



ПРОБЛЕМЫ ПЕРЕРАБОТКИ НЕКОМПАКТНЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ ОТХОДОВ (Обзор)

**В. А. Шаповалов, Ф. К. Биктагиров,
А. В. Гнатушенко, А. П. Игнатов**

Показана целесообразность использования отходов алюминия и его сплавов в производстве. Рассмотрены наиболее распространенные способы переработки и рафинирования таких материалов. Предложено использование для этих целей способов электрошлаковой выплавки и рафинирования.

Rationality in use of waste of aluminium and its alloys in the production is shown. The most widely spread methods of recycling and refining of these materials are described. It is suggested to use the methods of electroslag melting and refining for these purposes.

Ключевые слова: алюминий; отходы алюминия; способы переработки и рафинирования; качество металла; электрошлаковая плавка

Алюминий и его сплавы по объемам производства занимают одно из ведущих мест среди конструкционных материалов, уступая только стали [1]. Связано это с тем, что алюминий характеризуется рядом ценных свойств: высоким уровнем электро- и теплопроводности, малой плотностью, сравнительно высокими значениями удельной прочности. Он имеет хорошие литейные свойства и обрабатываемость, а также высокий уровень устойчивости против коррозии во многих средах вследствие образования тонкой (до 0,01 мкм) оксидной пленки. Большое сродство этого металла к кислороду определяет его использование для раскисления стали и алюмотермии. Области применения алюминия и его сплавов постоянно расширяются, а производство

увеличивается. Наряду с этим накапливается значительное количество лома и разных отходов (преимущественно некомпактных промышленных материалов, образующихся при механической обработке изделий, обработке металлов давлением, плавке и других металлургических процессах), являющихся сырьем для производства вторичного алюминия [2–4]. Под ломом цветных металлов и сплавов подразумевают пришедшие в негодность или утратившие эксплуатационную ценность изделия и детали из них [5].

Отходы металлургической и металлообрабатывающей промышленности, образующиеся на предприятиях, представляют огромную материальную ценность. Вопросы их переработки, рационального и более полного использования являются весьма актуальными на протяжении последних десятилетий. Вовлечение отходов в производство, помимо более дорогих и дефицитных первичных материалов, позволяет существенно экономить энергоресурсы, а также способствует уменьшению загрязнения окружающей среды [2, 3, 6, 7]. Поэтому в последние годы возрастают объемы производства как первичного, так и вторичного алюминия (табл. 1) [3, 8, 9].

Определенную сложность при производстве вторичных металлов представляет переработка некомпактной мелкодисперсной металлической и металлосодержащей шихты в виде стружки, обрезки, мелких кусков, дроби, пыли, шламов и им подобных. Зачастую такая шихта сильно окислена и загрязнена остатками эмульсии и различных масел, применяемых при механической обработке, а также всевозможными неметаллическими включениями, которые при ее расплавлении попадают в жидкий ме-

Таблица 1. Динамика производства первичного и вторичного алюминия в 1990 и 2000 гг.

Страна	Производство алюминия, млн т			
	первичного		вторичного	
	1990 г.	2000 г.	1990 г.	2000 г.
США	4,048	3,664	2,393	3,450
Германия	0,720	0,664	0,708	0,877
Россия	2,888	3,244	0,870	0,660
Украина	0,134	0,105	0,152	0,245
Всего в мире	19,290	24,030	5,900	9,060



талл, вызывая дополнительное окисление и газонасыщение расплава [10]. Утилизация такого сырья позволяет экономить до 10 % дорогостоящих шихтовых материалов [11]. Тем не менее, в Европе и мире в 1946–2000 гг. в основном перерабатывали только металлический лом, а другие отходы во вторичной металлургии использовали значительно меньше [12].

Среди некомпактных отходов первое место по распространению и доступной стоимости занимает алюминиевая стружка — легковесный материал с развитой поверхностью. При ее переплаве необходима тщательная подготовка (сушка, дробление, удаление механических примесей черных металлов и неметаллических загрязнений), для чего требуется использование дополнительного оборудования. При разработке технологии приготовления вторичных алюминиевых сплавов из алюминиевой стружки стоит задача получения металла, являющегося полноценным заменителем первичных алюминиевых сплавов [13, 14].

