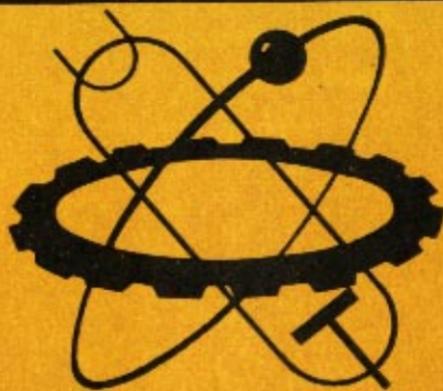


ПРОФТЕХОБРАЗОВАНИЕ

НОВАЯ ТЕХНИКА



Б. Г. Львов
А. С. Шувалов

**СОВРЕМЕННЫЕ
СВЕРХВЫСОКО-
ВАКУУМНЫЕ
УПЛОТНЕНИЯ**

ББК 31.77
Л 89
УДК 621.52

Одобрено Ученым советом
Государственного комитета СССР
по профессионально-техническому образованию
в качестве учебного пособия
для профессионально-технических
учебных заведений

Рецензенты: доктор техн. наук А. Т. Александрова
(Московский институт электронного машиностроения),
канд. техн. наук В. Е. Минайчев

Львов Б. Г., Шувалов А. С.

Л89 Современные сверхвысоковакуумные уплотнения: Учеб. пособие для проф.-техн. учеб. заведений. — М.: Высш. шк., 1984. — 71 с., ил.

10 к.

В книге приведены основные сведения о сверхвысоковакуумных уплотнениях разъемных соединений, применяемых в вакуумном, криогенном, а также химическом оборудовании. Описаны их конструкции, используемые материалы, особенности изготовления, испытания и эксплуатации. Рассмотрены основные факторы, влияющие на работу различных сверхвысоковакуумных уплотнений.

Л 2403000000—356
052(01)—84 42—84

ББК 31.77
6П5.7

ВВЕДЕНИЕ

Основными направлениями экономического и социального развития СССР на 1981—1985 годы и на период до 1990 года предусмотрено дальнейшее совершенствование энергетики, электронной и радиотехники, химии, медицины, легкой и пищевой промышленности и других отраслей народного хозяйства, широко использующих вакуумную технику.

Применение в научных исследованиях и промышленности бурно развивающейся вакуумной техники позволило сделать новый шаг вперед в изучении свойств материалов и обеспечить развитие новых высокоэффективных технологических процессов обработки материалов и сборки изделий.

Современной наукой и промышленностью перед вакуумным машиностроением поставлены задачи получения сверхнизких давлений и формирования требуемого состава остаточной газовой среды при проведении технологических процессов на молекулярном и атомном уровнях. В связи с этим возрастают требования, предъявляемые к вакуумным системам, основными частями которых являются вакуумные насосы, запорно-регулирующая аппаратура, средства измерения вакуума и течения, арматура (клапаны, затворы, натекатели), трубопроводы, а также вакуумные уплотнения — неразъемные соединения и разъемные (фланцевые и клапанные).

Разъемные соединения обеспечивают доступ к внутривакуумным элементам, соединяют требующие периодической разборки вакуумные функциональные устройства и герметично перекрывают вакуумные коммуникаций. От качества разъемных соединений зависят герметичность и функционирование вакуумных систем. Поэтому к ним предъявляют повышенные требования. Конструкция, технология производства и монтажа, а также соблюдение вакуумной гигиены при изготовлении, обслуживании и эксплуатации разъемных вакуумных соединений во многом определяют надежность и работоспособность вакуумных уплотнений, особенно в условиях высокотемпературного прогрева, необходимого для создания сверхвысокого вакуума. Эти вопросы рассмотрены в настоящем пособии.

§ 1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Устройства, обеспечивающие герметичное соединение и разъединение элементов вакуумных систем без нарушения своей целостности, называют *разъемными вакуумными соединениями*.

