эффект позволяет снизить удельные энергозатраты при наплавке за счет уменьшения подводимой на шлаковую ванну мощности через сварочный контур токоподводящая секция—изделие. Вероятная причина эффекта снижения значений  $q_3$  заключается в том, что вязкость шлака системы  $\text{CaF}_2\text{—Al}_2\text{O}_3$  при  $1350 \text{ }^\circ\text{C}$  перестает зависеть от температуры [8]. Таким образом, при наплавке изделий диаметром более 60...70 мм, когда начальная стадия ЭШН осуществляется посредством жидкого старта, мощность, вводимая в шлак через токоподводящую секцию, необходима только для поддержания его температуры до  $1800 \text{ }^\circ\text{C}$ .

После заливки и прогрева шлака (рис. 5, а) напряжение на нем уменьшается, а ток в контуре токоподводящая секция—изделие возрастает до

своего рабочего значения (рис. 5, б). Мощность, подводимая через второй сварочный контур, перегревает шлак в приэлектродной области до  $3300...3400 \text{ }^\circ\text{C}$ . Соотношение мощностей в сварочных контурах, необходимое для наплавки торца конкретного диаметра, определяется значением коэффициента  $k$ .

Установлено, что использование ЭШН в ТПК с полым электродом обеспечивает получение качественного наплавленного металла и бездефектное формирование зоны его сплавления с металлом подложки (рис. 6, а, б). Образование металлической ванны незначительной глубины с прямолинейным фронтом кристаллизации в ней обуславливает вертикальное расположение дендритов (рис. 6, в), что предотвращает образование ликвационной зоны в центре наплавленного ме-



Рис. 6. Вид наплавленного торца образца диаметром 55 мм (а), сечения наплавленного образца диаметром 90 мм (б) и микроструктура переходной зоны (в): 1 — наплавленный металл; 2 — сталь 40ХНМ





талла. Согласно результатам металлографических исследований, участок перехода от основного металла к наплавленному имеет незначительную (не более 50...80 мкм) протяженность. Отсутствие опасных кристаллизационных и диффузионных прослоек в нем объясняется замедленной диффузионной подвижностью примесных атомов в термодинамически стабильной матрице металла на основе  $\gamma'$ -Ni<sub>3</sub>Al.

#### Выводы

1. Установлено, что применение для ЭШН двухконтурной схемы питания шлаковой ванны при сопоставимых значениях тока, проходящего по неплавящимся электродам, приводит к четырехкратному увеличению выделения тепла в приэлектродной области шлаковой ванны по сравнению с зоной шлака, соприкасающейся с поверхностью ТПК.

2. Показано, что для исключения дефектов и удовлетворительного формирования зоны сплавления при ЭШН торцов изделий с диаметром до 30 мм необходимо обеспечить удельную мощность шлаковой ванны до 0,5 кВт/см<sup>3</sup>, а при наплавке торцов изделий диаметром до 90 мм это значение уменьшается в 5 раз, что позволяет снизить удельные энергозатраты при наплавке крупногабаритных изделий.

An interrelation is established between the electric and technological parameters of the mode of electroslag cladding in a current-carrying mould with a non-consumable hollow electrode, allowing control of the process of cladding of a complex-alloyed metal with  $\gamma'$ -Ni<sub>3</sub>Al aluminide based matrix on the end faces of products of 25...90 mm diameter. It is shown that with a double-circuit diagram of d.c. power supply to the slag pool the processes running in the hollow electrode-product welding circuit have a predominant influence on heat generation in the pool.

Поступила в редакцию 07.05.2007,  
в окончательном варианте 12.06.2007

1. Ксендзык Г. В., Фрумин И. И., Кусков Ю. М. Электрошлаковая наплавка зернистым присадочным материалом // Теоретические и технологические основы наплавки. Новые процессы механизированной наплавки. — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона, 1977. — С. 89–95.
2. Пат. РФ 2174153, В 23 К 25/00. Способ электрошлаковой наплавки прокатных валков / И. С. Сарычев, В. Н. Скороходов, Ю. М. Кусков и др. — Оpubл. 27.09.2001.
3. Порошковая проволока для наплавки сплава на основе алюминида никеля / С. Н. Цурихин, Г. Н. Соколов, В. И. Лысак и др. // Свароч. пр-во. — 2006. — № 1. — С. 17–22.
4. Особенности процесса ЭШН композиционным стержнем в малогабаритном секционном кристаллизаторе / Г. Н. Соколов, И. В. Зорин, С. Н. Цурихин, В. И. Лысак // Автомат. сварка. — 2004. — № 10. — С. 26–30.
5. Пат. РФ 2271267, МКИ<sup>3</sup> В 23 К 25/00. Способ электрошлаковой наплавки крупногабаритных торцов / И. В. Зорин, Г. Н. Соколов, В. И. Лысак, С. Н. Цурихин. — Оpubл. 07.03.2006.
6. Двухконтурная схема электрошлакового переплава расходоуемого электрода / А. К. Цыгуленко, И. А. Ландман, Л. Б. Медовар и др. // Пробл. спец. электрометаллургии. — 2000. — № 3. — С. 16–20.
7. Влияние режима электрошлаковой наплавки на термометические процессы получения легированного сплава на основе алюминида  $\gamma'$ -Ni<sub>3</sub>Al / Г. Н. Соколов, И. В. Зорин, В. И. Лысак, В. Н. Арисова // Вопр. материаловедения. — 2006. — № 3. — С. 41–51.
8. Вязкость и электропроводность флюсов для электрошлакового переплава / С. А. Истомин, Г. В. Овчаренко, С. Н. Алешина, А. А. Мальков // Расплавы. — 2004. — № 3. — С. 69–73.