Для плавки алюминиевых отходов используют различные плавильные печи — стационарные поворотные и вращающиеся отражательные, электродуговые, индукционные (канальные и тигельные), шахтные и других типов, приспособленные в той или иной степени для плавки определенного вида сырья, что объясняется преимущественно стремлением уменьшить загрязнение алюминиевых сплавов, сократить потери металла от угара и механизировать основные технологические операции [9].

Чаще всего для плавки любого вторичного алюминиевого сырья применяют отражательные печи, работающие на жидком и газообразном топливе, преимуществами которых являются высокая производительность (до 8 т/ч), простота конструкций, а недостатками — большая трудоемкость и значительные потери металла вследствие окисления, особенно при переработке некомпактных отходов. Так, стружку плавят россыпью или в брикетированном виде только при условии, что в печи имеется жидкая ванна [9, 15]. Кроме того, обязательным является применение большого количества защитных и рафинирующих флюсов. В противном случае угар может достигнуть 50... 60 % и более.

Плавка алюминиевого лома и отходов в отражательных печах с малым расходом флюсов снижает технико-экономические показатели металлургического передела и не оказывает положительного влияния на качество получаемых сплавов [16, 17]. Использование таких флюсов способствует образованию большого количества солевых шлаков, содержащих до 10 % металлического алюминия и требующих последующей переработки для извлечения металла [18].

Существенный недостаток пламенных отражательных печей связан с трудностью получения чистого металла вследствие соприкосновения расплава с продуктами горения топлива [19]. Влага как результат сгорания углеводородов топлива, а также

углеводороды из газообразного и жидкого топлива являются главными источниками водорода в металле. Основным дефектом алюминиевых сплавов, связанных с увеличением содержания водорода, считают пористость, влияющую на статистические и динамические характеристики отливок [20, 21].

За рубежом для плавки вторичного алюминиевого сырья широко применяют барабанные вращающиеся печи [18, 22]. Переработка стружки, мелкой обрезки и пакетов в них отличается, в сравнении с плавкой в отражательных печах, повышенными технико-экономическими показателями, лучшими условиями и более высокой производительностью труда, а также возможностью механизации некоторых трудоемких процессов. Особенностью плавки в таких печах является постоянное перемешивание шихты и флюса, что улучшает условия рафинирования металла и уменьшает его потери на угар. Среди недостатков отмечают высокое содержание солей в отходящих газах, осложняющее работу газоочистных сооружений, большой объем солевых шлаков, требующих переработки как и при отражательной плавке, необходимость полной замены флюсов и удаления из ванны после каждой плавки засоренного железом сырья во избежание загрязнения им металла последующих плавов, а также некоторые эксплуатационные неудобства [22].

Для переработки небольшого количества лома цветных металлов, а также для приготовления лигатур в литейных цехах используют тигельные топливные печи. Основное преимущество таких установок — отсутствие непосредственного контакта твердой шихты и жидкого металла с продуктами горения топлива, что значительно уменьшает окисляемость сплавов и насыщение их водородом. Среди других способов переплава вторичного алюминиевого сырья в установках с пламенным нагревом известна плавка в печах с открытой камерой, в шахтно-ваннных печах, в установках с наклонным подом [15, 23, 24].

Перспективными являются шахтно-ваннные печи, позволяющие осуществлять процесс в непрерывном режиме и с высокой производительностью. Однако шахтно-ваннные печи, предназначенные для переплава кусковой шихты, непригодны для переработки мелких отходов [23].

Широкое применение для плавки цветных металлов получили индукционные печи (тигельные, канальные) [23, 25]. Индукционные канальные печи применяют в цехах заготовительного и фасонного литья для плавки алюминиевых, медных, никелевых и цинковых сплавов. Особенностью установок такого типа является то, что после слива очередной плавки приходится оставлять в печи часть расплавленного металла, так называемое болото [26]. Как и шахтно-ваннные, эти установки не предназначены для переработки некомпактных отходов, особенно при выплавке алюминиевых сплавов, поскольку образующийся при этом оксид алюминия способствует зарастанию канальной части печи [9, 19, 23].



