



УДК 669.187.826.05

НОВЫЕ КОНСТРУКЦИИ ВАКУУМНЫХ КАМЕР ПЕЧЕЙ ДЛЯ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ ПЛАВКИ

Ю. В. Непорожный, О. Е. Собко-Нестерук, Н. В. Чайка,
В. Н. Васюра, Н. Г. Третьак,
И. Е. Горчинский, Т. И. Дубовая

Рассмотрены новые принципы конструирования вакуумных камер, реализованные при создании электронно-лучевой печи VT02, предназначенной для производства слитков круглого и прямоугольного сечения из титана и титановых сплавов (цилиндрические слитки диаметром 640 и 825 мм, прямоугольные 190×1325, 250×1325, 420×1325 мм длиной до 5,5 м).

Considered are the new principles of designing of vacuum chambers, realized in the development of electron beam furnace VT02, designed for producing ingots of round and rectangular section of titanium and titanium alloys (cylindrical ingots of 640 and 825 mm diameters, rectangular ingots of 190×1325, 250×1325, 420×1325 mm and length of up to 5.5 m).

Ключевые слова: электронно-лучевая печь; вакуумная камера; оболочка; несущая способность; металлоемкость; вакуумная диагностика; вакуумная плотность

Входящие в состав электронно-лучевой печи вакуумные камеры для плавки, вытягивания слитка, загрузки и подачи шихты являются наиболее важными и трудоемкими узлами как в период разработки конструкторской документации, так и в процессе изготовления, испытаний, наладки и монтажа. Конструкторские решения каждой из упомянутых вакуумных камер должны учитывать ряд специфических требований, от которых зависит обеспечение требуемых параметров печи и нормальное функционирование всех узлов, механизмов, энергетического комплекса, систем управления в процессе эксплуатации. При этом также необходимо гарантировать безопасные условия работы обслуживающего персонала в период изготовления, испытаний, наладки, монтажа и эксплуатации.

Среди основных требований, предъявляемых к конструкциям вакуумных камер, можно выделить следующие:

размеры, форму, сечения вакуумных камер следует выбирать из условий рационального размещения механизмов, узлов и удобства их обслуживания, загрузки заданного количества шихты, минимизации откачиваемых объемов;

вакуумные камеры должны характеризоваться необходимыми значениями механической прочности стенок и заданной жесткостью;

конструкция вакуумных камер и толщина их стенок должны соответствовать требованиям биологи-

ческой защиты персонала от воздействия рентгеновского излучения, возникающего при торможении ускоренных электронов в материале расплавляемой заготовки;

вакуумные камеры должны быть безопасными для обслуживающего персонала в случае аварийного отключения электропитания или выхода из строя системы охлаждения и остановки электронно-лучевой печи;

вакуумные камеры необходимо снабжать быстродействующими устройствами надежной герметизации в местах вакуумных разъемов (крышек, дверей);

в конструкцию вакуумных камер следует включить оперативную систему поиска течей для диагностики ответственных вакуумных разъемов (крышек, дверей, плиты электронно-лучевых пушек, вакуумных камер — плавильной и слитка).

Коллективом МК «АНТАРЕС» разработана электронно-лучевая печь VT02 нового поколения с установленной мощностью электронно-лучевых пушек 3,2 МВт, годовой производительностью по титану до 3000 т. В этой разработке реализованы все упомянутые современные требования, предъявляемые к конструкциям вакуумных камер электронно-лучевых печей.

Форма сечений вакуумных камер подачи шихты выбрана прямоугольной формы с размерами 1000×1560 мм, что позволило вписать в него фронты плавления 700×1020 мм, превышающие площади фронтов плавления предшествующих печей примерно в 1,5 раза. Следует также отметить, что данная форма сечения и его размеры дают возможность

© Ю. В. НЕПОРОЖНИЙ, О. Е. СОБКО-НЕСТЕРУК, Н. В. ЧАЙКА, В. Н. ВАСЮРА, Н. Г. ТРЕТЬАК,
И. Е. ГОРЧИНСКИЙ, Т. И. ДУБОВАЯ



Технико-экономические показатели вакуумных камер при различных сечениях их стенок				
Тип сечения	Расчетный элемент стенки вакуумной камеры	Расчетный момент инерции, см ⁴	Максимальный расчетный прогиб, мм	Удельная металлоемкость, т/м ³
П-образное		7560	0,84	1,12
Коробчатое		17515	0,36	0,85

максимально рационально скомпоновать механизм подачи шихты с ходом до 5700 мм и вместимостью шихты до 8 т в каждой вакуумной камере. Вместимость шихты превышает показатели вакуумных камер подачи шихты существующих электронно-лучевых печей до 1,6 раза.

