



УДК 669.187.58.002.2

## ИССЛЕДОВАНИЕ СОСТАВА ГАЗОВОЙ ФАЗЫ ПРИ ПЛАЗМЕННО-ДУГОВОЙ ПЛАВКЕ ТИТАНА ИЗ ПРЕССОВАННОЙ ЗАГОТОВКИ

М. Л. Жадкевич, В. А. Шаповалов, В. В. Тэлин,  
С. М. Теслевич, В. С. Константинов, Г. Ф. Торхов, В. Р. Бурнашев \*

Изучен состав газовой атмосферы при плавке отпрессованной из губчатого титана заготовки. Установлено, что в зоне плавки содержание водорода и влаги изменяется в зависимости от скорости плавления заготовки, марки губчатого титана, расхода плазмообразующего газа, сроков хранения прессованной заготовки.

Composition of gas atmosphere was studied in melting of a pressed spongy titanium billet. It was established that content of hydrogen and moisture in the zone of melting is changed depending on the rate of billet melting, grade of spongy titanium, consumption of plasma-forming gas, terms of storage of a pressed billet.

**Ключевые слова:** губчатый титан; прессованная заготовка; плазма; водород; газовая фаза; влага; плавка

Как отмечалось неоднократно, основная задача производства титана заключается в снижении его стоимости при обеспечении высокого качества металла по всей технологической цепи. Одно из важнейших мест в этой цепи принадлежит выплавке слитка. Во многих странах, производящих титановую продукцию, ведущим технологическим процессом получения слитка остается вакуумно-дуговой переплав прессованного электрода, получение которого — операция дорогостоящая, но обеспечивающая выплавку слитка высокого качества [1].

На всех этапах развития и совершенствования технологии плавки предпринимались попытки получения слитков непосредственно из кусковой шихты, минуя стадию прессования. С появлением независимых источников нагрева — плазмотронов, электронных пушек, высокочастотного электромагнитного поля и т. п. — резко возрос интерес к переплаву некомпактной шихты [2–4].

В частности, в течение нескольких лет был создан ряд опытных, опытно-промышленных установок, в которых для переплава некомпактной шихты в качестве источника нагрева использовали низкотемпературную плазму. Генератором плазмы слу-

жит плазмотрон с вольфрамовым или графитовым электродом. На печах получали слитки различных профилей, которые использовали для дальнейшего передела на лист или для фасонного литья [5]. Однако в процессе проведения плавки газонасыщенной шихты отмечалось бурное газовыделение из жидкого металла, сопровождающееся выбросами частиц из расплава, которые кристаллизовались на соплах плазмотронов и становились геттерами для кислорода и азота.

В процессе плавки закристаллизовавшиеся брызги насыщаются газами, пополняются новыми порциями выносимых из ванны частичек жидкого металла, насыщенного газами. Металл под воздействием высоких температур плазменных струй постепенно оплавляется, и капли жидкого металла падают в расплав. Кроме того, под воздействием каких-либо возмущений закристаллизовавшийся кусочек металла может также упасть в жидкую ванну. Температура плавления насыщенного газами металла на несколько сот градусов выше температуры плавления основного металла, поэтому упавшие капли или кусочки полностью не растворяются в расплаве и могут послужить причиной образования включений в слитке.

В дополнение следует отметить, что плазменные печи для переплава сыпучей шихты имеют сложную

---

\*В работе принимал участие Назаренко С. П.

