



УДК 669.187.526.001.57

ПЕРЕРАБОТКА ПРОМЫШЛЕННЫХ ОТХОДОВ МЕТАЛЛОПРОИЗВОДСТВА

**В. А. Шаповалов, Ф. К. Биктагиров, В. Р. Бурнашев,
В. В. Степаненко, Н. В. Рейда***

Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины
03680, г. Киев, ул. Боженко, 11. E-mail: office@paton.ua

Приведен краткий анализ технологических схем компактирования металлических материалов. Показана перспективность и экономическая целесообразность прессования некомпактной шихты путем сочетания процессов электронагрева и незначительных усилий прессования без использования мощного и дорогостоящего оборудования. Приведена схема опытной установки и описана пооперационная технологическая схема компактирования металлических материалов, а также даны основные технологические параметры процесса. Выполнен сравнительный анализ основных технических характеристик электроимпульсного и электротермического методов компактирования металлических материалов. Показано, что промышленное внедрение разработанной в ИЭС им. Е. О. Патона новой уникальной технологии электротермического компактирования и соответствующего оборудования позволяет создавать замкнутый (полный) цикл возврата в производство целой гаммы дорогостоящих вторичных ресурсов, что особенно актуально для металлургических и машиностроительных предприятий. Использование новой технологии наиболее эффективно при компактировании дорогих металлов и сплавов с высокими прочностью и модулем упругости. Библиогр. 10, табл. 1, илл. 1.

Ключевые слова: компактирование; расходный электрод; пуансон; матрица; рециклинг; металлооборот; электротермия

В настоящее время одной из главных задач в металлургии является максимальное вовлечение в производство вторичных ресурсов (металлический лом — скрап), отходы, образующиеся на различных стадиях производства и обработки металлопродукции), что обусловлено как особенностями существующих технологий, так и техническими требованиями к готовой продукции. Отходы в основном представляют собой кондиционный металл, который необходимо эффективно переработать и вернуть в производство (так называемый рециклинг), тем самым полностью замкнув металлооборот. Рациональное использование вторичных ресурсов способствует сохранению металлофонда любого производства, его оптимизации и удешевлению производимой продукции.

Обычно значительная часть отходов, особенно крупногабаритных, перерабатывается в плавильных агрегатах без предварительной подготовки. Однако существует целая гамма легковесных некомпактных металлических материалов (стружка, листовая обрезь, проволока, фольга, облой, всплесы, гранулированные порошки и др.), дальнейшее использование которых без предвари-

тельного компактирования или вообще невозможно, либо крайне затруднено. Поэтому требуются недешевые дополнительные технологические операции. В частности, основной сложностью при переработке металлической стружки, являющейся одним из важных резервов вторичного сырья, наряду с другими проблемами (большой угар при переплаве, загрязненность СОЖ и др.) является ее низкая насыпная плотность и отсутствие эффективной техники и технологии перегрузки при транспортировке и загрузке технологических агрегатов. Таким образом, проблема компактирования стружки и подобных ей материалов приобретает первостепенное значение, а необходимость ее решения является экономически обоснованной и целесообразной. Более того, при устранении данной проблемы попутно решится и задача компактного хранения и транспортирования этих материалов к месту их дальнейшей переработки и рациональной загрузки в плавильные агрегаты.

Однако несмотря на обилие существующих способов уплотнения металлических материалов (гидростатическое прессование, спекание, прокатка, штамповка, сварка взрывом и пр.) они из-за ряда причин как техни-

* В работе принимали участие О. В. Карускевич, Д. В. Ботвинко, Ю. А. Никитенко.



ческого, так и экономического характера не могут в полной мере обеспечить получение качественных крупногабаритных и дешевых компактных заготовок, пригодных для дальнейшего использования в металлообороте.

Основным способом компактирования металлических материалов, в частности при производстве титановых расходоуемых электродов для переплавных процессов, является холодное полунепрерывное прессование через конусную проходную или глухондную матрицу [1]. При холодном прессовании сцепление отдельных кусочков шихты (титановая губка, легирующие, кусковые отходы) осуществляется за счет механического сцепления (сдавливания) контактов, возникающих при больших усилиях деформации, уровень которых зависит от пластичности прессуемых материалов. Так, для получения расходоуемого электрода необходимых прочности и габаритов (диаметр 350...650 мм и длина 5000 мм) следует создавать колоссальные удельные давления прессования (в пределах 650...900 МПа). Применяемые для этого горизонтальные или вертикальные прессы представляют собой гигантские и дорогостоящие (стоимостью до 10 млн дол. США) конструкции. Однако даже такое давление не всегда гарантирует получение однородных по составу, прочных и ровных (без кривизны и трещин) расходоуемых заготовок.