Более пригодными оказались индукционные тигельные печи, отличающиеся высокой производительностью, возможностью получения однородных по химическому составу сплавов и выравниванием температуры по объему ванны. Кроме того, они позволяют использовать в качестве шихты низкосортные материалы (стружку, отходы), а также быстрый переход с выплавки одной марки сплава на другую.

Особенностью технологии переплава стружки в индукционных тигельных печах является то, что ее загружают в печи на ванну предварительно наплавленного металла с равномерной пересыпкой сухим флюсом [2, 3, 9, 13–15, 23, 27]. Интенсивное перемешивание металлической ванны в таких печах, обусловленное электродинамическими явлениями, приводит к замешиванию стружки в расплав и обеспечивает ее безокислительное расплавление. Порционным введением рафинирующего флюса в процессе плавления стружки достигают защиты расплава от атмосферы и непрерывного рафинирования металла [9].

Однако перемешивание расплава в процессе плавки сопровождается нарушением целостности оксидной пленки и замешиванием ее обрывков в расплав. Отрицательная роль этого фактора возрастает по мере уменьшения некомпактности и увеличения удельной поверхности материала. К недостаткам индукционных тигельных печей следует отнести и относительно низкую температуру металла на поверхности жидкой ванны, не позволяющую эффективно использовать флюсы для металлургической обработки расплава [23].

Для плавки отходов алюминия применяют также печи сопротивления. Однако шихта в них должна состоять из первичных материалов с добавлением определенного количества отходов. Основным недостатком таких печей — низкие температура и производительность [15, 23, 28]. Новый процесс производства вторичных алюминиевых сплавов основан на использовании дуговых печей косвенного действия, работающих на постоянном токе. По сравнению с топливной плавкой и плавкой в индукционных печах, это позволяет сократить энергозатраты, сэкономить металл, улучшить его свойства и повысить экологическую безопасность. В дуговых печах на постоянном токе предлагается использовать для переработки лом и отходы алюминиевых производств, включая возврат и стружку механических цехов [9, 29]. Как следует из статьи [30], есть возможность отказаться от дегазации, рафинирования металла и использования флюсов.

Главный недостаток печей этого типа заключается в местном перегреве, обусловленном концентрированным источником тепла, что способствует износу футеровки и значительному угару металла. Кроме того, недостатком дуговых печей является и высокий уровень шума, создаваемый при их работе [31].

При переработке отходов алюминия в указанных плавильных агрегатах большое внимание уделяют повышению его чистоты. Особенно это касается пе-

реплава некомпактных отходов, более загрязненных, чем крупнокусковой лом. Очистку алюминиевых расплавов обычно осуществляют путем отстаивания, продувки инертными и активными газами, фильтрации через сетчатые и зернистые фильтры, обработки хлористыми солями и флюсами, электрофлюсового рафинирования и вакуумирования [32–34].

При отстаивании происходит всплывание неметаллических включений на поверхность металлической ванны, откуда их затем удаляют. Зачастую для рафинирования алюминиевых расплавов от твердых неметаллических и интерметаллидных включений применяют сетчатые (двумерные) и зернистые (объемные) фильтры. В основе работы первых лежит механическое отделение макроскопически крупных включений. Очистка металлических расплавов при фильтрации через зернистые фильтры обусловлена преимущественно механическими и адгезионными процессами.

Более глубокой очистки алюминиевых расплавов от газов и неметаллических включений достигают путем продувки инертными газами или при комбинированном рафинировании, осуществляемом по схеме инертный газ–пар галогенида–хлоридно-фторидный флюс. Добавки малых количеств галогенида и оксидно-фторидного флюса способствуют разрушению оксидной пленки на поверхности газовых пузырей и повышению адгезии неметаллических включений к ним. При вакуумировании достигают высокой степени дегазации, хотя этот способ не обеспечивает достаточного рафинирования от неметаллических включений.

