



ТИТАН. ПРОБЛЕМЫ ПРОИЗВОДСТВА. ПЕРСПЕКТИВЫ. Аналитический обзор. Часть 3*

К. А. Цыкуленко

Кратко рассмотрены различные способы индукционного и электронно-лучевого переплавов титана, а также существующие трудности производства титановых слитков этими способами. Показаны возможные пути снижения стоимости титановой продукции, а также роль и перспективы Украины в мировой титановой промышленности.

Various methods of induction and electron beam titanium remelting, and also existing difficulties in manufacturing titanium ingots by such methods are briefly considered. Possible ways of reducing cost of titanium production, and also a role and prospects of Ukraine in the world titanium industry are shown.

Ключевые слова: *способы индукционного и электронно-лучевого переплавов; факторы снижения стоимости титановой продукции; возможная роль и перспективы Украины в мировой титановой промышленности*

Использование различных электродов при выплавке слитков вызывает проблемы, связанные с их изготовлением, стойкостью и пр. Отказаться от применения как расходующихся, так и нерасходующихся электродов позволяют различные способы индукционного и электронно-лучевого переплавов.

При плавке в индукционной печи нагрев и расплавление металла происходят в результате наведения в шихте переменной электродвижущей силы и создания вихревых токов, которые преобразуются в теплоту, непосредственно выделяющуюся в металле. Расплавленный металл интенсивно перемешивается вследствие возникающих в нем электродинамических сил. Поэтому во всей массе расплава поддерживается требуемая температура при наименьшем угаре, по сравнению с различными способами дуговой и электронно-лучевой плавки.

Важнейшее достоинство индукционных печей, обусловленное генерацией тепла внутри расплавленного металла, становится недостатком в случае использования их для рафинирующей плавки. Шлаки со сравнительно низкой электропроводностью нагреваются в индукционных печах от расплавленного металла, что затрудняет проведение процессов рафинирования металла. Это обуславливает использование индукционных плавильных печей преимущественно в литейных цехах.

Вакуумно-индукционные печи используются в основном для плавления шихты, защиты расплава

от влияния атмосферы, доведения его до кондиции (в общем случае при неизменной площади межфазной поверхности изменение содержания примесей в расплаве пропорционально продолжительности выдержки в вакууме), а также для разливки металлов и сплавов в вакууме.

Вакуумно-индукционная плавка, наряду с другими способами, используется при производстве титановых слитков [1]. Помимо трехкратного ВДП расходующего электрода, возможно применение таких схем с участием вакуумно-индукционной плавки, как ВИП + ЭШП + ВДП или ВИП + ВДП + ЭЛП. Здесь вакуумно-индукционная плавка является процессом, применяемым для предварительного рафинирования металла и компактирования шихтовых материалов в расходующий электрод, имеющий максимальную химическую однородность для последующих переплавов «квазиравновесными» процессами — ВДП, ЭШП, ЭЛП.

Конструкции вакуумных индукционных печей проще, чем вакуумных дуговых [2, 3]. Как правило, в кожухе вакуумно-индукционной печи имеются камера с плавильным индуктором и тиглем, механизм его поворота и разливочная камера, в которой расположена одна или несколько изложниц. Из-за взаимодействия металла с материалом футеровки плавильного тигля продолжительность выдержки расплава при ВИП ограничиваются несколькими минутами. Взаимодействие выплавляемого металла с материалом тигля при ВИП больше, чем при открытой индукционной плавке [4]. В процессах индукционной плавки требования, предъявляемые к материа-

* Части 1, 2 см. в № 1, 2, 2007 г.



ду тигля, практически те же, что и в процессах гарнисажной плавки.

Потребность в полностью химически инертной емкости для плавки активных металлов, в частности титана, способствовала развитию вакуумно-дугового, электрошлакового, электронно-лучевого и плазменно-дугового процессов переплава в медных водоохлаждаемых кристаллизаторах. Не стал исключением и индукционный способ.

Ещё в 1920-х гг. была предложена конструкция индукционной печи с охлаждаемым тиглем из электропроводного металла. Впоследствии такие емкости стали называть холодными тиглями [5]. Для возможности передавать энергию от индуктора к расплаву стенку охлаждаемого тигля выполняли в виде отдельных охлаждаемых секций, электрически изолированных друг от друга. Жидкий металл из холодного тигля сливали в изложницы или формы.

Развитие процессов получения слитков в холодных тиглях с использованием индукционного нагрева описано в работе [6]. Здесь пришли к выводу о принципиальной возможности и перспективности применения процесса переплава титановых отходов в секционном кристаллизаторе.

Индукционный переплав в секционном кристаллизаторе имеет свои особенности. В отличие от вакуумно-индукционной и индукционной плавки в обычных или холодных тиглях, когда слиток получают путем заливки всей накопленной массы металла в изложницу или форму, при переплаве в секционном кристаллизаторе, как и во всех других видах переплава в водоохлаждаемом кристаллизаторе, происходит процесс одновременного плавления подаваемого металла и кристаллизации полученного расплава. Слиток может формироваться путем относительного перемещения индуктора и секционного кристаллизатора. Металлическая ванна в последнем из-за влияния электромагнитных сил, отжатия ее верхней части от стенок кристаллизатора приобретает форму купола. Переплаву в таком кристаллизаторе могут подвергаться как расходные заготовки, так и различные кусковые и сыпучие материалы. Процесс может происходить под слоем шлака, а также в инертных газах или в вакууме.