Кроме того, следует отметить, что способ холодного прессования не является универсальным для всех металлических материалов. Высокопрочные легированные стали и сплавы фактически не поддаются компактированию этим способом, поскольку для их прессования из-за малой пластичности необходимы еще более высокие уровни давления и более сложное и дорогое оборудование, способствующее повышению себестоимости прессованных заготовок.

Существенно снизить усилия прессования и использовать имеющиеся в наличии недорогие прессы можно в результате сочетания прессования с нагревом для повышения пластичности шихты. Нагрев может осуществляться разными способами, в том числе в отдельных нагревательных печах, после чего металл подается в установку для прессования. Целесообразнее нагревать шихту в том же агрегате, где осуществляется компактирование. В этом случае наиболее экономичным является нагрев за счет выделения тепла непосредственно в нагреваемом материале, что реализуется при пропускании через шихту электрического тока. Поэтому в последнее время распространение получила электроимпульсная технология брикетирования стружки и других металлических отходов (разработка Физико-технического института им. А. Д. Иоффе) [2–4].

Суть этой технологии состоит в том, что стружку прессуют при сравнительно небольших уровнях давлениях (до 50 МПа) для высокопрочных сплавов, а затем подвергают специальной обработке с использованием коротких импульсов электрического тока, длительность и значение которых определяют в зависимости от комплекса физических характеристик прессуемого материала (удельное электросопротивление, магнитная проницаемость, температура плавления, размеры стружки и пр.).

Механизм нагрева и соединения предварительно спрессованной стружки в брикет основан на следующем. Поскольку сопротивление контактов между частицами стружки значительно выше, чем омическое сопротивление самих частиц, то джоулева энергия при протекании тока выделяется практически только в местах контактов между частицами. При этом длительность импульса тока задается так, чтобы за время импульса энергия не успевала отводиться из зоны контактов за счет теплопроводности ($< 0,001$ с). Это дает возможность локального разогрева зоны контактов между частицами шихты без разогрева всей ее массы. В конечном итоге осуществляется микросварка контактов, при этом реализуется механизм соединения, отличающийся от обычной диффузионной сварки, так как диффузия не может происходить столь быстро.

Сложность реализации такого способа брикетирования заключается в том, что для достижения прочной микросварки контактов в брикете необходимо обеспечить оптимальное сочетание двух параметров — длительности и значения импульса тока, причем индивидуальное для каждого материала; если длительность импульса удовлетворяет указанному соотношению, а ток недостаточен, то микросварка контактов не происходит либо сваривается лишь незначительное количество мелких контактов, в результате чего прочность брикета снижается и прессовка может вообще рассыпаться. Если же количество энергии, вводимой в контакты, слишком велико за счет повышения силы импульса, то происходит плавление контактов и их разрушение из-за развития магнито- и гидродинамической неустойчивости, причем чем больше плотность брикета, тем выше вероятность магнито- и гидродинамических разрушений. Указанным способом можно получить лишь брикеты с плотностью не более 50 % теоретической плотности металла. Однако такая плотность не всегда достаточна для последующей переработки и транспортировки полученных брикетов. Поскольку при электроимпульсном прессовании нагревают незначительную часть стружки (в зоне контактов) до относительно небольшой температуры и на очень короткое время, ее основная масса при обработке таким импульсом тока нагревается всего до 200 °С. При данной температуре заторможены процессы десорбции и удаления из стружки газов, влаги, эмульсии, поэтому происходит их своеобразное захватывание в брикете, что существенно снижает его качество. Полученные брикеты в ряде случаев имеют недостаточные плотность и прочность из-за невозможности образования при указанных режимах прочных и надежных контактов между частицами стружки за счет их спекания в результате недостаточного прогрева всей массы стружки и зон контакта ее элементов. Временное сопротивление титановых сплавов начинает резко снижаться лишь при температуре 600 °С, а при 1000 °С составляет всего 3...5 % временного сопротивления при нормальной температуре [5].