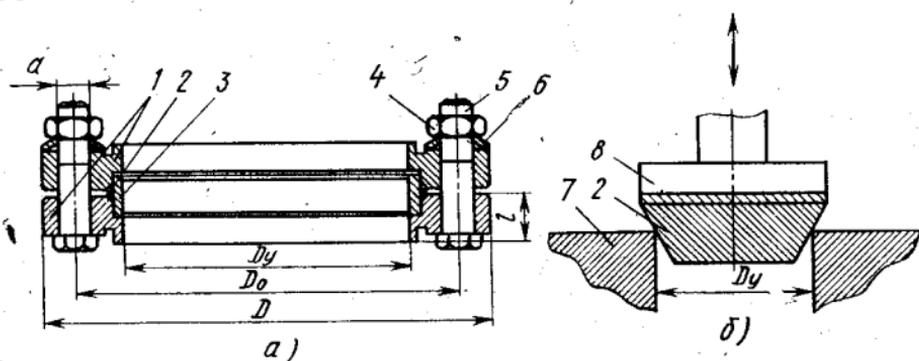


Рис. 1. Сверхвысоковакуумные разъемные соединения:

a — фланцевое, *б* — клапанное; 1 — фланец, 2 — уплотнитель, 3 — центрирующее кольцо, 4 — гайка, 5 — болт, 6 — пружинная шайба, 7 — седло, 8 — уплотнительный диск

Наибольшее распространение в сверхвысоковакуумных системах получили *фланцевые и клапанные разъемные соединения* (рис. 1, *а*, *б*). Фланцевые соединения, как правило, предназначены для герметичной стыковки элементов вакуумного оборудования при монтаже, а клапанные — для периодического сообщения и герметичного перекрытия его полостей при эксплуатации.

Основными элементами фланцевого соединения являются два фланца 1 и размещаемый между ними уплотнитель 2, а клапанного — диск 8 с уплотнителем 2 и седло 7. При стягивании фланцев (или приложении усилия от внешнего привода в клапанах) уплотнитель деформируется, заполняя микронеровности поверхностей стыка уплотняемых пар (фланцы — уплотнитель или седло — уплотнитель), и перекрывает каналы натекания воздуха из атмосферы в вакуум. Уплотнители сверхвысоковакуумных разъемных соединений, как правило,

изготавливают из пластичных металлов в виде прокладок, дисков, осажденных на подложку тонких пленок или легкоплавких металлов, что позволяет прогревать вакуумные системы при обезгаживании до высоких температур (450—600° С).

Качество разъемного соединения характеризуется *герметичностью* — свойством стыка — уплотнительной пары — ограничивать проникновение газов в вакуумный объем. Герметичность определяется *потокотеканием*, т. е. количеством газа, проникающего из окружающей среды через стык соединения в вакуумный объем в единицу времени, и выражается в единицах потока — ваттах (Вт); $1 \text{ Вт} = 10^3 \text{ л} \cdot \text{Па} / \text{с}$.

Обеспечение герметичности стыка соединяемых элементов называют *герметизацией*. Процесс герметизации вакуумных разъемных соединений в результате деформации материалов стыкуемых элементов под воздействием внешних усилий называют *уплотнением*. Под уплотнениями в вакуумной технике понимают также совокупность элементов, с помощью которых вакуумно-плотно соединяют разъемные соединения или неподвижные и подвижные вводы (валы, штоки).

Усилие, необходимое для уплотнения разъемного вакуумного соединения, называют *уплотняющим* или *усилием герметизации*.

Различные конструкции соединений с металлическими уплотнителями обычно оценивают по *удельному усилию герметизации* — нагрузке, приходящейся на единицу длины средней линии уплотнения.

Места нарушения герметичности называют *течами*. Основными причинами появления течей являются несовершенство изготовления элементов соединения, газопроницаемость уплотняющего материала, а также несоблюдение вакуумной гигиены при эксплуатации вакуумного оборудования. Измеряют течи в единицах потока.

Основными эксплуатационными и конструкторско-технологическими характеристиками сверхвысоковакуумных разъемных соединений являются натекание через герметичный стык (контакт), диапазон рабочих температур, устойчивость уплотнения в условиях термоциклирования, удельные усилия герметизации, ресурс работы, технологичность изготовления и ремонтпригодность.