Все вакуумные камеры электронно-лучевой печи характеризуются необходимой механической прочностью стенок и минимальными затратами металла для их изготовления, что достигнуто за счет использования опыта проектирования вакуумных камер установок для электронно-лучевой сварки, где обоснован выбор расчетных параметров сечений стенки и коробчатого сечения силового набора*. Соотношения геометрических параметров, экономических и массовых показателей приводятся в таблице.

Повышенная жесткость стенок камер необходима в случае монтажа на них прецизионных механизмов (подачи шихты, вытягивания слитка). Деформации стенок вакуумных камер под действием атмосферного давления могут быть разными и поэтому смещения (линейные, угловые) элементов механизмов, базирующихся на них, должны соответствовать требованиям к точности их работы. Так, механизмы подачи и вытягивания слитков электронно-лучевой печи ВТ02 могут стабильно работать при максимальных деформациях до 0,8 мм на длине ходов толкателей шихты и траверсы поддона, равной 6550 мм.

Толщина стенок вакуумных камер должна соответствовать требованиям биологической защиты персонала, согласно нормам радиационной безопасности (НРБ) от воздействия рентгеновского излучения, возникающего при торможении ускоренных электронов на поверхности обогрева. В вакуумных камерах электронно-лучевой печи ВТ02 выбрана

суммарная толщина стенок, равная 22...24 мм, что соответствует нормам НРБ при ускоряющем напряжении на катоде электронно-лучевых пушек, достигающем 50 кВ.

В случае отключения электропитания и выхода из строя системы охлаждения и остановки электронно-лучевой печи представляет опасность разгерметизация вакуумных разъемов (плиты пушек, крышек вакуумных камер подачи шихты, вакуумной камеры плавки, всевозможных патрубков вакуумной системы) вследствие теплового разрушения резиновых и синтетических уплотнений, что может вызвать взрыв паромасляных насосов и возгорание шихты титана или титановых сплавов.

Для предотвращения развития таких нежелательных явлений все стенки вакуумных камер печи ВТ02 имеют большое расстояние между внутренней и внешней оболочками, которое позволяет обеспечить большие объемы, заполненные водой. Объем вакуумных камер печи ВТ02 составляет примерно 14 м³; масса камер — около 36 т.

Проведем оценку температуры охлаждающей воды в случае отказа системы охлаждения. Количество тепла, аккумулированное водой и массой всех камер $Q_{\Sigma(1+2)}$, можно определить из следующего соотношения:

$$Q_{\Sigma(1+2)} = M_1 C_1 \tau_{75^\circ\text{C}} + M_2 C_2 \tau_{75^\circ\text{C}} = 5,65 \cdot 10^9 \text{ Дж},$$

где M_1 — масса воды (14 000 000 г); M_2 — масса камер (36 000 000 г); $\tau_{75^\circ\text{C}}$ — максимально допустимая разница значений температуры воды от 100 °С до начальной на входе в вакуумные камеры 25 °С, которая обеспечивает сохранность уплотнений вакуумных разъемов и их герметичность в момент отключения электропитания и выхода из строя сис-

*Назаренко О. К., Нестеренков В. М., Непорожний Ю. В. Конструирование и электронно-лучевая сварка вакуумных камер // Автомат. сварка. — 2001. — № 6. — С. 50–52.



Рис. 1. Конструкция устройства для перемещения и герметизации технологической двери камеры подачи шихты

темы охлаждения печи; C_1 — средняя теплоемкость воды (4,19 Дж/г); C_2 — средняя теплоемкость стали (0,46 Дж/г).