Особенностью электроимпульсного прессования является осуществление процесса брикетирования в глухондной пресс-форме (матрице), причем один из токоподводов находится на неподвижном дне матрицы (на нижнем пуансоне-электроде). Такое решение не позво-



Основные технические характеристики технологий компактирования металлических материалов

Параметры	Электроимпульсная (ФТИ им. А. Ф. Иоффе)*	Электротермическая (ИЭС им. Е. О. Патона)
Ток, кА	до 500	10...12
Напряжение, В	500...2500	10...12
Плотность тока, А/мм ²	250	1,2...1,5
Время прохождения тока, с	0,001...0,4	5...10
Усилие прессования, МПа	50	5
Пресс-форма	Глухая, изолированная	Проходная, изолированная
Механизм сцепления частиц	Электроимпульсная контактная сварка	Жидко-фазное соединение
Плотность брикетов, % от монолита	≤50	>70
Габариты брикетов (заготовок), мм:		
диаметр	40...75	100...200
высота	150...200	>1000
Масса прессовок, кг	≤1,0	>50
Среда	Воздух	Воздух, вакуум, аргон, гелий
Удельный расход электроэнергии, кВт·ч/кг	0,9...1,0	0,8...1,2
Ориентировочная стоимость опытной установки, млн дол.	20	1,5

*Данные взяты из работ [2–4].

ляет получать длинномерные брикеты в непрерывном или полунепрерывном режимах, поскольку за один цикл можно изготавливать только один брикет ограниченного габаритами матрицы размера. Так, размеры брикета из титановой стружки, полученного электроимпульсным способом, составляют всего лишь 64×60×150 мм, его плотность — 0,4...2,0 г/см³, масса — до 1 кг.

В сложившейся ситуации потребовалась разработка новых ресурсосберегающих и дешевых технологий, а также соответствующего оборудования для решения проблемы переработки металлических некомпактных отходов.

В связи с этим в ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины разработали новую технологию компактирования металлических материалов. Суть ее заключается, во-первых, в совмещении процесса прессования с относительно продолжительным электрическим нагревом, что позволяет повысить пластичность компактируемого в специальной матрице материала и существенно (на 2 порядка, по сравнению с холодным прессованием) уменьшить усилие прессования. При этом исключается ряд технологических операций, характерных для традиционных схем прессования (вакуумный отжиг, сварка и т. п.), повышается качество заготовок. Во-вторых, процесс реализуется в проходной матрице, что дает возможность получать длинномерные заготовки. В-третьих, нижний токопровод осуществляется непосредственно на формируемую заготовку (или заправку на старте), что способствует снижению электрических потерь, повышению КПД и производительности процесса. И, наконец, процесс ведется в полунепрерывном режиме, а разогрев каждой порции производят в два этапа: на первом — до

температуры десорбции газовых и жидко-фазных загрязнений, на втором — до температуры горячей деформации обрабатываемого материала, что вызывает повышение качества изделий и эффективности компактирования. Такой режим нагрева в сочетании с уплотнением способствует, во-первых, эффективному удалению газовых примесей и СОЖ с поверхности шихты, во-вторых, прогреву всей массы шихты и существенному повышению пластичности каждого ее элемента, а также возникновению жидкой фазы в зонах их контактов, что в конечном итоге приводит к образованию плотного жидко-твердого соединения как внутри каждой порции, так и между ними.

Особенно эффективна такая технология для компактирования дорогостоящих металлов и сплавов с высокими значениями прочности и модуля упругости. При этом можно получать заготовки как сплошные, так и полые, которые в дальнейшем используются в компактном виде в качестве переплавных электродов, лигатур, раскислителей и т. д. в любых плавильных агрегатах.

В зависимости от физико-химических свойств перерабатываемых материалов процесс их электротермического компактирования можно осуществлять как в установках камерного типа с созданием контролируемой атмосферы (аргона, гелия) или вакуума для высокорреакционных материалов (титан, цирконий), так и в открытых установках в атмосфере воздуха для переработки отходов стали, чугуна и др.

Технологическая схема получения скомпактированной заготовки предусматривает ряд следующих последовательных операций:

загрузку порции некомпактной шихты в матрицу;

предварительное сжатие (уплотнение) и электронагрев всей порции шихты до температуры (в пределах 0,5...0,8 T) плавления (в локальных точках температура превышает температуру плавления металла);

осадку и приваривание порции к ранее спрессованной массе или затравке (на старте);

проталкивание порции вместе с заготовкой или затравкой вниз; подъем пуансона.

После этого операции повторяются до достижения заданной длины готового изделия (заготовки), затем следуют охлаждение и извлечение. Таким образом, получаем прочную сварно-спрессованную заготовку, в которой отдельные элементы (частицы и порции шихты) соединены между собой.

В таблице приведены технические возможности электроимпульсного (разработка ФТИ им. А. Ф. Иоффе) и электротермического (разработка ИЭС им. Е. О. Патона) способов компактирования.