Для удаления неметаллических включений хорошо зарекомендовало себя применение флюсовой обработки, суть которой состоит в рафинировании жидкого металла расплавами хлоридных или хлоридно-фторидных флюсов. Обычно она осуществляется в емкости, установленной на участке переливания из миксера в литейную форму или кристаллизатор. Благодаря различиям в смачиваемости контактирующих фаз неметаллические включения самопроизвольно переходят из металла во флюс. Необходимым условием при этом является поддержание флюсовой ванны в жидком состоянии на протяжении всего процесса литья, что осуществляется при подогреве емкости газовой горелкой или электрической спиралью, вмонтированной в футеровку печи. Однако последнее вызывает затруднения при эксплуатации и не гарантирует возможности стабильной длительной работы [35].

Разновидностью флюсовой обработки жидкого алюминия является электрофлюсовое рафинирование (ЭФР) (рис. 1). В этом случае фильтрация металла через слой расплавленного флюса совмещается с наложением поля постоянного или переменного тока. Последнее приводит к снижению межфазного натяжения на границе раздела фаз, что способствует переходу неметаллических включений из металла во флюс. Кроме того, протекание тока через флюс отчасти обеспечивает его подогрев в ходе ЭФР.

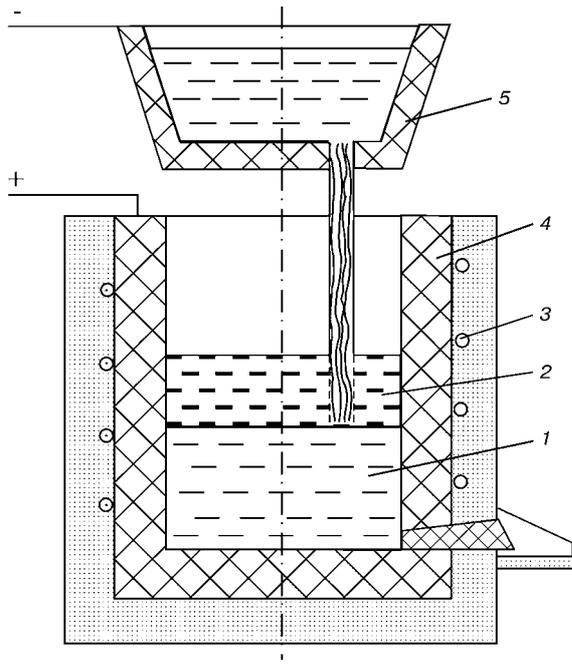


Рис. 1. Схема ЭРФ: 1 — металлическая ванна; 2 — шлаковая ванна; 3 — индуктор; 4 — огнеупорный тигель; 5 — промежуточная воронка

Помимо описанных способов повышения чистоты алюминиевых расплавов, применяют легирование гидридообразующими присадками, рафинирование порошкообразной серой в смеси с нейтральным газом, «вымораживание», физическое воздействие и др. [36].

Согласно работе [35], по степени рафинирования от неметаллических включений наиболее эффективным является ЭФР (табл. 2), которое, кроме того, способствует снижению содержания газов в металле.

Очень близок к электрошлаковому способ электрошлакового рафинирования (рис. 2), когда шлак (флюс) нагревается исключительно вследствие прохождения через него электрического тока. Хорошо известно о рафинирующих возможностях электрошлакового переплава (ЭШП) сплавов на основе железа. Применяли классический ЭШП (переплав расходуемого электрода) и для повышения чистоты цветных металлов, таких как хром, медь, бронзы и др. [37–39]. Опыт ЭШП алюминиевых сплавов свидетельствует об улучшении качества получаемого металла, в частности, снижении содержания в нем неметаллических включений [40, 41]. Однако схема электрошлакового переплава расходуемого электрода не позволяет эффективно перерабатывать некомпактную шихту. Для этих целей более пригодным является способ электрошлаковой выплавки и рафинирования (ЭШВР) с использованием для ведения электрошлакового процесса нерасходуемых электродов [42–44].