В первых конструкциях индукционных секционных кристаллизаторов не предусмотрено каких-либо особых мер по изоляции секций друг от друга. В промежутки между секциями индукционного кристаллизатора помещали глиноземистые изолирующие колпачки для термопар, являющиеся и уплотнителями, предотвращающими выливание расплава через промежутки между сегментами [7]. Подобные конструкции не позволяли выплавлять титановые слитки сколь-нибудь существенного диаметра.

Увеличение мощности установки и диаметра кристаллизатора от 63,5 до 355,6 мм приводило к постоянным авариям из-за возникновения дуговых разрядов в промежутках между секциями кристаллизатора и закорачиванием последних расплавленным металлом, что показало невозможность ведения

процесса без надежной изоляции секций друг от друга. Опыт электрошлакового переплава, при котором слиток формируется в тонкой корочке шлакового гарнисажа, обусловил применение для этой цели шлака, что позволило избежать указанных проблем. Жидкий шлак заполнял промежутки между секциями и, закристаллизовавшись, служил надежной изоляцией секций и металла формируемого слитка.

Индукционно-шлаковый переплав нашел применение при выплавке титановых слитков небольшого диаметра. Необходимо отметить, что наличие шлака не позволяет производить переплав при пониженном давлении. При давлении менее 75 мм рт. ст. зафиксировано сильное испарение шлака, поэтому удаление водорода при этом способе переплава происходит менее эффективно, чем при ВИП или ВДП. Кроме того, при индукционно-шлаковом переплаве нецелесообразно использовать схемы с вытягиванием слитка из кристаллизатора [5]. При перемещении слитка относительно стенки кристаллизатора возможен разрыв шлаковой корочки, в результате чего происходит замыкание секций жидким металлом.

Современные конструкции секционных кристаллизаторов предусматривают изоляцию секций слоем стеклоткани. Кроме того, стеклотканью покрывают и наружную поверхность гильзы кристаллизатора, что придает ему дополнительную жесткость и изолирует гильзу от индуктора. Предотвращения пробоев между секциями вследствие замыкания их расплавом переплавляемого металла достигают путем использования согласующих высокочастотных трансформаторов, поддержания на индукторе пониженного (80... 100 В) напряжения и применения большого количества секций. Если в конструкции кристаллизатора, описанной в работе [7], таких секций всего четыре, то в современных секционных кристаллизаторах их может быть 15, 20 и более [7]. В случае увеличения количества секций существенно (на порядок) снижается напряжение между ними. Кроме того, процесс ведут таким образом, чтобы фронт кристаллизации расплава находился у нижнего витка индуктора. Расплавленный металл, находящийся выше этого уровня, отжимается от стенок кристаллизатора и не контактирует с ними, образует «купол», а формирующийся слиток находится уже за пределами области влияния индуктора и не представляет опасности с точки зрения пробоя между отдельными секциями за счет закорачивания их металлом слитка при напряжении 4... 5 В. Такой подход позволяет отказаться от применения шлака в качестве изолятора и использовать возможность работы при пониженном давлении или в защитных газах. Из-за характерного «купола» площадь зеркала металлической ванны при индукционном переплаве в секционном кристаллизаторе превышает сечение выплавляемого слитка, т. е. металлическая ванна имеет развитую поверхность. Интенсивное перемешивание расплава и развитая поверхность



металлической ванны способствуют интенсификации процесса дегазации расплава.

Что касается возможности индукционного переплава титана в секционном кристаллизаторе, то переплав расходуемых электродов, прессованных из титановой губки, прекращен ввиду явного преимущества технологии с применением сыпучей титановой губки при ее подаче в кристаллизатор сбоку. Перспективным направлением считают переплав различных отходов — стружки, обрезки, пришедших в негодность деталей, например фланцев литейной оснастки машин центробежного литья [6], а также газонасыщенной титановой губки [8, 9].

Способом индукционного переплава в секционном кристаллизаторе получают, как правило, слитки малого и среднего диаметра (до 300... 350 мм). Производство более крупных слитков нецелесообразно из-за необходимости использовать мощные генераторы, питающие установки индукционного переплава. И если применение таких генераторов при ВИП, когда емкость печи составляет десятки тонн, а плавление металла осуществляется за сравнительно короткий промежуток времени, оправдано, то при переплаве в секционном кристаллизаторе в случае формирования слитка при скоростях не более нескольких миллиметров в минуту увеличение мощности генератора сверх определенного значения становится экономически невыгодным.

Крупные титановые слитки могут быть получены способом электронно-лучевого переплава, в процессе которого нагрев и плавление металла происходят, как и при ВИП, в результате генерации теплоты непосредственно в самом переплавляемом металле, только в этом случае — за счет обработки поверхности потоком электронов, кинетическая энергия которых при столкновении с поверхностью облучаемого материала превращается в тепловую энергию движения частиц.