Как видно из таблицы, способ ИЭС им. Е. О. Патона по основным показателям является предпочтительным, поскольку позволяет при меньших механических усилиях и материальных затратах получать более плотные и крупногабаритные заготовки.

Предложенная технология компактирования металлических материалов для получения заготовок диаметром 100 мм реализована на специально для этого сконструированной опытной установке, схема которой представлена на рисунке. В отличие от других подобных схем, установка оснащена механизмом вытягивания для получения длинномерных заготовок. На ней определены оптимальные технологические параметры компактирования разнообразных металлических материалов, отличающихся по физическим свойствам (удельному весу, тепло- и электропроводности), таких как сталь, чугун, алюминий, жаропрочные сплавы, титан и др. [6–10]. При этом использовали их разные размерность и гранулометрический состав.

Скомпактированные из стальной стружки (X18H9T, ЭП-609) заготовки диаметром 100 мм и высотой 1000 мм в дальнейшем использовали в качестве расходоуемых электродов при электрошлаковой выплавке слитков.

Металлографические исследования темплетов, вырезанных из данных слитков в поперечном и продольном направлениях, показали, что металл плотный, однородный, без видимых дефектов. В ходе исследований механических свойств, проведенных в условиях НПО «Заря»–«Машпроект», г. Николаев, установлено, что механические свойства материала слитков, а также химический состав металла удовлетворяют техническим требованиям [8, 10].

Показано, что новая технология позволяет эффективно производить утилизацию некомпактных металлических отходов, способствуя повышению рентабельности производства.

В процессе исследований установлено, что полученные заготовки являются довольно прочными. Это подтверждено при воздействии на образцы ударной нагрузки 60...70 Дж/см². Их плотность составляет 70...75 % теоретической (плотности монолитного металла), что

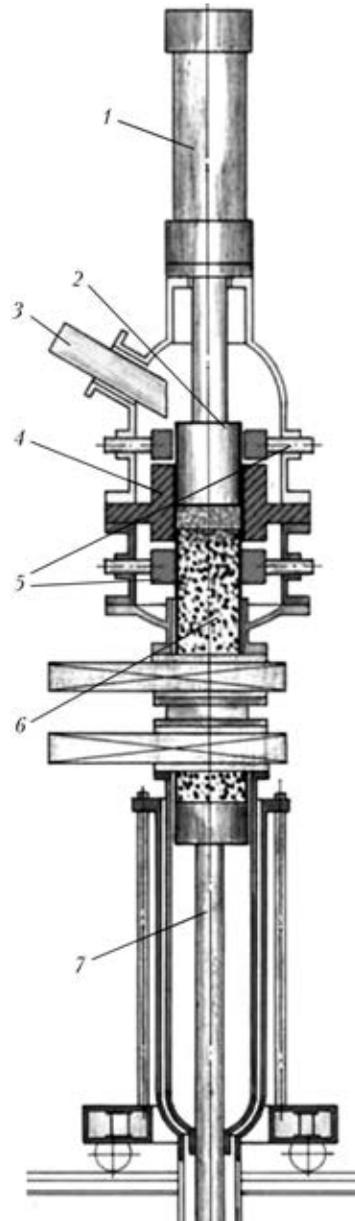


Схема опытной установки электротермического компактирования металлических материалов: 1 — гидроцилиндр; 2 — пуансон; 3 — лоток для компактируемых материалов; 4 — матрица; 5 — токоподводы; 6 — скомпактированная заготовка; 7 — шток

является достаточным для использования в качестве расходоуемых заготовок в ходе дальнейшего переплава.

Установлено также, что с уменьшением гранулометрического состава любого металлического материала увеличивается плотность скомпактированных заготовок, что объясняется наличием большого количества точек соприкосновения между мелкими частицами и, как следствие, более эффективным прогревом и локальным подплавлением в процессе компактирования. С увеличением размеров фракций шихты необходимо несколько увеличивать значение подводимого тока и длительность нагрева каждой порции для достижения ее гарантированного уплотнения.

Накопленный опыт и данные экспериментов на опытной установке позволяют приступить к разработке более совершенного высокопроизводительного опытно-промышленного оборудования для компактирова-

ния качественных и экономичных длинномерных заготовок из разнообразных металлических материалов (стружка, губка, порошки, гранулы, кусковая обрезь и пр.) со стабильными физико-механическими свойствами по всей длине. В настоящее время в ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины проектируется ряд модификаций установок компактирования для получения заготовок разных типоразмеров, вплоть до диаметров 500 мм и любой требуемой высоты.