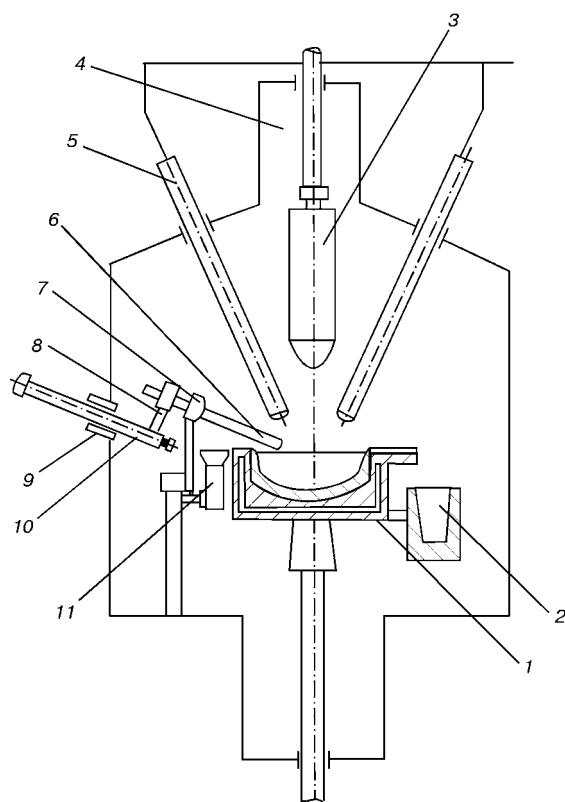


Рис. 1. Схема модернизированной 4-плазмотронной лабораторной установки УПП-3: 1 — гарнисажный тигель; 2 — изложница; 3 — прессованная заготовка; 4 — камера; 5 — плазмотрон; 6 — водоохлаждаемый наконечник; 7 — отсекагель; 8 — держатель; 9 — уплотнение; 10 — шток; 11 — накопитель

конструкцию, большой внутренний объем для размещения шихты, требуют применения мощных откачных систем для дегазации шихты, сложны в управлении и т. д.

С учетом перечисленных проблем и необходимости получения для изделий ответственного назначения высококачественного металла, при выплавке которого недопустимо наличие включений, представляется целесообразным использовать в качестве переплавляемого материала компактную заготовку. Она может быть получена различными методами, в том числе и прессованием.

Нами были проведены опытные плавки губчатого титана, отпрессованного в расходную заготовку диаметром 40 мм и длиной до 300 мм. Основное внимание при этом обращалось на поведение газовых примесей, в частности, водорода и влаги, которые содержатся в прессованной заготовке и оказывают существенное влияние на качество выплавленного металла.

Пробы губчатого титана для получения расходной заготовки отбирали из различных мест контейнеров, предназначенных для его хранения. Общий вес пробы из кусочков размером 12...25 мм составляет 10 кг. В дальнейшем их измельчали на конусной дробилке до размера не более 5...10 мм и сокращали на щелевом делителе до сертифицированной пробы массой до 5 кг с последующим ее разделением на 4 части массой до 1,2 кг каждая. Одна из проб предназначалась для изготовления расхо-



Рис. 2. Плавильная камера с тиглем и изложницей для переплава прессованной заготовки

дуемой заготовки методом прессования в проходную матрицу на гидравлическом прессе усилием 1600 кН. Отпрессованные заготовки укладывали в двухслойные полиэтиленовые пакеты, где они хранились до плавки.

Плавки проводили на опытной модернизированной 4-плазмотронной плазменно-дуговой печи УПП-3, схема и общий вид которой показаны на рис. 1 и 2. Она включает плавильную камеру, 4 плазмотрона с механизмами их юстировки, механизм подачи заготовки, медный водоохлаждаемый тигель, металлический кокиль, вакуумную систему, систему охлаждения и источники питания.

Содержание водорода измеряли газоанализатором ТГ1120 в комплекте с потенциометром КСМ2. Для определения количества влаги использовали кулонометрический измеритель влажности типа «Байкал-1». Отбор проб газа осуществляли через верх камеры, имеющей вывод в атмосферу. Для предотвращения попадания частичек пыли в датчик приборов на отводящем газ патрубке устанавливали фильтр тонкой очистки.

Перед началом плавки стенки плавильной камеры, медного тигля, сопла и корпуса плазмотронов тщательно очищали от возгонов, образовавшихся при предыдущей плавке. Очистку стенок производили металлической щеткой, а затем ветошью, смоченной техническим спиртом. После этого к механизму подачи заготовки присоединяли расходный электрод и поднимали его за срез сопел плазмотронов, чтобы предотвратить его преждевременное плавление в момент включения плазмотронов и наведения ванны в тигле. Для предупреждения прогара тигля в момент включения плазмотронов на его дно укладывали темплет из технического титана. Металлическую форму для слива металла перед установкой в камеру печи прогревали 2 ч до температуры 300...400 °С. Подготовленную к плавке печь в течение 45...60 мин вакуумировали до остаточного разрежения 26...33 Па, проверяли натекание и затем заполняли внутренний объем печи аргоном до избыточного давления 0,02 МПа.

