



УДК 669.187.56.001.3

ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛЕКТРОШЛАКОВОГО ПРОЦЕССА С НЕРАСХОДУЕМЫМИ ЭЛЕКТРОДАМИ ДЛЯ ПЛАВКИ, РАФИНИРОВАНИЯ И ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ.

Сообщение 2

Ф. К. Биктагиров

Приведены примеры использования электрошлакового процесса с нерасходуемыми электродами для переработки некомпактной металлосодержащей шихты с целью получения различных ферросплавов и лигатур, рафинирования металла и наплавки.

Examples of use of electroslag process with non-consumable electrodes for processing of a non-compact metal-containing charge to produce different ferroalloys and master alloys, metal refining and cladding are given.

Ключевые слова: некомпактная шихта; нерасходуемый электрод; электрошлаковая плавка; ферросплавы; лигатуры

Примеры применения электрошлакового процесса с нерасходуемыми электродами для нагрева и рафинирования жидких металлов были рассмотрены в сообщении [1]. В подобных технологиях температура шлакового расплава поддерживается выше температуры плавления обрабатываемого металла. Поэтому логичным стало развитие электрошлаковых технологий, в которых перегретый шлак используется не только как средство нагрева заранее подготовленного жидкого металла, но и как средство плавки, когда исходный металл находится в твердом состоянии. В этом случае шихту, предпочтительно фрагментированную и сыпучую в виде стружки, мелких кусков, дроби, окатышей, крупной пыли и т. п. постепенно сверху подают в шлаковую ванну, наведенную в водоохлаждаемой или футерованной емкости с помощью нерасходуемых электродов (рис. 1). Обычно параметры электрошлакового процесса выбираются такими, чтобы металл, проходя через толщу шлакового расплава, полностью расплавился. При плавке в водоохлаждаемом кристаллизаторе расплавленный металл постепенно затвердевает в виде слитка, при плавке в гарнисажной или футерованной емкости металл накапливается в жидком виде и периодически сливается в ту или иную форму. Выбор схемы плавки, в том числе и материала футеровки, определяется в каждом конкретном случае индивидуально с учетом состава и вида шихты, требований к качеству

получаемой продукции, производительности и экономичности процесса.

Важной особенностью рассматриваемых способов электрошлаковой выплавки (ЭШВ) является то, что подаваемая в шлаковый расплав шихта, имея более высокую плотность, погружается в него и чаще всего плавится, уже не контактируя с окружающей атмосферой. Это дает возможность существенно уменьшить потери металла на угар и позволяет даже без дополнительной защиты зеркала шлака плавить многие высокоактивные материалы. Благодаря развитой поверхности фрагментированной шихты происходит интенсивная теплопередача от горячего шлакового расплава к переплавляемому материалу, что обеспечивает высокую производительность плавки. Еще одно преимущество ЭШВ состоит в том, что переплавляемая шихта одновременно подвергается очистке от вредных примесей и неметаллической составляющей. Возможность в широких пределах варьировать состав шлака и его температуру, вводить в шлак по ходу плавки раскислители и рафинирующие добавки позволяет активно вмешиваться в физико-химические процессы, протекающие в системе шлак–металл. А это в свою очередь дает возможность восстанавливать содержащиеся в шихте оксиды и избирательно удалять или, наоборот, добавлять те или иные элементы. Поэтому зачастую такой процесс называют электрошлаковым рафинированием (ЭШР) или электрошлаковой выплавкой и рафинированием (ЭШВР).

Одними из первых, где были успешно реализованы возможности электрошлакового процесса с не-