Суть данного способа состоит в следующем. Первоначально в водоохлаждаемой или футерованной емкости с помощью нерасходуемых электродов наводят шлаковую ванну. Поступающую на переработку шихту постепенно засыпают на шлаковую ванну, проходя через которую она плавится и скап-

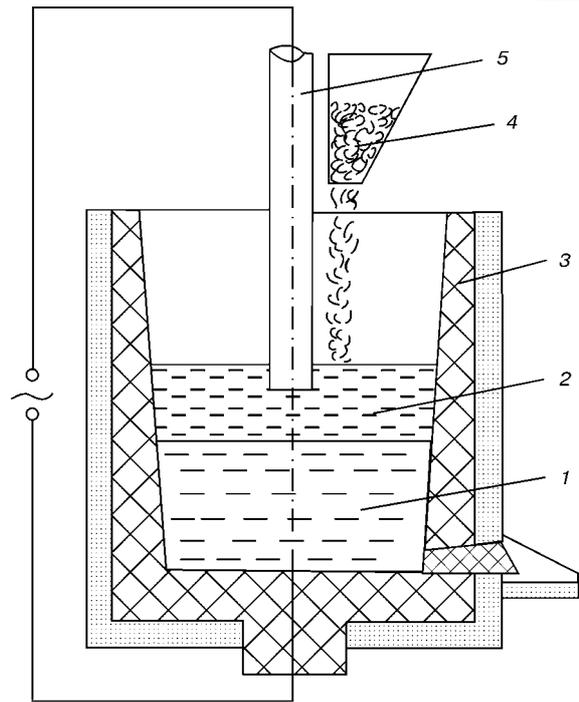


Рис. 2. Схема ЭШВР: 1 — металлическая ванна; 2 — шлаковая ванна; 3 — индуктор; 4 — бункер с шихтой; 5 — электрод

ливается под шлаком в виде слитка, в случае ведения процесса в водоохлаждаемом кристаллизаторе либо в виде расплава, если процесс осуществляется в футерованной емкости. Из последней расплавленный металл периодически сливается в ту или иную форму [42, 44].

Преимуществом электрошлаковой плавки некомпактной шихты является то, что ее частицы отличаются большой удельной поверхностью и вследствие интенсивной теплоотдачи от шлака плавятся очень быстро. При этом предотвращается окисление металла, поскольку плавление происходит в слое жидкого шлака, проходя через который металл еще и активно им рафинируется.

Кроме того, применение нерасходуемых (неплавящихся) электродов позволяет в широких пределах варьировать технологические параметры плав-

Таблица 2. Сравнение различных способов рафинирования сплава АМгб

Способ рафинирования	Содержание водорода, см ³ /100 г	Объем пористости, %	Количество неметаллических включений, балл
Традиционный	0,60...0,70	0,6...0,7	3
Вакуумирование	0,25...0,35	0,2...0,3	2
Продувка газом	0,25...0,35	0,3...0,4	3...4
Комплексный	0,25...0,35	0,2...0,3	1...2
ЭФР	0,26...0,38	0,2...0,3	1

Примечание. Традиционный способ заключается в обработке газом или флюсом в плавильно-литейном агрегате, комплексный — в совмещении непрерывной продувки с фильтрацией через жидкий флюс или зернистый фильтр.



ки, в частности состав и температуру шлака. Таким образом, при ЭШВР одновременно решаются вопросы снижения угара металла и повышения его чистоты. Некомпактная алюминиевая шихта, в частности стружка, является удобным объектом для плавки способом ЭШВР, а с учетом возможностей рафинирования алюминия флюсами при соответствующем подборе состава шлака следует ожидать получения качественного металла.

Таким образом, проблема рециклирования отходов цветных металлов, в частности алюминия и его сплавов, является актуальной и сейчас. В этой связи представляется целесообразным использовать способ электрошлаковой плавки с нерасходуемыми электродами, позволяющий одновременно переплавлять и рафинировать металл с минимальными потерями.