Плавку начинали поджигом двух плазмотронов на минимальных режимах (ток 300 А и напряжение 40 В). После расплавления затравочного темплета



Рис. 3. Отлитый (1) и обработанный (2) образцы из технического титана диаметром 120 мм и высотой 7 мм

и частичного прогрева расходуемой заготовки производили ее подачу в зону плавки. Время расплавления заготовки и прогрева заготовки составляло 2...3 мин. Подачу заготовки осуществляли с различной скоростью, в зависимости от мощности на плазматроне она изменялась от 2 до 7 мм/мин. Токтовую нагрузку на плазматроне поддерживали в пределах 300...400 А. Расход газа на плазматронах составлял 4...10 л/мин. Плавки выполняли в проточной атмосфере аргона.

Плавка пресованной расходуемой заготовки диаметром 40 мм и длиной до 300 мм продолжалась 25...30 мин. После полного сплавления заготовки в тигель его резко наклоняли и сливали жидкий металл в изложницу, где он затвердевал.

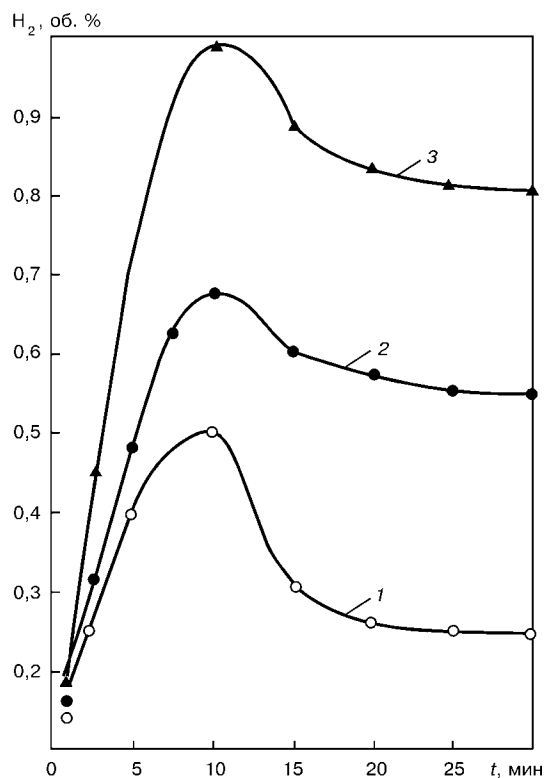


Рис. 4. Зависимость содержания водорода в плавильном объеме печи от изменения расхода плазмообразующего газа (аргон): 10 (1), 30 (2) и 40 (3) л/мин

После охлаждения темплет диаметром 120 мм и высотой 5...7 мм (рис. 3) извлекали из изложницы, обтачивали поверхность и отбирали пробы для определения концентрации водорода в металле. Отбор проб отходящего газа из камеры печи для определения содержания водорода и влаги производили после включения плазматронов на плавку. Количество водорода измеряли прибором в момент включения плазматронов.

Наличие водорода в плавильной камере, как это уже было показано в других работах [6], обусловлено тепловым воздействием плазменных факелов на стенки плавильной камеры, сопла и корпуса плазматронов, стенки тигля и переплавляемую заготовку. В результате интенсивного нагрева влага со стенок камеры отрывается и потоками плазменной струи разносится по всему внутреннему объему установки. Часть ее попадает на разогретую титановую заправку, что приводит к разложению влаги на кислород и водород, который переходит в атмосферу печи.

В момент расплавления заправки наблюдается кратковременное увеличение содержания водорода, а затем его снижение. При последующей подаче в зону плавки пресованной заготовки, изготовленной из высококачественного губчатого титана, отмечено плавное нарастание количества водорода в течение 5...10 мин, а затем снижение, сначала интенсивное, потом замедленное.