Сверхвысоковакуумные разъемные соединения должны отвечать следующим требованиям:

иметь натекание через уплотнение не более $1,3 \cdot 10^{-10}$ Вт;

допускать эксплуатацию в диапазоне температур от -196 до $+450^\circ \text{C}$;

обеспечивать герметичность при минимальном усилии герметизации и равномерность его распределения по контуру уплотнения, а также минимально воздействовать на качественный и количественный состав остаточной среды в вакуумной системе;

обладать гарантированной герметичностью в условиях термоциклирования, а также минимальными габаритами и массой;

допускать обновление или замену поврежденных уплотняющих поверхностей, дистанционное манипулирование элементами соединения и простой его монтаж и демонтаж.

§ 2. МАТЕРИАЛЫ ЭЛЕМЕНТОВ СВЕРХВЫСОКОВАКУУМНЫХ РАЗЪЕМНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Материалы, применяемые для изготовления элементов сверхвысоковакуумных разъемных соединений, должны обеспечивать их работоспособность и удовлетворять требованиям вакуумной техники.

Упругость паров используемых материалов должна при рабочей температуре быть на 2—3 порядка ниже остаточного давления в системе. Если упругость паров больше или равна рабочему давлению, это вызывает интенсивное испарение материала и приводит к образованию пленочных слоев на поверхностях деталей, размещенных в вакуумном объеме. Кроме того, материалы должны обладать минимальными газовыделением и газопроницаемостью при рабочей температуре, а также коррозионной стойкостью. Необходимо помнить, что вакуум является восстановительной средой для оксидов, которые, постепенно переходя в иные соединения, длительное время являются источниками выделения газообразных соединений или кислорода. Сохраняя механическую прочность при температурах до 450°C , материалы одновременно должны легко механически обрабатываться, поддаваться сварке и пайке с образованием вакуумно-плотных швов.

В зависимости от области применения и назначения вакуумных устройств и механизмов к материалам предъявляют также требования по магнитной проницаемости, радиационной стойкости, способности к взаимной диффузии и др. При подборе материалов для элементов разъемного вакуумного соединения необходимо, чтобы их коэффициенты температурного расширения (КТР) в рабочем диапазоне температур были равны или близки друг другу.

Этим требованиям наиболее полно удовлетворяют нержавеющие стали. Например, широкое распространение в вакуумной технике получила сталь 12X18H10T, из которой изготавливают фланцы сверхвысоковакуумных разъемных соединений и основные детали клапанов, а также крепежные элементы (шпильки, болты, гайки и шайбы) фланцев. Однако необходимо отметить, что ввиду низкой прочности она не в полной мере удовлетворяет возросшим требованиям к крепежу.

Кроме того, применяют стали других марок, например 12X17Г9АН4, 12X21Н5Т, 14X17Н2, 08X17Т, 10X14Г14Н4Т, которые по вакуумной плотности (герметичности), сварных швов, выполненных аргонодуговой сваркой, а также водородопроницаемости не уступают стали 12X18H10T. Сравнительные испытания соединений с фланцами, изготовленными из сталей 12X18H10T и 10X14Г14Н4Т, показали, что при давлениях до 10^{-5} Па существенного различия в результатах нет.

Основные физико-механические свойства сталей 12X18H10T и 10X14Г14Н4Т приведены ниже.

	12X18H10T	10X14Г14Н4Т
Плотность, кг/м ³	7900	7800
Коэффициент температурного расширения, 10^{-6} 1/°C:		
при 20—100°С	16,1	16,0
при 200—700°С	19,4	19,0
Теплопроводность, Вт/(м·°C):		
при 20°С	16,328	14,779
при 500°С	21,771	29,433
Удельное электрическое сопротивление, Ом·мм ² /м	0,75	0,78
Магнитная проницаемость	1,008	1,00
Предел прочности, МПа	550	650
Предел текучести, МПа	200	250
Относительное удлинение, %	40	45

Примечание. Характеристики сталей даны при 20°С.