Поток электронов получают вследствие эффекта термоэлектронной эмиссии нагретого катода. Как правило, материалом катода электронно-лучевой пушки служит вольфрам или тантал. Для придания электронам необходимой кинетической энергии применяют ускоряющее напряжение от нескольких киловатт до нескольких десятков киловатт (чем выше напряжение, тем больше энергия электронов). При этом положительный вывод высоковольтного источника питания электрически соединяют либо с облучаемым материалом, либо с неплавящимся охлаждаемым анодом.

Для эффективного использования полученного потока электронов (электронного луча) требуется высокий вакуум, поскольку из-за малой массы электронов их поток при столкновении с другими частицами по пути к облучаемому материалу рассеивается. В ходе столкновения электронов с молекулами остаточных газов часть энергии теряется, при этом происходят процессы ионизации и рекомбинации частиц, создающие видимое излучение. Путь луча становится видимым.

Взаимодействие электронов с ионизированным газом способствует дополнительному рассеиванию луча. На всё это уходит 1... 15 % энергии луча. Более значительные (от 6 до 25 %) потери энергии происходят при непосредственном столкновении электронов с поверхностью металла, и обусловлены они отражением части электронов луча от поверхности металла, а также возникновением вторичной электронной эмиссии и рентгеновского излучения [10].

Мощность рентгеновского излучения при ЭЛП невелика (несколько долей процента от мощности установки), однако его биологическое воздействие представляет серьезную опасность для обслуживающего персонала. Поэтому диапазон значений ускоряющего напряжения ограничивают 35... 40 кВ. Толщину стальных стенок установки выбирают с учетом надежного экранирования персонала от облучения (как правило, 10... 15 мм).

При ускоряющих напряжениях до 40 кВ глубина проникновения электронов в металлы не превышает нескольких микрометров. Однако из-за высокой плотности энергии электронного луча (на три порядка выше, чем у электрической дуги) облучаемый металл не только плавится, но и интенсивно испаряется, в результате чего на пути луча образуется тонкий канал глубиной, в тысячи раз превышающей глубину диффузии электрона.

При электронно-лучевой плавке и переплаве металлов такой эффект вреден. Поэтому для рассредоточения энергии электронного луча по всей обрабатываемой поверхности используют электромагнитные системы, отклоняющие луч по заданной программе и обеспечивающие необходимую траекторию движения пятна нагрева. Для равномерного нагрева поверхности и обеспечения минимального угара необходимо сканировать луч с частотой более 50, а иногда и более 100 Гц [11, 12]. При этом перегрев поверхности металлической ванны примерно на 100... 150 °С выше, чем при ВДП [10].

Известны две принципиально различные системы электронных пушек для плавки металлов: без ускоряющего анода (с кольцевым катодом) или с ним. При плавке электронными пушками без ускоряющего анода, когда напряжение прикладывается между катодом и нагреваемым материалом, электронный луч формируется в пространстве, непосредственно примыкающем к нагреваемой поверхности. Это позволяет получать мощный электронный луч при относительно низком ускоряющем напряжении. Низкие значения ускоряющего напряжения (несколько киловатт) определяют более низкий уровень рентгеновского излучения и стоимость источника питания. Электронно-лучевые пушки без ускоряющего анода просты в конструкции и легки в обслуживании. В пушках такого типа расстояние между катодом и оплаиваемой поверхностью заготовки или поверхностью металлической ванны в кристаллизаторе должно быть сравнительно небольшим и соответствовать ускоряющему напряжению.



Близкое расположение катодного узла к поверхности переплавляемого металла приводит к попаданию на катод и фокусирующий электрод паров и брызг расплавленного металла [10, 11]. Наличие электрического поля в области плавки влечет за собой усиленную ионную бомбардировку катодного узла и зачастую возникновение тлеющих разрядов. В результате нарушается стабильность процесса, а срок службы катода обычно не превышает нескольких часов.

Общая для формирования луча и вакуумной обработки расплава камера обуславливает необходимость поддерживать в ней существенно более низкие значения остаточного давления газопаровой фазы, чем это необходимо при проведении процессов дегазации и дисциплины расплава. Для обеспечения устойчивой работы электронно-лучевых пушек нельзя допускать даже на относительно небольшое время повышения давления в камере свыше $1 \cdot 10^{-4}$ мм рт.ст. [11]. Поэтому неизменным атрибутом ЭЛП является высокопроизводительная вакуумная система, состоящая из множества вентиляей, затворов, насосов различных типов (диффузионных, бустерных и форвакуумных). При увеличении мощности электронно-лучевых пушек и производительности плавильной установки резко возрастают требования к производительности вакуумной системы. Важным показателем здесь является отношение скорости откачки диффузионных насосов установки к её мощности. Для установок различных типов это отношение составляет 50... 200 л/с·кВт.

Уменьшить нагрузку на вакуумную систему позволяет использование более совершенной системы пушек с ускоряющим анодом, что дает возможность применить так называемую систему дифференциальной откачки, при которой вакуумирование небольшого пространства до ускоряющего анода и собственно самой плавильной камеры (после анода) осуществляется раздельно. Уровни давления в плавильной камере и камере, где расположен катод, могут различаться на 2–3 порядка [12].