При увеличении расхода плазмообразующего газа максимальное выделение водорода снижается в зависимости от количества подаваемого инертного

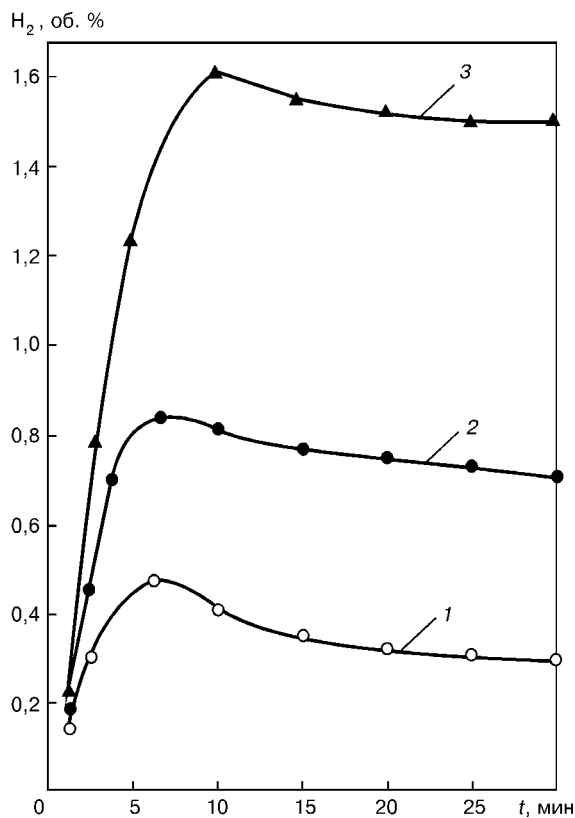


Рис. 5. Изменение содержания водорода в плавильном пространстве плазменной установки при плавке с различными скоростями подачи заготовки: 2 (1), 4 (2) и 7 (3) мм/мин

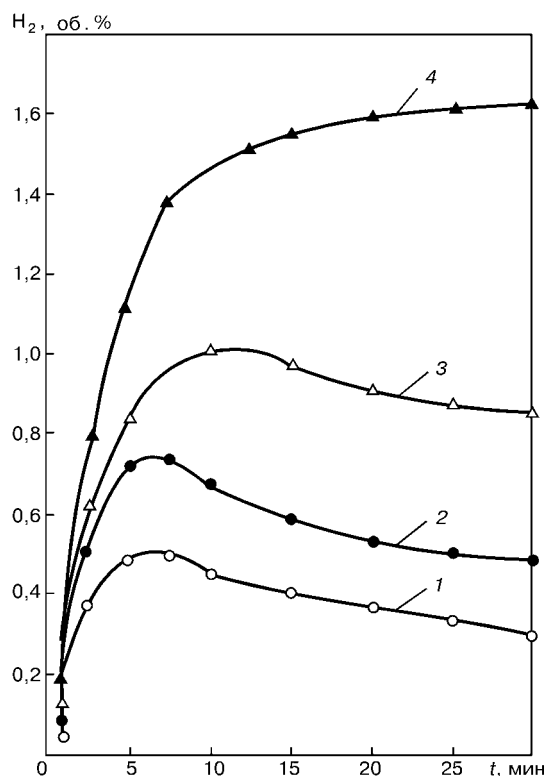


Рис. 6. Зависимость содержания водорода в газовой фазе при плавке прессованной заготовки от изменения токовой нагрузки на плазмотронах: 600 (1), 800 (2), 1200 (3) и 1600 (4) А

газа, т. к. при этом скорость подачи заготовки и подводимая мощность остаются постоянными.

На рис. 4 представлены кривые, характеризующие поведение водорода в процессе плавки прессованной заготовки при изменении расхода плазмообразующего газа. Скорость подачи заготовки в этом случае составляла 2 мм/мин, ток на каждом из двух плазмотронов — 300 А. Из рисунка видно, что при увеличении расхода плазмообразующего газа от 10 до 40 л/мин содержание водорода в газовой фазе снижается от 1,0 до 0,5 об. %.