При прогреве вакуумной системы на поверхностях элементов из стали возникают тонкие пленки оксидов, что обуславливает появление цветов побежалости, по которым можно судить о температуре прогрева сверхвысоковакуумного разъемного соединения. Так, светло-соломенному цвету соответствует температура 300°C , соломенному — 400°C , красно-коричневому — 500°C , фиолетово-синему — 600°C .

Материал уплотнителя должен обладать пластичностью при достаточной упругости. Это требование обусловлено тем, что процесс заполнения микронеровностей уплотняемых поверхностей пластичным металлом происходит при небольших уплотняющих усилиях. В то же время постоянство герметичности стыка при изменении нагрузок и температур обеспечивается упругостью уплотняющего материала. Таким образом, уплотнитель для сверхвысоковакуумных разъемных соединений должен представлять собой металлическую прокладку с твердой упругой сердцевиной и пластичной внешней оболочкой; при этом их КТР должны быть согласованы. В настоящее время для нужд вакуумной техники специальные материалы не выпускаются, поэтому в качестве уплотняющих используют такие пластичные металлы, как золото, серебро, медь, алюминий, никель, свинец, индий и др.

Так как сверхвысоковакуумные разъемные соединения в большинстве случаев прогревают до 450°C , при выборе материалов для уплотнителей останавливаются на золоте, серебре, никеле и меди. В отечественной практике наибольшее распространение получили медь МО, МОб, М1 с малым содержанием кислорода, а также медная проволока ММ (для проволочных уплотнителей). Повышение содержания кислорода в меди существенно снижает ее механические и технологические свойства. Основные физико-механические свойства меди приведены ниже.

Температура, $^{\circ}\text{C}$:	
плавления	1 083
кипения	2360
Плотность при 20°C , кг/м^3	8940
Коэффициент температурного расширения, $1/^{\circ}\text{C}$, при температуре, $^{\circ}\text{C}$:	
0—100	$1,64 \cdot 10^{-5}$
25—300	$1,77 \cdot 10^{-5}$
0—600	$1,86 \cdot 10^{-5}$
0—800	$1,93 \cdot 10^{-5}$

Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°С)	386,442
Удельное электрическое сопротивление при 20° С, Ом·мм ² /м	0,01748
Предел прочности, МПа:	
мягкой	220—240
твердой	450
Относительное удлинение, %:	
мягкой	50
твердой	6
Твердость по Бринеллю:	
мягкой	45
твердой	120
Предел ползучести, МПа:	
при 20° С	70
при 400° С	14

Для уменьшения уплотняющих усилий и повышения работоспособности разъемных соединений при повышенных температурах медные уплотнители в ряде случаев покрывают пленками серебра, золота, индия или никеля.

Изменение механических свойств меди МО в зависимости от степени ее деформации ϵ , а также температуры отжига T и размера зерен z показано на рис. 2, а, б. При увеличении деформации (рис. 2, а) возрастают твердость НВ, прочность σ_B и упругость σ_Y меди, т. е. ухудшается уплотняющая способность, а при повышении температуры (рис. 2, б) твердость, упругость меди снижаются, т. е. улучшается уплотняющая способность, но ухудшаются прочностные свойства. Кроме того, при сжатии повышается устойчивость меди к коррозионному растрескиванию, что является положительным фак-

