



ПОЛУЧЕНИЕ РАСХОДУЕМЫХ ЭЛЕКТРОДОВ КОМПАКТИРОВАНИЕМ ТИТАНОВОЙ ГУБКИ ПОД ТОКОМ

**М. Л. Жадкевич, В. А. Шаповалов, В. С. Константинов,
В. В. Степаненко, Г. Ф. Торхов, В. Р. Бурнашев,
Н. В. Рейда, В. И. Колесниченко**

Дан краткий анализ технологических схем изготовления прессованной заготовки из некомпактной шихты для последующего передела. Показана перспективность и экономическая целесообразность прессования некомпактной шихты путем сочетания процессов электронагрева и незначительных усилий прессования без использования мощного и дорогостоящего прессового оборудования. Описано устройство опытной установки, приведены пооперационная технологическая схема прессования некомпактной шихты и основные технологические параметры процесса.

Analysis of technological charts of manufacture of a pressed billet from a non-compact charge for subsequent remelting is described briefly. The prospects and economic efficiency of pressing of non-compact charge by combination of processes of electric heating and negligible forces of pressing without use of powerful and expensive press equipment are shown. Design of a pilot installation is described and functional technological charts of pressing non-compact charge and main technological parameters of the process are given.

Ключевые слова: компактирование; расходный электрод; титан; губка

После продолжительного спада в последнее время зафиксировано повышение спроса на титановую продукцию. Интерес к титану, отличающемуся комплексом уникальных свойств [1], проявляют даже те отрасли промышленности, в которых раньше его почти не использовали.

Расширение производства и применения титана встречает жесткую конкуренцию со стороны производителей альтернативных конструкционных материалов, и главным аргументом здесь является цена.

Снижение себестоимости титановой продукции при сохранении качества может быть достигнуто путем создания более дешевых и эффективных технологий на всех стадиях сложной цепочки производства изделий на основе титана, начиная с руды и губки. Необходимо разработать новые процессы, позволяющие резко снижать затраты.

Одной из таких разработок, на наш взгляд, является созданная в последние годы в ИЭС им. Е. О. Патона уникальная технология получения расходных электродов из губчатого титана или титановой стружки, суть которой заключается в сочетании процессов электронагрева и прессования без использования мощного и дорогостоящего прессового оборудования. При этом усилие прессования снижается как минимум в 20 раз, по сравнению с традиционным процессом изготовления расходных электродов.

Основным способом производства расходных электродов для переплавных процессов является холодное полунепрерывное прессование через конусную проходную или глухонную матрицу [2], при

котором сцепление кусочков шихты (титановая губка, легирующие, кусковые отходы) осуществляется за счет механического сдавливания контактов, возникающих при больших усилиях деформации, зависящих от пластичности прессуемых материалов.

Так, для получения расходного электрода с требуемыми прочностью и габаритами (диаметр 350...650 мм, длина 5000 мм) необходимо создать колоссальные удельные давления прессования в пределах 6,5...9,0 кПа [3]. Применяемые для этого горизонтальные или вертикальные прессы представляют собой гигантские и дорогостоящие (до 10 млн дол. США) конструкции. Однако даже такое давление не всегда гарантирует получение однородных по составу, прочных и ровных (без трещин) расходных заготовок.

При прессовании в проходную матрицу порция шихты после сжатия в матрице не извлекается из нее полностью. Оставшаяся часть служит подвижным поддоном для последующей порции. При максимальных значениях усилий прессования с одновременным сжатием осуществляется перемещение прессовки вдоль внутренней поверхности матрицы. Процесс протекает непрерывно до достижения необходимых размеров отпрессованной заготовки. В силу специфики процесса прессования происходит опережающее движение центральных слоев каждой порции относительно ее периферийных слоев, прилегающих к внутренним стенкам матрицы. В результате больших растягивающих напряжений возникают трещины, могущие стать причиной разрушения расходного электрода во время плавки и выхода печи со строя. Еще одним недостатком такого вида прессования является насыщение поверхности электрода вредными примесями железа



вследствие трения кусочков губки о внутреннюю поверхность матрицы.