В ходе проведения опытных плавки исследовали поведение водорода при различных скоростях подачи прессованной заготовки в зону плавления. На рис. 5 представлены кривые, иллюстрирующие поведение водорода при линейной скорости перемещения заготовки 2...7 мм/мин с сохранением постоянным расхода плазмообразующего газа. Из рисунка видно, что с повышением скорости плавки максимальное содержание водорода в атмосфере печи возрастает от 0,48 до 1,60 об. %. При этом темпы снижения содержания водорода в газовой атмосфере после достижения максимума замедляются по мере увеличения скорости подачи заготовки.

Аналогичный характер поведения водорода отмечен при плавке прессованной заготовки со скоростью ее подачи 2 мм/мин с расходом газа на плазмотроне 5 л/мин и изменением тока от 300 до 400 А на каждом из 4-х плазмотронов. Полученные данные представлены на рис. 6. Из рисунка видно, что с увеличением подводимой мощности максимальное содержание водорода возрастает от 0,35 до

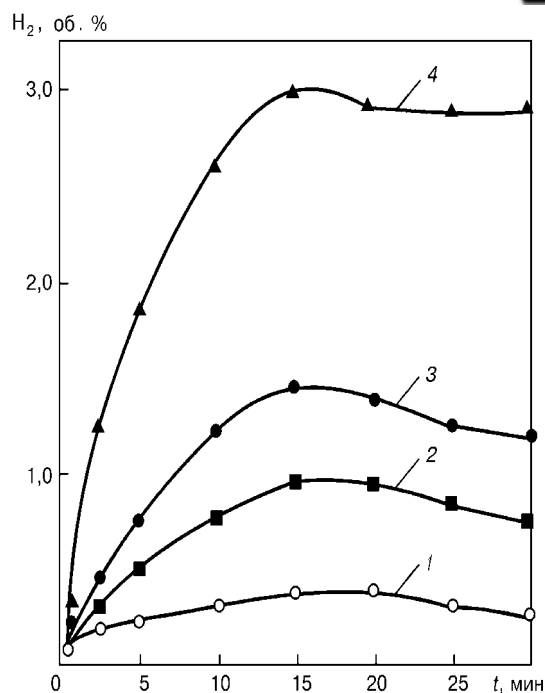


Рис. 7. Изменение содержания водорода в газовой атмосфере печи при переплаве заготовки, извлеченной из упаковки в день плавки (1), и после хранения в течение 1 (2), 2 (3) и 4 (4) суток

0,80 об. % и затем постепенно уменьшается. Увеличение содержания водорода в данном случае можно объяснить усиленным воздействием более мощных дуг на стенки камеры и переплавляемую заготовку, что интенсифицирует процессы испарения влаги и ее взаимодействия с расплавленным титаном.

Затем нами было исследовано поведение водорода при плавке расходуемого электрода с различными сроками хранения на открытом воздухе. Плавки проводили при скорости подачи заготовки 2 мм/мин, токе 300 А на каждом из 4-х плазмотронов и расходе аргона 4,5 л/мин.

Как показывают кривые поведения водорода при переплаве заготовки, хранящейся на открытом воздухе от одних до четырех суток (рис. 7), максимальное количество водорода возрастает от 0,2 об. % при проведении плавки в день извлечения электрода из герметичной упаковки до 3,0 об. % при его хранении до 4-х суток.

При определении содержания водорода в отлитых пробах установлено, что его концентрация в металле колеблется от 0,01 до 0,0198 вес. % и в соответствии с законом Сивертса зависит от парциального давления водорода в зоне плавки, но превышает равновесное. Это подтверждает ранее полученные результаты [6].

Анализ результатов опытных плавки подтверждает также, что единственным и эффективным технологическим приемом, который приводит к снижению содержания водорода в отлитом металле, является количество подаваемого чистого аргона в плавильную камеру.

Измерения количества влаги в составе отработанного плазмообразующего газа показали, что при переплаве отпрессованной заготовки из губчатого



титана ТГ100 ее максимальное содержание в атмосфере печи возрастает от 30 до 60 млн<sup>-1</sup> при увеличении тока на плазматронах от 600 до 1600 А. Аналогичные зависимости получены при переплаве прессованных заготовок со сроками хранения 1... 4 суток. При изменении скорости перемещения прессованной заготовки в зону плавки от 2 до 7 мм/мин максимальное содержание влаги возрастает в пределах 32... 53 млн<sup>-1</sup>.