1. Макаров Г. С. Плавка алюминиевых сплавов: статус и перспективы // Специальная металлургия: вчера, сегодня, завтра: Сб. докл. междунар. науч. техн. конф. (Киев, сент. 2002). — Киев, 2002. — С. 367–372.
2. Рязанов С. Г., Митяев А. А. Техничко-экономические аспекты получения и использования вторичных алюминиевых сплавов // ИТЕ: Интегровані технології та енергозбереження. — 2001. — № 2. — С. 92–96.
3. Макаров Г. С. Мировые тенденции в области переработки и применения вторичных алюминиевых сплавов // Технология легких сплавов. — 2004. — № 1. — С. 25–30.
4. Гудима Н. В., Шейн Я. П. Краткий справочник по металлургии цветных металлов. — М.: Металлургия, 1975. — 536 с.
5. Естрин М. М., Левитин В. Х., Миллер С. М. Вторичные цветные металлы. Справочник. — М.: Металлургиядат, 1956. — Ч. 1. — 232 с.
6. Шевелев А. И. Создание комплекса по переработке лома и отходов цветных металлов // Металл и литье Украины. — 2004. — № 3–4. — С. 45–46.
7. Галдин Н. М. Использование отходов металлообработки в литейных цехах машиностроительных заводов // Литейн. пр-во. — 1986. — № 12. — С. 10–13.
8. Die NE — Metallindustrie legte im Jahr 2000 beachtlich zu // Stahlmark. — 2001. — 51, № 8. — С. 70.
9. Демидик В. Н. Переработка алюминиевых отходов // Процессы литья. — 2003. — № 3. — С. 8–12.
10. Еришов Г. С., Бычков Ю. Б. Высокопрочные алюминиевые сплавы из вторичного сырья. — М.: Металлургия, 1979. — 192 с.
11. Гаврилин И. В. Переплавление алюминиевой стружки в литейных цехах // Литейн. пр-во. — 1998. — № 8. — С. 7–9.
12. Kirehner G. The European and global dimension of aluminum recycling at present and in future // Organization of European Aluminum Refiners and Remelters Dusseldorf Bonnehof 5. Er 2 metall. — 2002. — 55, № 9. — С. 465–470.
13. Корякин Г. И., Кимстач Г. М., Грешищев Б. А. Разработка и применение на Заволжском моторном заводе технологии переplавки алюминиевой стружки // Литейн. пр-во. — 1986. — № 12. — С. 13–15.
14. Кимстач Г. М. О переplавке алюминиевой стружки // Там же. — 1999. — № 11. — С. 23.
15. Цыганов А. С. Производство вторичных цветных металлов. — М.: Металлургиядат, 1961. — 302 с.
16. Альтман М. Б., Полянский А. П. Эффективные методы использования лома и отходов алюминия и его сплавов. — М., 1949. — 56 с.
17. Исследование влияния флюсов на потери металла при отражательной плавке вторичного алюминийсодержащего сырья / Н. И. Артемьев, А. М. Апанасенко, А. Е. Андрюхов, А. П. Шевченко // Производство металлов и сплавов из вторичного сырья: Сб. науч. тр. — Запорожье, 1983. — С. 38–39.
18. Белковская И. Г., Косырев К. Л. Интенсификация переработки солевых шлаков производства вторичного алюминия // Электрометаллургия. — 2003. — № 2. — С. 32–35.
19. Альтман М. Б., Лебедев А. А., Чухров М. В. Плавка и литье легких сплавов. 2-е изд. испр и доп. — М.: Металлургия, 1969. — 680 с.
20. О рафинировании и модифицировании алюминиевых сплавов / С. П. Задруцкий, Б. М. Немененок, С. П. Королев и др. // Литейн. пр-во. — 2004. — № 3. — С. 17–20.
21. Колачев Б. А. Водородная хрупкость цветных металлов. — М.: Металлургия, 1966. — 256 с.
22. Шкляр М. С. Печи вторичной цветной металлургии. — М.: Металлургия, 1987. — 216 с.
23. Производство отливок из сплавов цветных металлов / А. В. Курдюмов, М. В. Пикунов, В. М. Чурсин, Е. Л. Бибиков — М.: Металлургия, 1986. — 416 с.