Другой распространенный способ изготовления расходуемого электрода предусматривает холодное прессование губчатого титана в глухондунную матрицу с получением пресс-шайб диаметром 300... 500 мм, высотой не более 200... 250 мм, которые затем свариваются в электрод необходимой длины. Сварку осуществляют с помощью плазмотронов или электронно-лучевых источников нагрева. Преимуществом этого способа является отсутствие трещин на поверхности электрода, однако дополнительный процесс сварки способствует загрязнению поверхности электрода газовыми примесями, кроме того, требуется использование специальных печей.

Следует также отметить, что этот способ не является универсальным для всех металлических материалов. Высокопрочные, легированные стали и другие высокопрочные сплавы фактически не поддаются компактированию указанным способом, поскольку для их прессования из-за малой пластичности необходимы еще более высокие давления, что приводит к снижению производительности и повышению себестоимости продукции.

Значительно снизить усилия прессования и использовать имеющиеся недорогие прессы можно посредством сочетания прессования с нагревом для повышения пластичности шихты. Нагрев осуществляется, как правило, путем пропускания электрического тока через шихту.

Способ электроимпульсного прессования металлической стружки, преимущественно титановой [4], состоит в прессовании стружки при сравнительно небольшом уровне давления (до 5 кПа) для высокопрочных сплавов и пористости брикетов (примерно 50 %), а затем ее подвергают специальной магнитно-гидродинамической (МГД) обработке с использованием коротких импульсов электрического тока, длительность и амплитуду которых определяют в зависимости от целого 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 импульсов тока задается таким образом, чтобы за время импульса энергия не успевала отводиться из зоны контактов теплопроводностью ($< 0,001$ с). Это дает возможность локального разогрева зоны контактов между частицами шихты без разогрева всей ее массы. В результате происходит микросварка контактов, при этом реализуется механизм соединения, отличающийся от обычной диффузионной сварки, так как диффузия не может осуществляться 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 амплитуды импульса то-

ка, причем индивидуально для каждого материала; если длительность импульса удовлетворяет указанному соотношению, а уровень тока недостаточен, то микросварка контактов не происходит либо сваривается лишь незначительное количество мелких контактов, в результате чего прочность брикета снижается, и он может вообще рассыпаться. Если же количество энергии, вводимой в контакты, слишком велико вследствие повышения амплитуды импульса, то происходит плавление контактов и их разрушение из-за развития МГД неустойчивости, причем, чем выше плотность брикета, больше вероятность МГД разрушения. Поэтому таким способом можно получить лишь брикеты плотностью не более 50 % теоретической плотности металла. Такая плотность не всегда достаточна для последующей переработки и транспортировки полученных брикетов.

Специфика индивидуального подбора оптимальных соотношений длительности и амплитуды импульса тока не позволяет производить совместное брикетирование разных сортов стружки, получать композитные и биметаллические соединения, исключает ввод легирующих элементов, что существенно ограничивает технологические возможности этого способа.

Поскольку при электроимпульсном прессовании нагревают незначительную часть стружки (в зоне контактов) до относительно небольшой температуры и на очень короткое время, основная масса стружки при обработке прессовки таким импульсом тока нагревается незначительно (до 200 °С). При такой температуре крайне заторможены процессы десорбции и удаления из стружки газов, влаги, эмульсии (смазочно-охлаждаемой жидкости), происходит их своеобразное захватывание в сварном каркасе, что существенно снижает качество брикетов.

Способ брикетирования стружки, сочетающий электронагрев постоянным током и прессование, состоит в следующем [5]. Дробленую и очищенную стружку, в частности титановую, загружают в герметичную электроизолированную пресс-форму, включают пресс, который создает давление 0,20... 0,25 кПа. При этом происходит предварительное уплотнение стружки: через пресс-форму прокачивают инертный газ аргон с добавлением водорода для создания инертной среды, пропускают постоянный электрический ток плотностью 8... 11 А/мм² в течение 10... 15 с, после чего происходят дальнейшее уплотнение стружки и образование механических контактов за счет деформации металла. Электрический ток используют для разогрева всей стружки с целью увеличения ее пластичности, что позволяет получать брикеты при вдвое меньшем усилии прессования, чем при электроимпульсном брикетировании.