Анализ поведения микропримесей влаги при плазменной плавке показал, что самым эффективным способом уменьшения количества влаги, как и водорода, является подача большого количества чистого плазмообразующего газа.

1. Плавка и литье титановых сплавов / А. Л. Андреев, Н. Ф. Аношкин, К. М. Борзцовская и др. — М.: Металлургия, 1978. — 383 с.

2. Лакомский В. И. Плазменно-дуговой переплав. — Киев: Техника, 1974. — 383 с.
3. Мовчан Б. А., Тихоновский А. Л., Курапов Ю. А. Электронно-лучевая плавка и рафинирование металлов и сплавов. — Киев: Наук. думка, 1973. — 237 с.
4. Клайтес П. Дж. Индукционно-шлаковый переплав // Вакуумная металлургия. — М.: Металлургия, 1973. — С. 93–103.
5. Применение плазменно-дуговой технологии при выплавке слитков титана из отходов титанового производства / Ю. В. Латаш, В. С. Константинов, П. Н. Галкин и др. // Пробл. спец. электрометаллургии. — 1985. — № 3. — С. 65–70.
6. Григоренко Г. М., Константинов В. С. Взаимодействие водорода с жидким титаном при плазменной плавке // Там же. — 1979. — № 8. — С. 97–101.

Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, Киев  
КП «Запорожский титано-магниеый комбинат»

Поступила 14.10.2004

УДК 669.187.58:002.5

## ПРИМЕНЕНИЕ ДОННОГО СЛИВА ПРИ ПЛАЗМЕННО-ДУГОВОЙ ГАРНИСАЖНОЙ ПЛАВКЕ

В. А. Шаповалов, Ю. А. Никитенко, В. Р. Бурнашев

В статье рассмотрены возможности применения донной разливки металла при использовании огнеупорных керамических материалов и плазменно-дуговой плавке в медном водоохлаждаемом тигле, а также защиты медного тигля от воздействия прямого плазменного потока.

The article describes feasibility of application of a bottom pouring of metal in use of refractory ceramic materials and plasma-arc melting in a copper water-cooled crucible, and also protection of copper crucible from the action of direct plasma flow.

**Ключевые слова:** огнеупоры; плазменно-дуговая плавка; гарнисаж; медный водоохлаждаемый тигель; аморфные и микрокристаллические металлы

В современной металлургии существует множество способов разливки сталей и специальных сплавов, одним из которых является донный слив. К основным недостаткам этого способа следует отнести применение затворного устройства, значительно усложняющего конструкцию и эксплуатацию печи. Преимущество донного слива по сравнению, например, с разливкой с наклоном емкости или с промежуточной емкостью, заключается в разливке металла из центра жидкой ванны, что способствует снижению содержания неметаллических включений в отливке, т. к. при переливе металла через край плавильной емкости возможно запутывание некоторого количества шлака и оксидных плен в жидком металле, приводящее к неоднородности слитков и разного типа дефектам.

В настоящей работе донную разливку металла на барабан-холодильник применили для получения тонких лент с аморфной и микрокристаллической структурой (метод спиннингования) с целью умень-

шения расстояния от расплава до барабана-холодильника до минимального. Такая технологическая схема позволяет исключить образование кристаллических зародышей в расплаве и улучшить условия аморфизации. Расположение разливочного сопла в нижней части жидкой ванны обеспечивает непрерывность подачи расплава под избыточным давлением газа и собственной силы тяжести и, следовательно, неразрывность потока. Толщина ленты, а также свойства продукции во многом зависят от жесткости конструкции и величины зазора между разливочным соплом и барабаном-холодильником [1]. Собственно процесс спиннингования заключается в расплавлении металла, «продавливании» его под избыточным давлением инертного газа через формообразующую щель на барабан-холодильник и сверхбыстрой закалке. В мировой практике [2, 3] для получения такого типа продукции применяют тонкостенную ампулу из огнеупорной керамики, чаще всего кварца, помещенную в электромагнитное поле индуктора.

Материалы, с которыми соприкасаются жидкие металлы в плавильной емкости, можно разделить на оксидные, карбидные и металлические.