В установках с дифференциальной откачкой для эффективного использования полученного электронного луча и вакуумной обработки расплава давление в плавильной камере может быть существенно выше, чем в установках без ускоряющего анода, однако и здесь оно не должно превышать $1 \cdot 10^{-2}$ мм рт.ст.

Электронно-лучевые пушки с ускоряющим анодом могут быть удалены на значительное расстояние от плавящегося металла (обычно на 800... 1500 мм). Это способствует уменьшению количества паров и брызг жидкого металла, попадающих на катодный узел. Отсутствие электрического поля в зоне плавки, значительное снижение влияния внезапных газовыделений на работу системы катод–анод существенно уменьшает вероятность возникновения тлеющего разряда. В результате срок службы катода таких пушек составляет 100 ч и более [11].

В заанодном пространстве можно легко управлять электронным лучом с помощью электромагнит-

ных полей (фокусировать, отклонять, перемещать по заданной программе) и таким образом обеспечивать требуемые условия нагрева. Различают три разновидности электронно-лучевых пушек с ускоряющим анодом: кольцевые, аксиальные и плоско-лучевые. Их принципиальное отличие заключается в форме генерируемого луча. Электромагнитные системы таких пушек при направлении электронного луча на металл отклоняют его на угол 45, 60, а иногда и до 180... 270°. Это дает возможность располагать пушки сбоку и даже снизу от нагреваемой поверхности, защищая катодный узел от паров и брызг металла. Отметим, что аксиальные и плоско-лучевые электронные пушки как самые совершенные агрегаты позволяют в наибольшей степени реализовать принцип независимости источника теплоты, который коренным образом отличает ЭЛП от ВДП.

С помощью независимого источника теплоты можно регулировать продолжительность пребывания расплава в жидком состоянии, что сказывается на эффективности его рафинирования. Кроме того, при ЭЛП расплав подвергается воздействию более глубокого вакуума и повышенной температуры, чем при ВДП. Большая глубина откачки плавильного пространства печи при ЭЛП улучшает условия протекания процессов дегазации, дисциплины и диссоциации неметаллических включений. Увеличение температуры расплава существенно влияет преимущественно на процессы испарения элементов. Однако перегрев и длительная выдержка расплава наряду с удалением вредных примесей приводят к потерям металла (основы и легирующих элементов). Зависимость этих потерь от мощности электронно-лучевой установки и удельных затрат электроэнергии является практически линейной [10].

Электронно-лучевая плавка титановой губки не оказывает существенного влияния на содержание основных примесей [11]. Концентрация кислорода и азота находится на уровне исходного металла [12]. Это связано с высокой упругостью пара титана и термодинамической стабильностью его оксидов. Исключение составляет водород, массовая доля которого при ЭЛП снижается в 3... 6 раз, т.е. заметно больше, чем при ВДП. Как следствие, ударная вязкость металла ЭЛП примерно в 2 раза выше, чем металла ВДП. При плавке титановых сплавов происходит значительное снижение содержания легирующих компонентов с более высокой упругостью пара, чем у титана, например, марганца, алюминия, хрома и др., особенно при плавке кусковой шихты. Прежде всего это касается алюминия, поскольку он является легирующим элементом практически всех титановых сплавов. Потери на испарение можно уменьшить путем применения вместо шихты расходуемой заготовки или добавления при плавке соответствующих лигатур.

Интенсификации процессов рафинирования титана от азота и кислорода способствует увеличение приведенной поверхности реагирования, что осуществлено в схемах переплава с промежуточной ем-



костью. Использование последней предусматривает более длительное пребывание расплава в жидком состоянии, при этом происходят усреднение химического состава; удаление тугоплавких включений из расплава за счет их осаждения на дно емкости; всплывание неметаллических включений низкой плотности и их диссоциация под воздействием электронного луча. Кроме того, такая схема позволяет использовать в качестве исходной шихты лом (до 100 %) и губчатый титан несколько худшего качества, а также выплавлять слитки-слябы [13, 14] и полые слитки [15].

Использование такого сложного и дорогого процесса, как ЭЛП, должно быть оправдано либо невозможностью производить высококачественный металл другими способами, либо получением преимуществ при переделе [10]. Как видим, для производства титана существует много других способов, помимо ЭЛП, однако в настоящее время последний показал свою эффективность при переработке титанового скрапа и получении вторичного титана [12]. Возможность отказаться от применения расходных электродов (что потребовало бы создания соответствующего производства) предопределило главенствующую роль этого процесса в титановой промышленности Украины.

Сравнительная характеристика показателей и качественная оценка различных способов плавки и переплава металлов и сплавов, приведенные в работе [4], показали, что самыми производительными являются вакуумно-индукционная и плазменно-дуговая гарнисажная плавки (до 5,0 т/ч); наименее производительными — плазменно-дуговой и электронно-лучевой переплавы (до 1,2 т/ч), электрошлаковый и вакуумно-дуговой переплавы имеют промежуточное значение (до 2 т/ч). С точки зрения энергоемкости самым экономичным является процесс вакуумно-дугового переплава (около 1 кВт·ч/кг), а вакуумная индукционная плавка наиболее энергоемка (около 4 кВт·ч/кг). Эффект испарения компонентов расплава зафиксирован во всех процессах, использующих вакуумирование, причем интенсивность испарения повышается по цепочке ВИП–ВДП–ЭЛП.