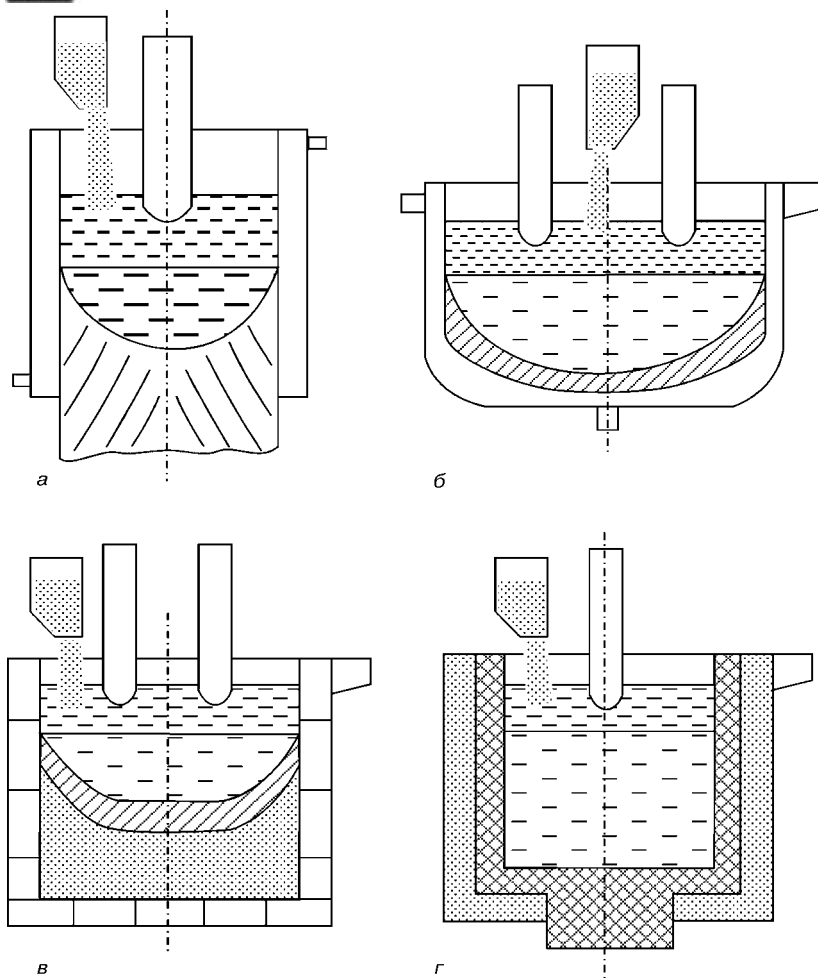


Рис. 1. Технологические схемы электрошлаковой плавки некомпактной шихты: *а* — в кристаллизаторе; *б* — в гарнисажной печи; *в* — в автогарнисажной печи; *г* — плавка в футерованной емкости

расходуемыми электродами для плавки некомпактной шихты, явились технологии утилизации и переработки шлакометаллических отходов цветной промышленности, содержащих от 50 до 80 % металла в виде корольков [2]. Плавка подобных отходов в индукционных и шахтных печах, главным образом из-за сравнительно высокого содержания неметаллической составляющей, довольно затруднительна и сопровождается безвозвратными потерями как основного металла (меди), так и легирующих. Электрошлаковая же плавка в силу своей специфики позволяет отделить шлаковую составляющую от металлической, при этом медь и никель извлекаются полностью, а потери цинка из латунных отходов при активном ведении восстановительных процессов сводятся к минимуму. Также электрошлаковая плавка более эффективна, по сравнению с другими видами плавки, при переработке чисто металлических отходов меди и медных сплавов в виде стружки. ЭШВ цветных металлов обычно проводится в емкости, футерованной углеродосодержащими материалами, металл скапливается под шлаком в жидком состоянии и периодически или непрерывно сливается из плавильной емкости. Причем высокое качество металла позволяет не ограничиваться выплавкой

шихтовой заготовки, а дает возможность сразу получать готовое литое изделие требуемой формы.

На различных стадиях металлургического передела и при последующей обработке металлопродукции образуется большое количество различных отходов в виде стружки, пыли, шламов, скрапа, обломков и других мелких некомпактных металлосодержащих материалов. Для таких отходов характерна повышенная окисленность и загрязненность неметаллической составляющей, в том числе включающей органические соединения, что ограничивает их применение как годной шихты. Максимальное использование и возвращение в производство подобных низкосортных отходов, особенно содержащих ценные дорогостоящие легирующие компоненты, такие как хром, никель, кобальт, молибден, вольфрам, ниобий, ванадий и др., является весьма актуальной проблемой.