Тем не менее полученные таким образом брикеты в ряде случаев имеют недостаточные плотность и прочность, поскольку при указанных режимах невозможно образование прочных и надежных контактов между частицами стружки за счет их спекания вследствие недостаточного прогрева всей массы стружки и зон контакта ее элементов. Временное сопротивление титановых сплавов начинает резко снижаться лишь при температуре 600 °С, а при

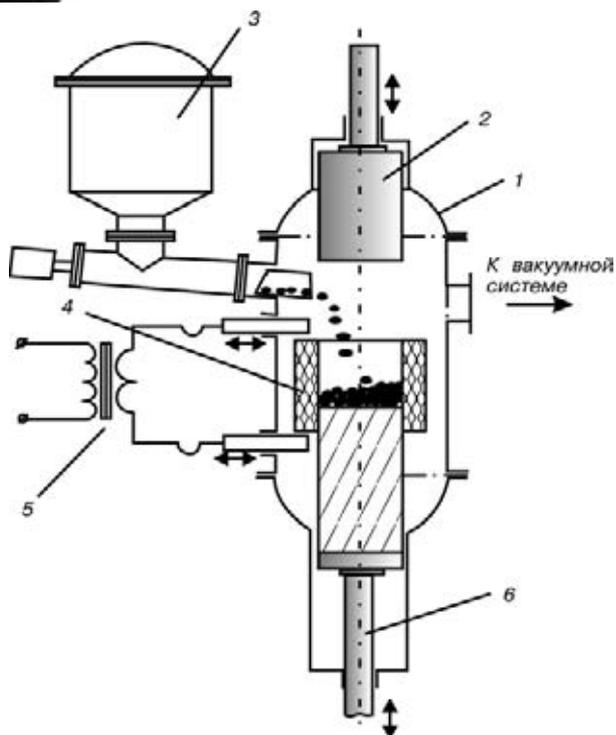


Рис. 1. Схема опытной установки компактирования шихты в заготовку для последующего переplava; обозн. поз. 1–6 см. в тексте

1000 °С составляет всего 3... 5 % σ_v в условиях нормальной температуры [6].

Недостаточно высокая температура, присущая анализируемому способу, снижает эффективность удаления из стружки газовых примесей, следов масел и охлаждающих эмульсий, несмотря на принудительную циркуляцию аргоно-водородной смеси. К тому же, для применения водорода требуется обеспечение повышенных мер безопасности процесса.

Главным недостатком двух последних способов является то, что процесс брикетирования производится в глухой пресс-форме (матрице), причем один из токоподводов осуществляется к неподвижному дну матрицы (к нижнему пуансону-электроду). Такое решение не позволяет производить длинномерные брикеты в непрерывном или полунепрерывном режиме. По упомянутой схеме можно получать только один брикет ограниченных габаритами матрицы размеров. Так, размеры брикета из титановой стружки, полученного электроимпульсным способом, составляют лишь 60 × 64 × 150 мм, его плотность — 0,4... 2,0 г/см³, масса — до 1 кг.

Перед нами стояла задача разработать эффективную технологию получения качественных и экономичных длинномерных заготовок со стабильными физико-механическими свойствами по всей длине из титановой губки и вторичных ресурсов титана (стружки, гранул, кусковых отходов) для дальнейшего вовлечения их в металлооборот в качестве расходных электродов.

Поставленной цели достигли благодаря тому, что компактирование шихты в сочетании с ее прямым электронагревом производили в проходной матрице специальной конструкции, а нижний подвод тока осуществляли не к стационарному (неподвижному) поддону-электроду, а непосредственно на формируемую заготовку или на затравку (в старто-

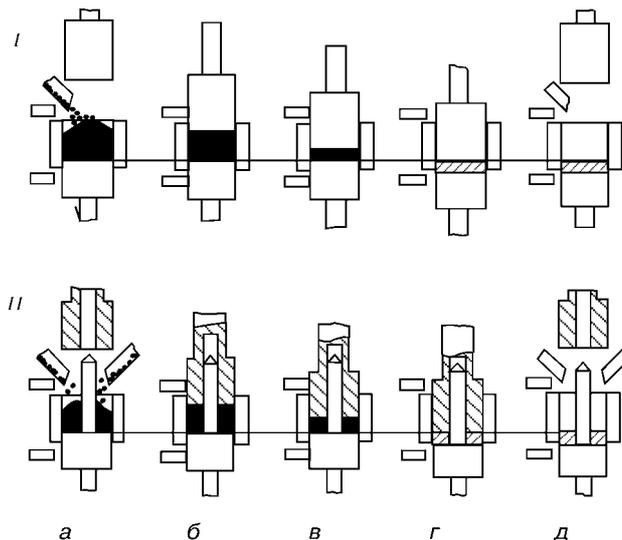


Рис. 2. Технологическая схема прессования электродов: I — сплошного сечения; II — порый; а — загрузка некомпактной шихты; б — предварительное сжатие и нагрев всей порции шихты до температуры выше 0,5 $T_{пл}$; в — осадка и приваривание порции к спрессованной массе; з — проталкивание порции вместе с электродом вниз; д — подъем пуансона

вый период), что существенно снижает электрические потери и повышает КПД. Процесс выполняли порционно в полунепрерывном режиме (уплотняли каждую порцию, а нагревали в два этапа: сначала до температуры десорбции, затем — не ниже, чем до температуры горячей деформации шихты).