Выбор того или иного процесса для производства титановых слитков весьма индивидуален и зависит от множества факторов (сложившейся инфраструктуры сопутствующих производств; требований к качеству металла; предназначения последнего, требуемого объема его производства и пр.).

Снижение стоимости титановой продукции и более широкое использование титана в промышленности может происходить за счет следующих факторов:

совершенствования и разработки новых технологических процессов передела титана (новых, дешевых способов получения титановой губки и переработки газонасыщенной с повышенным содержанием техногенных примесей губки, новые способы плавки и переплава);

организационно-технологических мероприятий, связанных с объединением различных технологических переделов, организацией вертикально интегрированного производства, а также с вовлечением в переработку различных отходов титановой промышленности;

соответствующего качества металла и предназначения.

Ярким примером может служить создание в России крупной титановой компании «ВСМПО-Ависма». Объединение двух стадий металлургического передела позволило снизить себестоимость продукции на 10... 12 % [16]. Компания «ВСМПО-Ависма» и «Boeing» в 2006 г. объявили об организации совместного предприятия, которое будет осуществлять механическую обработку штампованных изделий из титана для последующего применения на пассажирских самолетах «Boeing» [17]. Отходы производства (титановая стружка) будут возвращаться на «ВСМПО-Ависма» для последующей переработки и вовлечения в производственный цикл.

Для обеспечения требуемых свойств содержание примесей в титане и его сплавах ограничивают. Так, массовая доля кислорода в деформируемых титановых сплавах не превышает 0,30, азота 0,15, водорода 0,015 %. Наиболее газонасыщенным является сплав ВТ1-2 (общее содержание этих примесей составляет 0,46 %), предназначенный для изготовления различных прутков. Из-за высокого содержания примесей этот сплав имеет примерно в 2 раза более высокое значение временного сопротивления, чем подобные ему сплавы ВТ1-00 и ВТ1-0 (технический титан). В последнее время потребителям иногда требуется поставлять слитки титановых сплавов с повышенным содержанием кислорода, т. е. с несколько увеличенной за счет этого прочностью сплава (рисунок).

По-видимому, и производители, и потребители титана уже стали понимать необходимость компромисса между чистотой сплава и его предназначением, а, следовательно, способом производства и стоимостью. Высокая стоимость титановой продукции при низкой исходного сырья определяется затратами переделов. И, вероятно, в некоторых случаях нет необходимости на ранних стадиях производства добиваться высокой чистоты металла, затрачивая при этом немалые ресурсы, а потом в готовом сплаве получать повышенное содержание тех или других примесей. Целесообразнее выстроить технологическую цепочку таким образом, чтобы сразу с минимальными затратами достигать требуемого качества металла, например с повышенным содержанием кислорода.

Подобная ситуация сложилась в производстве стали, когда с появлением доменной печи и бессемеровского конвертера закончилась тысячелетняя эпоха «чистой» стали. Замена древесного угля коксом привела к загрязнению чугуна, а значит, и получаемой из него стали серой, продувка жидкого металла воздухом вызвала загрязнение его ещё и азо-



том [20]. Придавать требуемые свойства «грязной» стали научились при помощи различных легирующих добавок, поскольку потребителя интересует не состав получаемого сплава, а его свойства. Содержание вредных примесей в сталях, как и в титановых сплавах, ограничивают. Так, например, для обеспечения высокой надежности и долговечности шарикоподшипников содержание серы в стали, из которой их изготавливают, довели до десятитысячных долей процента. Стоило это недешево. Однако оказалось, что важно само по себе не содержание серы в стали, а соотношение в металле кислорода и серы.

Металлургия титана, по сравнению с металлургией стали, ещё очень молода и, возможно, в будущем появятся дешёвые титановые сплавы, в которых негативное влияние повышенного содержания примесей будет скомпенсировано соответствующей системой легирования. По-видимому, легирующие металлы, содержащиеся в титановых сплавах ВТЗ, ВТЗ-1 и ВТ4, влияют на их механические свойства в большей мере, чем водород [21]. В настоящее время следует уделять внимание классификации имеющихся и разработке новых титановых сплавов в зависимости от их возможного применения. Конечно, в военной и авиакосмической сфере, как и прежде, требуются сплавы высокой чистоты. Снизить их стоимость можно только за счет новых технологических решений. Но в других областях, например в ювелирном деле, при изготовлении оправ очков, подложек жестких дисков для компьютеров, корпусов часов и т. д., очевидно, не требуется «космическая» чистота сплава, а только высокая удельная прочность или только коррозионная стойкость, или же немагнитность и т. д. Поэтому такие титановые сплавы могут быть изготовлены известными способами по упрощенной техно-