В этой связи электрошлаковая плавка с нерасходуемыми электродами, благодаря отмеченным выше ее особенностям, может служить едва ли не самым приемлемым способом их переработки. Например, при такой утилизации стружки и металлообразной пыли жаропрочных сплавов, несмотря на то, что часть металла находится в окисленном состоянии, потери легирующих элементов не превышают 2...3 %. В то же время при переработке подобных отходов в электродуговых печах потери легирующих достигают 20 % и более. Практически полное сохранение основных легирующих элементов — хрома, молибдена, вольфрама и никеля — обеспечивается при электрошлаковой плавке отходов быстрорежущих и нержавеющей сталей. Низкое содержание посторонних примесей в металле шихтовых заготовок и отливок позволяет значительно бóльшую долю отходов вовлекать в технологический цикл производства без ущерба для качества конечной продукции.

Эффективность электрошлаковой плавки некомпактной шихты была подтверждена при получении из титановой и стальной стружки ферротитана, в том числе 70 %-ного [3]. Дело в том, что переработка титановой стружки в ферротитан в открытых индукционных печах из-за высокой реакционной способности титана и малой насыпной плотности стружки затруднительна, а плавка в различных вакуумных установках требует тщательной подготовки шихты и зачастую экономически нецелесообразна. В то же время при условии сыпучести стружка, имеющая относительно небольшую толщину и развитую поверхность, является весьма

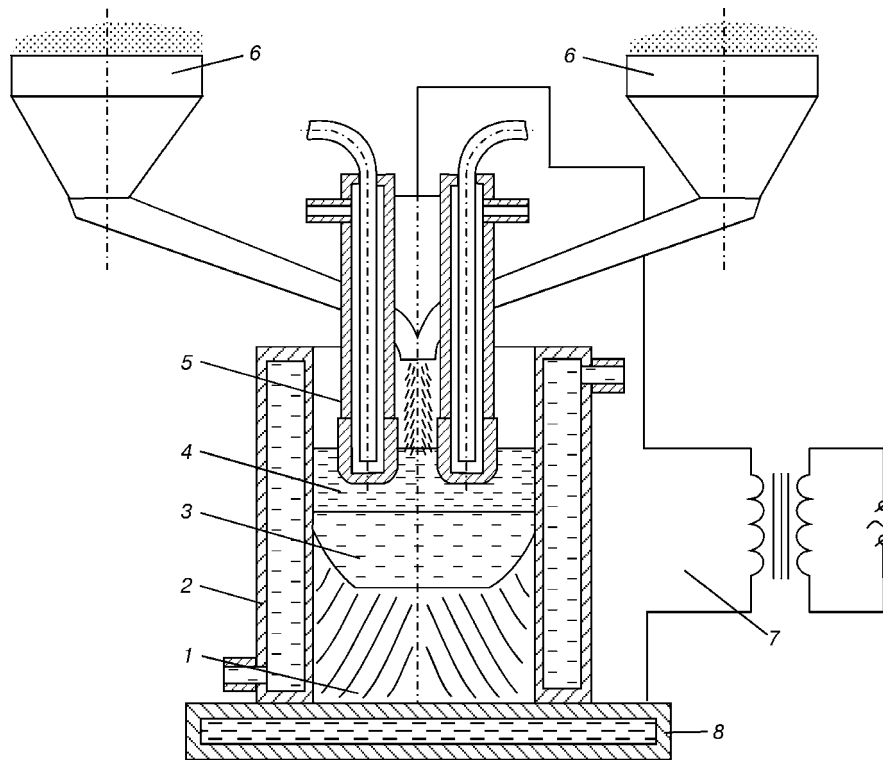


Рис. 2. Схема процесса электрошлаковой выплавки ферротитана из титановой и стальной стружки: 1 — твердый металл; 2 — кристаллизатор; 3 — металлическая ванна; 4 — шлаковая ванна; 5 — нерасходуемый электрод; 6 — бункера со стальной и титановой стружкой; 7 — источник питания; 8 — поддон

удобным материалом для электрошлаковой плавки. ЭШВ ферротитана осуществляется в водоохлаждаемой форме путем подачи в шлаковую ванну из двух бункеров через весовые дозаторы титановой и стальной стружки (рис. 2). Попадая в шлаковый расплав, стружка плавится и образуется металлическая ванна. Состав ее и соответственно состав выплавляемого ферротитана определяется соотношением подаваемых на плавку материалов и физико-химическими процессами в системе шлак — металл. Качество такого ферротитана намного превосходит качество подобного ферросплава, получаемого алюмотермическим восстановлением из титаносодержащих концентратов.