24. Суханов Г. А. Печь для переplавки алюминиевого скрапа // Технология легких сплавов. — 2000. — № 1. — С. 53–54.
25. Крапухин В. В. Печи для цветных и редких металлов. — М.: Металлургия, 1980. — 392 с.
26. Чернобаев Н. Е. Плавка в индукционных печах. — М.; Свердловск: Машгиз, 1950. — 96 с.
27. Кимстач Г. М. Приготовление вторичных алюминиевых сплавов из стружки на машиностроительных заводах // Литейн. пр-во. — 1981. — № 1. — С. 14–15.
28. Борисов Г. П., Белецкий Д. М., Веридуб А. Г. // Влияние добавки стружки в жидкий металл на структуру и свойства алюминиевых сплавов / Металл и литье Украины. — 2004. — № 1–2. — С. 4–5.
29. Апанасенко А. М., Биба В. Р., Сачко А. И. Переработка алюминиевых отходов в дуговых печах постоянного тока // Вопросы экологии и ресурсосбережения в переработке отходов цветной металлургии: Сб. науч. тр. — Запорожье, 1991. — С. 58–64.
30. Малиновский В. С., Мешков М. А. Перспективы развития новой технологии и оборудования для плавки алюминиевых сплавов // Литейн. пр-во. — 2002. — № 12. — С. 23.
31. Альтман М. Б., Лебедев А. А., Чухров М. В. Плавка и литье сплавов цветных металлов. — М.: Металлургиядат, 1963. — 524 с.
32. Альтман М. Б. Неметаллические включения в алюминиевых сплавах. — М.: Металлургия, 1965. — 126 с.
33. Коротков В. Г. Рафинирование литейных алюминиевых сплавов. — М.: Машгиз, 1963. — 126 с.
34. Переработка стружки и мелких отходов алюминиевых сплавов / М. А. Садохва, Б. А. Краев, В. И. Гутко, А. И. Гутко // Литье и металлургия. — 2001. — № 4. — С. 49–51.
35. Флюсовая обработка и фильтрование алюминиевых расплавов / А. В. Курдюмов, С. В. Инкин, В. С. Чулков, Н. И. Графас. — М.: Металлургия, 1980. — 169 с.
36. Рафинирование алюминиевых сплавов порошкообразной серой в струе азота / А. М. Галушко, Г. В. Довнар, М. М. Ситниченко и др. // Литейн. пр-во. — 2004. — № 3. — С. 23–25.
37. Лютый И. Ю., Латаш Ю. В. Электрошлаковая выплавка и рафинирование металлов / Под ред. Б. Е. Патона. — Киев: Наук. думка, 1982. — 188 с.
38. Латаш Ю. В., Медовар Б. И. Электрошлаковый переplав. — М.: Металлургия, 1970. — 239 с.
39. Молдавский О. Д. Электрошлаковый переplав тяжелых цветных металлов. — М.: Металлургия, 1980. — 200 с.
40. Ищенко А. Я., Лычко И. И. Электрошлаковая подпитка алюминиевых отливок плавящимися электродами большого сечения // Автомат. сварка. — 1966. — № 3. — С. 55–57.
41. Электрошлаковый металл / Под ред. Б. Е. Патона и Б. И. Медовара. — Киев: Наук. думка, 1981. — 680 с.
42. Биктагиров Ф. К., Крутиков Р. Г., Гнатушенко А. В. Электрошлаковая плавка некомпактных металлических и металлосодержащих материалов // Проблемы металлургии, материаловедения и сварки: Сб. тр. VII международной науч.-техн. конф. (Тбилиси, март 2002) — Тбилиси, 2002. — С. 347–353.
43. Биктагиров Ф. К. Применение электрошлакового процесса с нерасходуемыми электродами для плавки, рафинирования и обработки металлов. Сообщ. 1 // Пробл. спец. электрометаллургии. — 2002. — № 4. — С. 11–17.
44. Биктагиров Ф. К. Применение электрошлакового процесса с нерасходуемыми электродами для плавки рафинирования и обработки металлов. Сообщ. 2 // Современ. электрометаллургия. — 2003. — № 1. — С. 5–9.

Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, Киев
Поступила 07.02.2005