Значение $Q_{\Sigma(1+2)}$ должно быть равным или немного меньшим (но не более, чем на 10 %, с учетом охлаждения вакуумных камер атмосферой цеха) уровня теплосодержания Q_3 разогретого слитка массой 10 т в момент обесточивания печи или выхода из строя системы охлаждения. Теплосодержание Q_3 разогретого слитка будет следующим:

$$Q_3 = M_3 C_3 \tau_{\text{ср.сл}} = 5,95 \cdot 10^9 \text{ Дж},$$

где M_3 — масса разогретого слитка (10 000 000 г); C_3 — средняя теплоемкость титана и его сплавов (0,7 Дж/г); $\tau_{\text{ср.сл}}$ — среднее значение температуры слитка в момент обесточивания печи или выхода из строя системы охлаждения, равное 850 °С при массе слитка 10 000 000 г. С учетом приведенного расчета и сравнения значений $Q_{\Sigma(1+2)}$ и Q_3 можно заключить, что электронно-лучевая печь ВТ02 безопасна при аварийном отключении электропитания или в случае выхода из строя системы охлаждения.

Следует также отметить, что повышению надежности и безопасности эксплуатации печи ВТ02 способствует применение быстродействующих вакуумных затворов паромасляных вакуумных насосов, время срабатывания которых составляет 1...2 с.

Вакуумные камеры электронно-лучевой печи ВТ02 снабжены устройствами для быстрой и надежной герметизации всех вакуумных разъемов (крышки, плита пушек, двери), связанных с ее загрузкой или обслуживанием механизмов в процессе эксплуатации. Скорость и надежность герметизации достигнуты за счет отказа от традиционных зажимных устройств (прижимных болтов, винтов, маховиков), на использование которых затрачивается много времени. При этом не гарантируется вакуумная плотность сопрягаемых поверхностей. Первоначальный прижим дверей, крышек, плиты пушек реализуется благодаря наличию прижимных роликов,

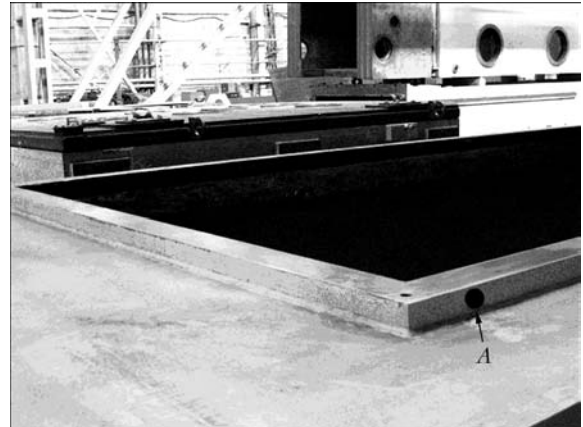


Рис. 2. Конструкция фланца камеры подачи шихты для контроля вакуумной плотности сварных швов; А — отверстие во фланце вакуумной камеры

многофункциональных направляющих, клиньев и подвесок перемещения, обеспечивающих хорошее прилегание сопрягаемых и уплотняемых поверхностей. Окончательный прижим реализуется за счет атмосферного давления в процессе откачки. Примером может служить устройство двери вакуумной камеры подачи шихты (рис. 1).

С целью обеспечения оперативной диагностики ответственные вакуумные разъемы электронно-лучевой печи ВТ02 снабжены системами поиска вакуумных течей. Типичный пример использования этих систем (применительно к вакуумному разъему загрузки в вакуумной камере подачи шихты) изображен на рис. 2, где через отверстие во фланце А вакуумной камеры контролируются все сварные швы от натекания воздуха атмосферы по его периметру.

Реализация новых конструкторских решений, удовлетворяющих указанным требованиям, позволила разработать и изготовить электронно-лучевую печь, существенно отличающуюся от существующих по технико-экономическим показателям.

Так, вакуумные камеры печи ВТ02 имеют меньшую в 1,5 раза металлоемкость (от 90 масса снизилась до 65 т). Соответственно уменьшилась трудоемкость и стоимость их изготовления. Сокращение откачиваемого объема вакуумных камер печи от 95 до 62 м³ позволит уменьшить время достижения рабочего вакуума примерно в 1,5 раза, что даст возможность повысить производительность работы печи в целом.

Следует также отметить, что несмотря на достигнутые уменьшение массы и размеров, производительность электронно-лучевой печи ВТ02 увеличится, в сравнении с ВТ01, от 2500 до 3000 т в год по титану. Тоннаж выплавляемых слитков увеличится от 10 000 до 14 000 кг, длина слитков — от 4,0 до 5,5 м.

МК «АНТАРЕС», Киев
Поступила 26.07.2010