Аналогично выплавке ферротитана плавка в шлаковой ванне в различном сочетании и пропорциях некондиционных отходов производства ферросплавов, черных и цветных металлов дает воз-

можность получать специальные лигатуры и легирующие. Имеется опыт ЭШВ таких соединений, как FeMnTi, FeTiAl, SiMn, AlTi, FeCrTi, MnSiTi и ряда других. Несмотря на использование дешевых низкосортных отходов, благодаря очищающему действию шлака получаемые лигатуры имеют низкое содержание вредных примесей и с успехом могут применяться в различных производствах, в частности при выплавке сплавов ответственного назначения.

Электрошлаковая плавка может использоваться не только для утилизации и переработки различных отходов, о чем преимущественно шла речь выше, но и как эффективный метод рафинирования металлов. Так, при производстве ряда прецизионных и специальных сплавов возникает необходимость в использовании марганца с низким содержанием примесей. Наиболее чистый марганец получают электролизом из сульфатных растворов, но ввиду особенностей производства он имеет повышенную концентрацию серы и газов. Например, в марганце марки Мр-0 при содержании основного элемента не менее 99,5 % концентрация серы составляет до 0,1, кислорода — 0,1, азота — 0,15, а водорода — 0,06 %. Поэтому такой марганец предварительно очищают вакуумным отжигом или индукционной плавкой с обработкой шлаком.

В ИЭС им. Е. О. Патона разработана и успешно реализована в промышленности технология электрошлакового рафинирования электролитического марганца, представляющего собой фрагментированный материал в виде чешуек толщиной несколько миллимет-

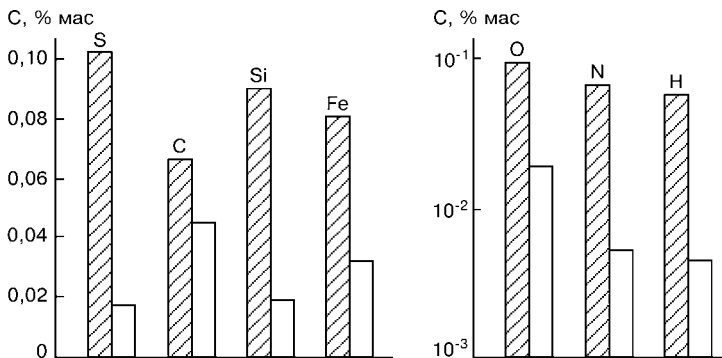


Рис. 3. Концентрация примесей в электролитическом марганце: ▨ — исходном; □ — после ЭШР