логии (без использования вакуума или из некондиционной губки, отходов и пр.), что позволит заметно снизить их стоимость. Необходимость компромисса между чистотой сплава и его предназначением, потребность в обеспечении минимальной себестоимости, вероятно, и подтолкнули компании «Allegheny Technologies» (США) и «ВСМПО» (Россия) к созданию совместного предприятия UNITI, специализирующегося на выпуске титановых сплавов только гражданского предназначения. UNITI

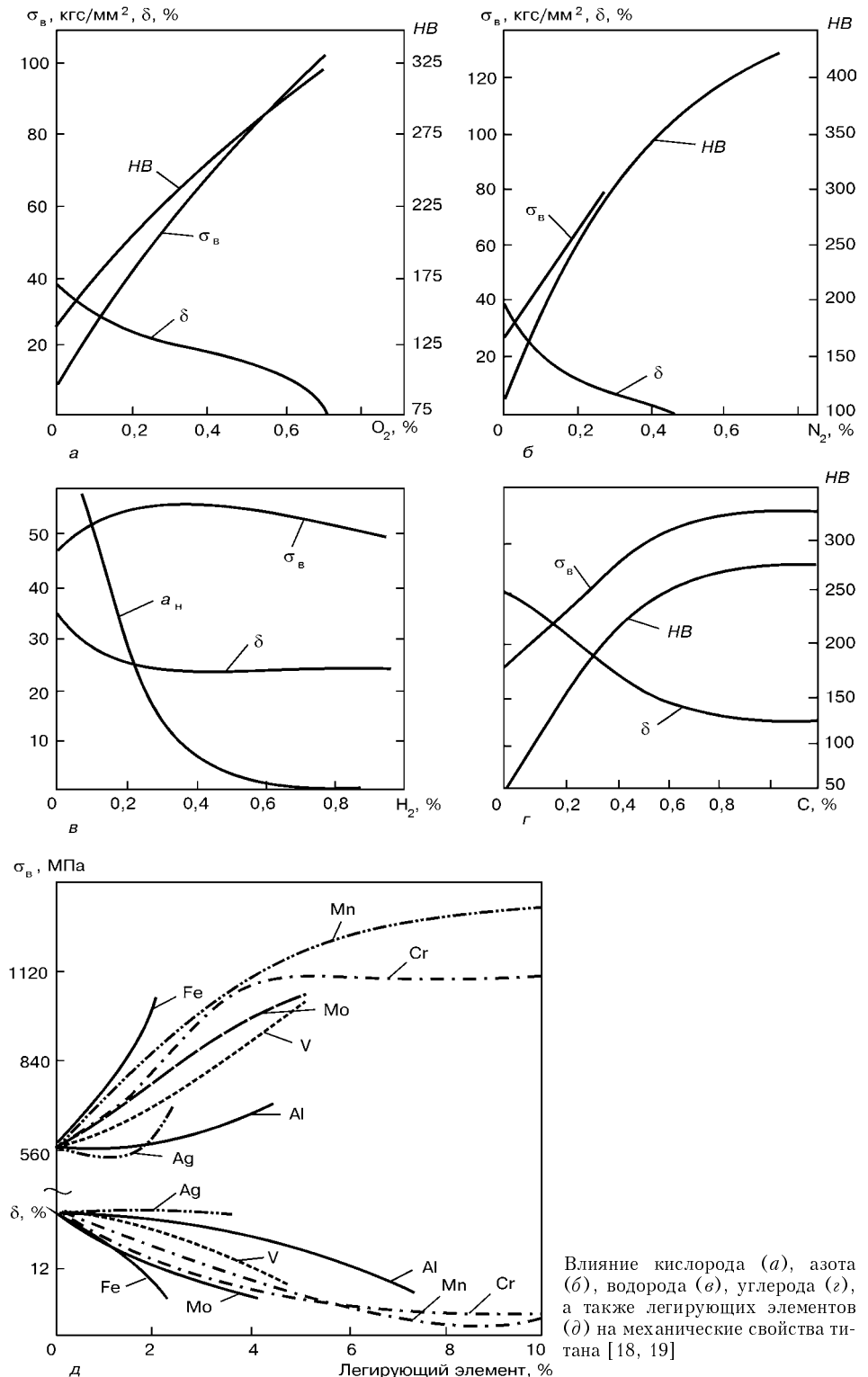




Таблица 1. Химический состав ферротитана согласно ГОСТ 4761-80 (СТ СЭВ 989-89)

Марка	Массовая доля элементов, %										
	Ti	Al	Si	C	P	S	Cu	V	Mo	Zr	Sn
	не менее	не более									
ФТн70С05	68...75	5	0,5	0,2	0,05	0,05	0,2	0,6	0,6	0,6	0,10
ФТн70С08	68...75	4	0,8	0,3	0,03	0,03	0,3	1,8	2,0	1,5	0,15
ФТн70С1	65...75	5	1	0,4	0,05	0,05	0,4	3,0	2,5	2,0	0,15
ФТн35С5	28...40	8	5	0,2	0,04	0,04	2,0	0,4	0,4	0,2	0,04
ФТн35С7	28...40	9	7	0,2	0,07	0,05	2,0	0,8	0,5	0,2	0,05
ФТн35С8	28...40	14	8	0,2	0,07	0,07	3,0	1,0	1,0	0,7	0,08
ФТн30	28...37	8	4	0,12	0,04	0,03	0,4	0,8	0,4	0,2	0,01
ФТн25	20...30	5...25	5...30	1,0	0,08	0,03	—	—	—	—	—

Примечание. Ферротитан марок ФТ и 70С08 содержит дополнительно по 0,8 % марганца и хрома.