Такой режим нагрева в сочетании с уплотнением способствует, во-первых, эффективному удалению газовых и жидкофазных загрязнений 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 итоге приводит к образованию плотного жидкотвердого пластического соединения как внутри каждой порции, так и между ними.

Предложенная технологическая схема реализована на специально сконструированной опытной установке (рис. 1). В схему установки входит герметичная камера прессования 1, пуансон 2, бункер 3, проходная матрица специальной конструкции 4, источник питания 5, механизм вытягивания 6, системы вакуумирования и газоснабжения.

На установке отработаны технологические параметры компактирования различных сортов и фракций титановой губки, стружки отдельных металлических материалов (титана, стали, чугуна) и некоторых видов легковесного металлолома (листовой обрезь, проволоки, порошков и пр.).

Процесс компактирования происходит в вакууме или контролируемой атмосфере (аргон, гелий или другие газы). На рис. 2 приведена технологическая схема получения компактированной заготовки, включающая такие последовательные операции: загрузку порции некомпактной шихты в матрицу; предварительное сжатие (уплотнение) и электронагрев всей порции шихты до температур в пределах 0,5... 0,8 температуры плавления (в локальных точках температура превышает температуру плавления металла); осадку и приваривание порции к спрессованной массе или затравке (на старте); проталки-

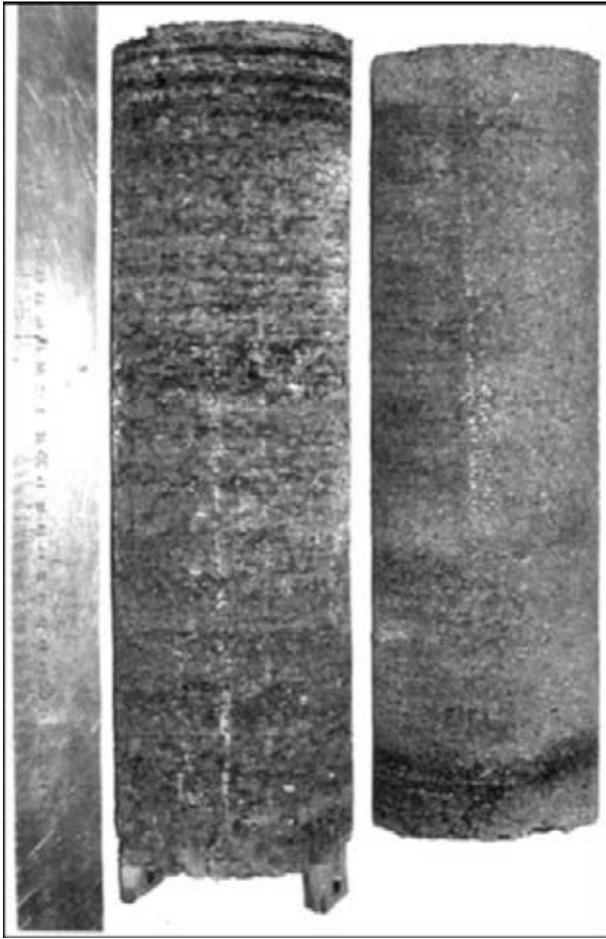


Рис. 3. Общий вид полученных заготовок

вание порции вместе с электродом или затравкой вниз; подъем пуансона.

Затем операции повторяют до получения готового изделия (электрода) заданной длины, которые охлаждаются в вакууме или инертной среде и извлекают.

Таким образом, в результате последовательных циклов получают прочный сварно-спрессованный электрод, в котором отдельные элементы соединены между собой прессованием после предварительного оплавления в местах их контакта.