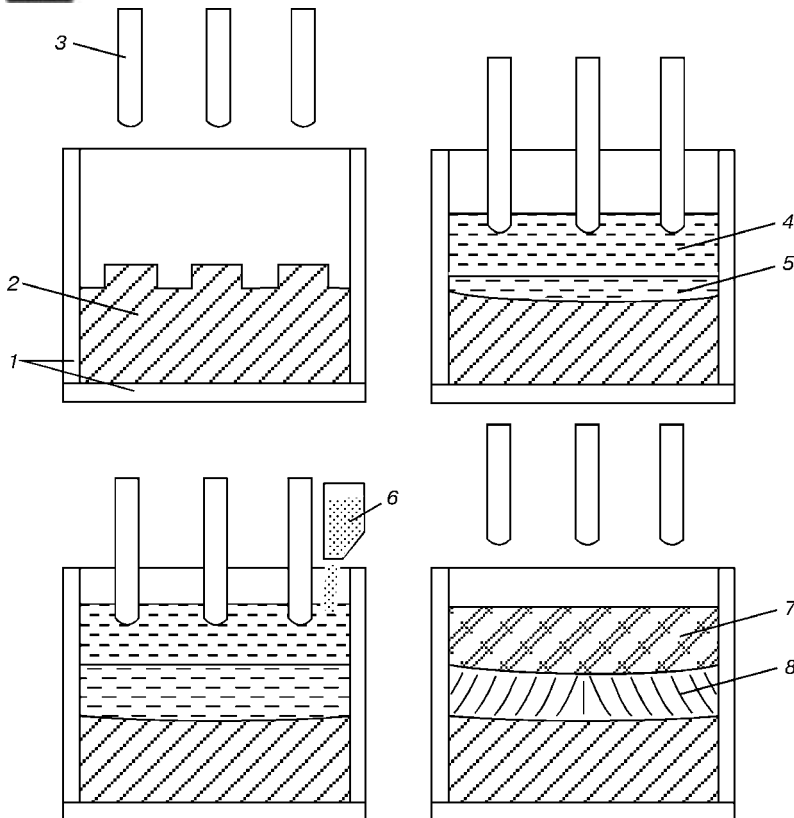


Рис. 4. Схема электрошлаковой наплавки штампов: 1 — водоохлаждаемые панели; 2 — изношенный штамп; 3 — нерасходуемый электрод; 4 — шлаковая ванна; 5 — металлическая ванна; 6 — бункер со стружкой; 7 — твердый шлак; 8 — наплавленный слой

ров, путем его переплава в слое жидкого шлака [4]. В связи с повышенными требованиями к чистоте выплавляемого металла, в частности по углероду, в этом случае для ведения электрошлакового процесса, в отличие от ранее рассмотренных, использовались не графитированные электроды, а нерасходуемые металлические водоохлаждаемые электроды специальной конструкции, а сама плавка осуществлялась в водоохлаждаемом кристаллизаторе. Применение высокоосновных шлаков системы $\text{CaF}_2\text{-CaO-Al}_2\text{O}_3$ с добавкой по ходу плавки рафинирующих и раскисляющих компонентов позволило уменьшить количество серы в выплавляемом марганце до 0,005... 0,01%. Это в 2–3 раза ниже по сравнению с тем, что удастся добиться при индукционном рафинировании. Одновременно почти на порядок снижается также газонасыщенность металла (рис. 3). Немаловажным является то, что при плавке по новой технологии достигается пятикратное повышение производительности, а безвозвратные потери марганца уменьшаются в 3–4 раза. Использование марганца, прошедшего электрошлаковое рафинирование, при выплавке прецизионных сплавов, в частности высокочувствительных термобиметаллов, позволило снизить брак по химическому составу, стабилизировать свойства и повысить рентабельность производства. В последние годы на основе рассматриваемого метода рафинирования марганца была освоена технология электрошлаковой выплавки высокодемпфирующих марганцевомедных сплавов [5]. Достигнутые при этом результаты по чистоте, деформируемости и демпфирующим свойствам металла в сочетании с высоким

сквозным выходом годного дают основание считать метод ЭШР весьма перспективным для выплавки сплавов системы Mn–Cu, идущих на изготовление высококачественных вибропоглощающих устройств.

Еще одно успешное применение электрошлакового процесса с нерасходуемыми электродами — это электрошлаковая наплавка. Суть ее заключается в первоначальном нагреве и подплавлении с помощью электрошлакового обогрева поверхности обрабатываемой заготовки и последующем сплавлении основы с подаваемым через шлак металлом, который образует наплавленный слой. Среди многочисленных вариантов подобной наплавки одним из наиболее характерных является электрошлаковое восстановление штампов горячего прессования [6]. Для его осуществления штамп в вертикальном положении гравюрой вверх устанавливается в кристаллизатор или по периметру ограничивается водоохлаждаемыми панелями и в образовавшейся над его изношенной поверхностью полости с помощью нерасходуемых электродов наводится шлаковая ванна. За счет тепла, выделяемого в шлаковой ванне, расплавляется верхняя часть штампа на глубину, необходимую для устранения трещин и других имеющихся здесь дефектов. Затем в перегретый шлак загружают стружку штамповой стали, которая плавится и поступает в металлическую ванну подплавленного штампа (рис. 4). Металл подается в количестве, необходимом для восстановления высоты штампа. Электрошлаковая наплавка обеспечивает надежное сплавление основного и наплавленного металла при высоком качестве наплавленного слоя. Стойкость восстановленных штампов обычно выше, чем новых штампов из ковального металла стандартного производства.

Аналогично тому, как осуществляется восстановление штампов, путем наплавления на основу металла другого состава можно получать биметаллические заготовки, например, наплавлением на легированную сталь слоя нержавеющей металла или медного сплава. Варианты наплавки могут быть самыми разнообразными, равно как и наплавленные заготовки — плоские, круглые при их горизонтальном и вертикальном расположении.