будет заниматься развитием рынков титана не авиакосмического и не военного предназначения [22].

Роль Украины и ее перспективы в мировой титановой промышленности. Кроме добычи, производства и поставок титанового сырья (концентратов и губки), Украина начала производить и титановые слитки. Создание производства титановых слитков стало первым шагом на пути к повышению роли Украины в мировой титановой промышленности. В основном это производство основано на электронно-лучевом переплаве, который является весьма дорогим способом. Несмотря на возможность выплавлять этим способом слитки из шихтовых материалов, содержащих до 100 % титановых отходов, такой подход к снижению себестоимости не всегда оправдан. Содержащиеся в шихте примеси кислорода и азота, не удаляемые при ЭЛП, не позволяют получить высококачественный титановый слиток. Наибольшая эффективность этого способа производства слитков может быть достигнута при переработке высококачественной губки для получения титана авиакосмического и военного назначения.

Следующим шагом могло бы стать увеличение объемов производства при одновременном снижении стоимости титановой продукции за счет создания вертикально интегрированной цепочки по производству титана. Однако такие попытки пока

не увенчались успехом и без требуемых инвестиций в ближайшее время на это рассчитывать не приходится. Доля Украины в мировом производстве титановых слитков пока невелика и составляет примерно 1 %. При постепенном увеличении объемов производства потребление титановых слитков в Украине незначительно и в последние годы падает. Полученные слитки в основном идут на экспорт. Поэтому путь снижения стоимости титана в результате организационно-технологических мероприятий, объединения различных технологических переделов пока закрыт.

Уменьшение стоимости титановой продукции за счет использования более дешевых способов производства слитков предусматривает и определенное ухудшение чистоты титанового сплава. Так, электрошлаковый способ, не нашедший практического применения для производства титана и его сплавов в авиакосмической и военной сферах, успешно применяется для получения ферротитана, поскольку требования к ферротитану, предназначенному для раскисления и легирования стали, сплавов и чугунов, а также для производства сварочных материалов, вообще не регламентируют содержание в нем таких вредных примесей, как водород, кислород и азот (табл. 1).

Ферротитан и титановые сплавы для авиакосмической техники занимают две противоположные позиции в линейке чистоты титановых сплавов. Однако между ними возможны определенные компромиссы относительно цены и качества титана для так называемого неответственного назначения, т. е. применяемого в ювелирном деле, при изготовлении оправ очков, подложек жестких дисков для компьютеров, корпусов часов, спортивных изделий и пр. Этот еще мало освоенный сегмент мирового рынка титана может стать для Украины реальным шансом в повышении её роли в мировой титановой промышленности. Имея большие мощности по производству металла ЭШП, украинская промышленность может относительно быстро переориентироваться на выпуск дешевых титановых сплавов неответственного

Таблица 2. Содержание основных примесей в губке и полученных слитках

Объект анализа (условия плавки)	Массовая доля основных примесей, % $\times 10^{-4}$			
	C	N	O	H
Губка (очищенная в вакууме)	91	47	685	47
Слиток ВДП	64	113	713	17
Слиток ЭШП (CaF ₂ химически чистый, гелий, прямая полярность)	108	115	955	22
То же (CaF ₂ неочищенный)	89	63	811	20



назначения. Необходимо ещё раз отметить, что качество титана, полученного способом ЭШП, достаточно высоко. В начале освоения титанового рынка в бывшем СССР, между сторонниками процессов ЭШП и ВДП велась борьба за владение авиационной сферой. Конечно, способ ЭШП практически исключает возможность удаления газов из титана и в этом смысле не может конкурировать ни с одним вакуумным процессом. Однако, как отмечается во многочисленных исследованиях, основным фактором, определяющим чистоту металла слитка ЭШП, является чистота исходного переплавляемого материала (электрода, губки и других шихтовых материалов). Содержание примесей в электрошлаковом титане, в зависимости от применяемого шлака, рода и полярности тока, состава атмосферы переплава, может заметно меняться [23]. Так, минимальное содержание кислорода в электрошлаковом титане достигается при переплаве в застойной атмосфере гелия или при переплаве на токе при обратной полярности; минимальное количество азота — при пониженном давлении или на переменном токе. Кроме того, при использовании в качестве шлака неочищенного фтористого кальция содержание азота в слитке ЭШП даже меньше, чем в слитке ВДП (табл. 2). В зависимости от допустимой загрязненности титана теми или иными примесями можно выбирать соответствующую технологическую схему ЭШП.