На рис. 3 приведен общий вид двух электродов, полученных компактированием разных фракций титановой губки, а на рис. 4 — макротемплет фрагмента одного из электродов, на котором показано соединение четырех порций шихты.

Разработанная технология позволила при низких удельных усилиях прессования (примерно 0,5 кПа) получить качественные длинномерные электроды плотностью 80... 90 % теоретической. Эта технология дает возможность получать расходоуемые электроды как сплошного сечения, так и полые. Размеры указанных образцов электродов имели диаметр 100 мм и длину 700 мм. В настоящее время разрабатывают и испытывают матрицы диаметром 200 и 400 мм.

Таким образом, применение предложенной технологии позволяет получать преимущества как экономического характера, так и в плане повышения безопасности производства. При этом исключаются

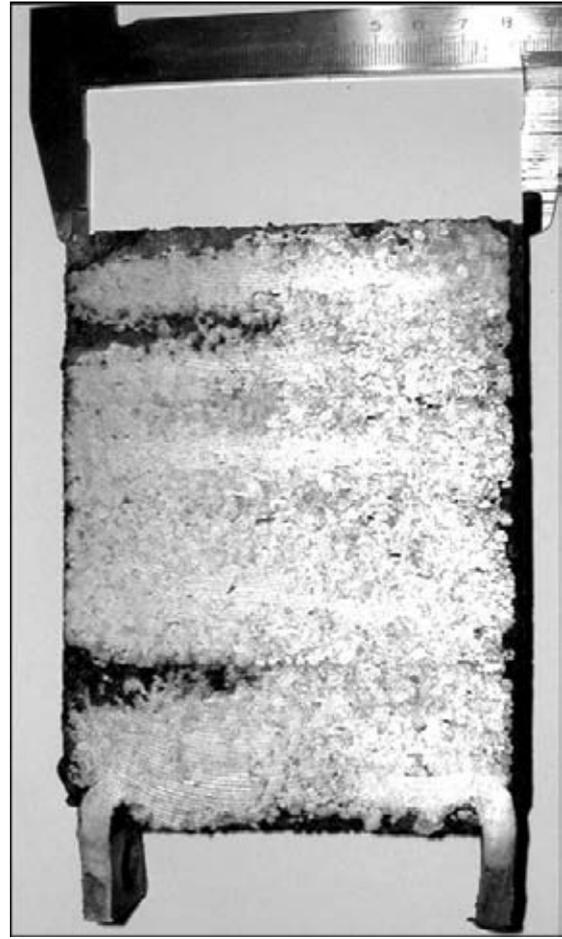


Рис. 4. Макротемплет фрагмента скомпактированной заготовки

использование мощного и дорогостоящего прессового оборудования, а также выполнение ряда технологических операций, присущих традиционной схеме (сварка, вакуумный отжиг и т. д.). В качестве шихты можно использовать целую гамму металлических материалов: губку, порошок, добавки кусковых отходов или 100 % стружки. В случае оснащения установки дозирующими устройствами возможно приготовление сложнолегированных сплавов, а также различных биметаллических и композитных соединений из отходов разных металлов.

1. *Металлургия титана* / В. Л. Гармата, Б. С. Гуляницкий, В. Ю. Крамник и др. — М.: Металлургия, 1968. — 643 с.
2. *Плавка и литье титановых сплавов* / Н. Ф. Аношкин, С. Г. Глазунов, Е. И. Морозов, В. В. Тетюхин. — М.: Металлургия, 1978. — 383 с.
3. *Абрамова К. Б., Самуйлов С. Д., Фиглин Ю. А.* Брикетирование титановой стружки под воздействием коротких импульсов электрического тока // Цвет. металлы. — 1998. — № 12. — С. 43–45.
4. *Пат. 2063304* РФ, МПК В 22 F 3/12. Способ брикетирования металлической стружки // Б. И. Тараненко, А. П. Гусенков, М. М. Моисеенко и др. — Оpubл. 23.07.1992; Бюл. № 27.
5. *А. с. 1748942* СССР, МПК В 22 F 3/12. Способ брикетирования металлической стружки // К. Б. Абрамов, С. Д. Самуйлов, Ю. А. Фиглин. — Оpubл. 10.07.96; Бюл. 19.
6. *Горячая штамповка и прессование титановых сплавов* / Л. А. Никольский, С. З. Фиглин, В. В. Бойцов и др. — М.: Машиностроение, 1975. — 285 с.

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

Поступила 15.06.2005