Рассмотренные в настоящей работе далеко не все примеры использования электрошлакового процесса с нерасходуемыми электродами для отливки слитков, рафинирования металлов, выплавки из некомпактной шихты ферросплавов и лигатур, утилизации отходов цветной металлургии и др. свидетельствуют о широких возможностях подобных технологий. Естественно, что для их реализации и успешного применения потребовалось всестороннее изучение особенностей и закономерностей, присущих данному виду электрошлаковой обработки металлов, таких как теплопередача от шлака к металлу, в том числе при прохождении твердой шихты



через слой жидкого шлака, поведение углерода при использовании графитированных электродов, влияние шлакового режима на рафинирование металла от примесей и еще очень много явлений, происходящих в системе газ–шлак–металл. Исследования в этой области продолжаются, совершенствуются технологии и оборудование, повышается эффективность и расширяются области применения электрошлакового процесса с нерасходуемыми электродами для производства различной металлопродукции. Так, в последние годы электрошлаковая технология все в больших масштабах используется при переработке шлаков, концентратов, зол, руд и другой минеральной шихты, содержащей многие дорогостоящие и дефицитные металлы в различных соединениях, преимущественно в виде оксидов. Электрошлаковая плавка подобной шихты в сочетании с избирательным восстановлением тех или иных элементов позволяет получать, в частности, феррохром, ферроникель, ферротитан, ферромolibден, а также другие ферросплавы и лигатуры.

1. Биктагиров Ф. К. Применение электрошлакового процесса с нерасходуемыми электродами для плавки, рафинирования и обработки металлов. Сообщение 1 // Пробл. спец. электрометаллургии. — 2002. — № 4. — С. 11–17.
2. Лютый И. Ю., Латаш Ю. В. Электрошлаковая выплавка и рафинирование металлов. — Киев: Наук. думка, 1983. — 188 с.
3. Получение ферротитана путем электрошлакового переплава титановой и стальной стружки // Ю. В. Латаш, В. А. Яковенко, С. В. Кравцов и др. // Пробл. спец. электрометаллургии. — 1991. — № 3. — С. 50–57.
4. Электрошлаковое рафинирование электролитического марганца на установке УО-105 // Ю. В. Латаш, В. А. Яковенко, И. Ю. Лютый и др. // Там же. — 1989. — № 2. — С. 14–21.
5. Электрошлаковое рафинирование и выплавка марганцевомедных сплавов высокого демпфирования // Ф. К. Биктагиров, Ю. В. Латаш, Р. Г. Крутиков и др. // Там же. — 1999. — № 1. — С. 3–8.
6. Носатов В. А., Стеренбоген Ю. А., Кузьменко О. Г. Восстановление штампов с применением электрошлакового обогрева // Кузнечно-штамповое производство. — 1987. — № 3. — С. 11–12.

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

Поступила 31.10.2002

СЕДЬМАЯ МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ ПО ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВЫМ ТЕХНОЛОГИЯМ (ЕВТ-2003)

1 - 6 июня 2003 г.
Варна, Болгария

Организаторы:

- Институт электроники Болгарской академии наук
- Технологический центр по электронно-лучевым и плазменным технологиям (София)
- Союз специалистов Болгарии по электронике, электротехнике и телекоммуникациям
- Союз физиков Болгарии

Научные направления конференции:

- Физика мощных электронных пучков, электронно-оптические системы и устройства для измерения и контроля электронных пучков
- Приборы на свободных электронах, электронно-лучевая сварка
- Электронно-лучевая плавка и рафинирование, высокоскоростные процессы нанесения металлургических покрытий, поверхностная обработка, термические процессы и получение тонкопленочных и конструкционных покрытий
- Электронная литография
- Отверждение полимеров и композитов электронным лучом
- Ионная литография и имплантация
- Моделирование физических процессов взаимодействия заряженных частиц пучков с материалами, применение пучков заряженных частиц в медицине и промышленности, конструирование и автоматизация электронно-лучевого оборудования

КОНТАКТЫ

Председатель оргкомитета профессор Г. Младенов
Институт электроники БАН
Болгария, 1784, г. София
Царьградское шоссе, 72
Тел.: (003592) 750757; 7144377; 390751
Факс: (003592) 9753201; 393053
E-mail: mladenov@ie.bas.bg