Таким образом, промышленное внедрение предложенной технологии и соответствующего оборудования позволит создать замкнутый (полный) цикл возврата в производство дорогостоящих вторичных ресурсов, что особенно актуально для крупных металлургических и машиностроительных предприятий. Срок окупаемости оборудования составит 8...12 мес в зависимости от стоимости компактируемых материалов.

1. Плавка и литье титановых сплавов / Н. Ф. Аношкин, С. Г. Глазунов, Е. И. Морозов, В. В. Тетюхин. — М.: Металлургия, 1978. — 383 с.
2. Абрамова К. Б., Самуйлов С. Д., Фиглин Ю. А. Брикетирование титановой стружки под воздействием коротких импульсов элект-

рического тока // Цветные металлы. — 1998. — № 12. — С. 70–74.

3. Самуйлов С. Д. Электроимпульсная технология брикетирования стружки и других отходов черных металлов // Черные металлы. — 2009. — № 9. — С. 14–19.
4. Пат. 2063304 РФ, МПК В 30 В 9/32. Способ брикетирования металлической стружки / К. Б. Абрамова, С. Д. Самуйлов, Ю. А. Фиглин. — Оpubл. 10.07.96; Бюл. № 19.
5. Горячая штамповка и прессование титановых сплавов / Л. А. Никольский, С. З. Фиглин, В. В. Бойцов и др. — М.: Машиностроение, 1975. — 285 с.
6. Пат. 7997 Украина, МПК С 22 В 1/248. Спосіб компактування металевий шихти / Б. С. Патон, М. Л. Жадкевич, В. О. Шаповалов та ін. — Оpubл. 10.08.2007, Бюл. № 12.
7. Получение расходуемых электродов компактированием титановой губки под током / М. Л. Жадкевич, В. А. Шаповалов, В. С. Константинов и др. // Современ. электрометаллургия. — 2005. — № 3. — С. 64–67.
8. Переработка стружки жаропрочной стали ЭП609-III способом компактирования под током с последующим электрошлаковым переплавом / В. А. Шаповалов, В. Р. Бурнашев, Ф. К. Биктагиров и др. // Там же. — 2009. — № 3. — С. 43–45.
9. Электротермическое компактирование металлических материалов / В. А. Шаповалов, В. Р. Бурнашев, Ф. К. Биктагиров и др. // Там же. — 2011. — № 4. — С. 42–45.
10. ЭШП электродов, спрессованных из стружки аустенитных нержавеющей сталей / В. А. Шаповалов, В. Р. Бурнашев, Ф. К. Биктагиров и др. // Там же. — 2011. — № 4. — С. 46–48.

The brief analysis of technological schemes for compaction of metal materials was carried out. The prospects and economic efficiency of pressing the non-compact charge by combining the processes of electric heating and negligible pressing forces without use of powerful and expensive press equipment are shown. The scheme of pilot installation is presented and functional technological scheme of compacting the metal materials is described, as well as the basic technological parameters of process are given. Also comparative analysis of the main technical characteristics of electric-pulsed and electrothermal methods of compacting the metal materials was carried out. It is shown that industrial implementation of the unique technology of electrothermal compaction and corresponding equipment, developed at the E.O.Paton Electric Welding Institute, will allow creating the closed (full) cycle of return to production of the whole scale of expensive secondary resources that is especially important for metallurgical and machine-building enterprises. The new technology is most effective for compaction of expansive metals and alloys with a high strength and modulus of elasticity. Ref. 10, Table 1, Fig.1.

Key words: compaction; consumable electrode; punch; matrix; recycling; metal recycling; electrothermics

Поступила 30.08.2012

НОВАЯ КНИГА

МЕТАЛЛУРГИЯ ДУГОВОЙ СВАРКИ И СВАРОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ. —

Киев: Академперіодика, 2012. — 526 с.



Сборник включает 120 статей сотрудников отдела исследований физико-химических процессов в сварочной дуге Института электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины, опубликованных ранее, преимущественно в журнале «Автоматическая сварка», которые обобщают полувековой опыт научно-исследовательской деятельности отдела. Представленные статьи охватывают широкий круг вопросов металлургии дуговой сварки плавлением и разработки сварочных материалов.

Сборник предназначен для широкого круга специалистов, занимающихся изучением металлургии дуговой сварки, разработкой сварочных материалов и технологий их производства.

Заказы на книгу просьба направлять
в редакцию «Современная электрометаллургия»
Тел./факс: (38044) 200-82-77; 200-54-84
E-mail: journal@paton.kiev.ua