Сравнительные исследования качества литого и деформированного титана ЭШП и двойного ВДП показали, что и в литом, и в деформированном состоянии титан ЭШП и ВДП имеет довольно близкие значения механических характеристик. Лишь при использовании в качестве исходного материала высококачественной губки, подвергнутой вакуумной сепарации, титан ЭШП заметно уступает титану ВДП по такому показателю, как ударная вязкость. Именно этот факт и не позволил процессу ЭШП занять свою нишу в титановой промышленности бывшего СССР, где практически вся продукция шла на нужды оборонного комплекса. Однако не во всех случаях необходимы высокие значения вязкостных характеристик титана, например в ювелирном деле они не имеют существенного значения.

С появлением нового оборудования и технологических решений (токоподводящий кристаллизатор, двухконтурная схема переплава, магнитоуправляемая плавка и пр.) возможности ЭШП в целом и ЭШП титана, в частности, расширились. И эти возможности надо максимально эффективно использовать. Для освоения рынка титана неотвеченного назначения, который может потреблять и 45 % титановой продукции, потребуются координация усилий многих специалистов. Это и разработка новых титановых сплавов, соответствующих шлаковых систем, оценка применимости конкретного сплава для той или иной области, разработка соответствующих стандартов и многое другое. Чтобы

двигаться вперед, надо делать шаги в выбранном направлении. Украина, обладая большими сырьевыми ресурсами и средствами производства, постарается занять достойное место в мировой титановой промышленности.

1. Медовар Б. И. Новые разработки в области электрошлаковой технологии // Пробл. спец. электрометаллургии. — 1996. — № 2. С. 3–6.
2. Индукционные печи для плавки металлов и сплавов. — М.: Металлургия, 1968. — 120 с.
3. Целиков А. И. Металлургические машины и агрегаты. — М.: Металлургия, 1997. — 143 с.
4. Металлургия прецизионных сплавов / Ю. А. Грицианов, Б. Н. Путимцев, Б. В. Молотиллов и др. — М.: Металлургия, 1975. — 448 с.
5. Петров Ю. Б., Ратников Д. Г. Холодные тигли. — М.: Металлургия, 1972. — 93 с.
6. Индукционный переплав в секционном кристаллизаторе, возможности и перспективы применения его для переплава титановых отходов / Ю. В. Латаш, И. В. Шейко, В. Н. Бернадский и др. // Пробл. спец. электрометаллургии. — 1986. — № 2. — С. 64–70.
7. Клайтес П. Дж. Индукционно-шлаковый переплав титана // Вакуумная металлургия. — М.: Металлургия, 1973. — С. 93–103.
8. К вопросу о возможности переплава губчатого титана с повышенным содержанием техногенных примесей. Сообщение 1 / М. Л. Жадкевич, Ю. В. Латаш, И. В. Шейко и др. // Пробл. спец. электрометаллургии. — 1997. — № 1. — С. 55–60.
9. К вопросу о возможности переплава губчатого титана с повышенным содержанием техногенных примесей. Сообщение 2 / М. Л. Жадкевич, Ю. В. Латаш, В. С. Константинов и др. // Там же. — 1998. — № 3. — С. 43–45.
10. Латаш Ю. В., Матях В. Н. Современные способы производства слитков особо высокого качества. — Киев: Наук. думка, 1987. — 336 с.
11. Мовчан Б. А., Тихоновский А. Л., Курапов Ю. А. Электронно-лучевая плавка и рафинирование металлов и сплавов. — Киев: Наук. думка, 1973. — 240 с.
12. Электронно-лучевая плавка / Б. Е. Патон, Н. П. Тригуб, Д. А. Козлитин и др. — Киев: Наук. думка, 1997. — 266 с.
13. Некоторые тенденции развития металлургического переплава титана / Б. Е. Патон, Н. П. Тригуб, С. В. Ахонин и др. // Пробл. спец. электрометаллургии. — 1996. — № 1. — С. 25–31.
14. Жук Г. В., Калинюк А. Н., Тригуб Н. П. Производство титановых слитков-слябов методом электронно-лучевой плавки с промежуточной емкостью // Современ. электрометаллургия. — 2004. — № 3. — С. 22–24.
15. Получение полых титановых слитков методом ЭЛПЕ / Патон Б. Е., Тригуб Н. П., Жук Г. В. и др. // Там же. — 2004. — № 3. — С. 18–21.
16. www.infogeo.ru/metals/press/ И. Рубанов. Неладно с титаном // Эксперт. — 14.11.2005.
17. www.vsmpro.ru
18. Гуревич С. М. Справочник по сварке цветных металлов. — Киев: Наук. думка, 1981. — 607 с.
19. Металлы и сплавы. Справочник / Под ред. Ю. П. Солнцева. — СПб: НПО «Профессионал», 2003. — 163 с.
20. Медовар Б. И. Металлургия вчера, сегодня, завтра. — Киев: Наук. думка, 1990. — 192 с.
21. Металлургия титана / В. А. Гармата, Б. С. Гуляницкий, В. Ю. Крамник и др. — М.: Металлургия, 1967. — 643 с.
22. Александров А. В., Прудковский Б. А. Разные грани титана и его сплавов // Титан. — 2003. — № 2. — С. 66–71.
23. Электрошлаковый металл / Под ред. Б. Е. Патона, Б. И. Медовара — Киев: Наук. думка, 1981. — 680 с.

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

Поступила 10.01.2007