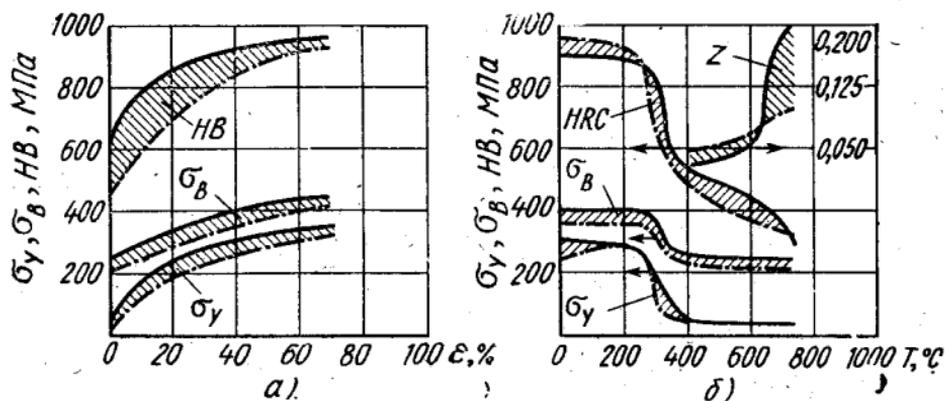


Рис. 2. Изменение механических свойств меди МО в зависимости от степени деформации (а), температуры отжига и размера зерен (б):

— материал с зерном 0,015 мм, — — — материал с зерном 0,040 мм

тором и увеличивает долговечность уплотнителей и надежность герметичности при прогреве.

Недостатками меди являются склонность к водородной болезни, что приводит к образованию мельчайших трещин и вызывает хрупкость материала, и высокая активность по отношению к кислороду, особенно при повышенных температурах, что снижает уплотнительные свойства и ограничивает повторное использование медных уплотнителей без соответствующей обработки. Из рис. 3 видно, что с увеличением температуры и времени прогрева медного уплотнителя глубина h проникновения кислорода в его объем существенно увеличивается. Несмотря на недостатки, такие

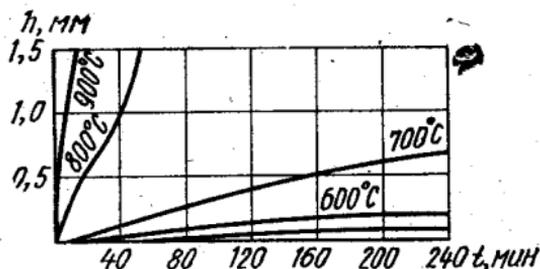


Рис. 3. Зависимость глубины проникновения кислорода в бескислородную медь от времени ее прогрева при различных температурах

характеристики меди, как высокая пластичность, малая газопроницаемость, низкая упругость пара (10^{-9} Па при 500°C), согласованность по КТР со сталью 12X18H10T, являются решающими при выборе ее в качестве уплотняющего материала для сверхвысоковакуумных разъёмных соединений, прогреваемых до 450°C .

При прогревах до 300°C уплотнитель изготавливают из технически деформируемого алюминия АД1М (98,75% Al; 0,05% Cu; 0,1% Mn; 0,6% Si; 0,4% Fe; 0,1% — прочие примеси), основные физико-механические свойства которого приведены ниже.

Температура, $^{\circ}\text{C}$:	
плавления	660
кипения	2327
Плотность при 20°C , $\text{кг}/\text{м}^3$	2700
Коэффициент температурного расширения при 25°C , 1°C	$2,43 \cdot 10^{-5}$
Предел прочности, МПа	110—130
Твердость по Бринеллю, МПа	300

Усилие герметизации сверхвысоковакуумных разъёмных соединений зависит от механических свойств металлов-уплотнителей, которые изменяются при уплотнении и описываются кривыми упрочнения, представляющими собой зависимость напряжений течения σ_s от степени

деформации ϵ . Кривые упрочнения металлов-уплотнителей в зависимости от сортамента и технологии обработки показаны на рис. 4. Напряжение течения действует в пластически деформируемом теле при линейном напряженном состоянии и рассчитывается по формуле $\sigma_s = P/F$ (где P — сжимающее усилие; F — площадь поперечного сечения образца после деформации). Из кривых, показанных на рис. 4, следует, что для уменьшения усилий герметизации при уплотнении стыка соединения целесообразно уменьшать деформацию уплотнителя.

Для герметизации разъемных вакуумных соединений с помощью никелевых, медных, золотых и алюминиевых уплотнителей необходимы усилия от 100 до 600 Н/мм и более. При меньших усилиях герметичность обеспечивают такие более пластичные металлы, как свинец и индий, из которых наиболее распространены индий. Основные физико-механические свойства индия приведены ниже.

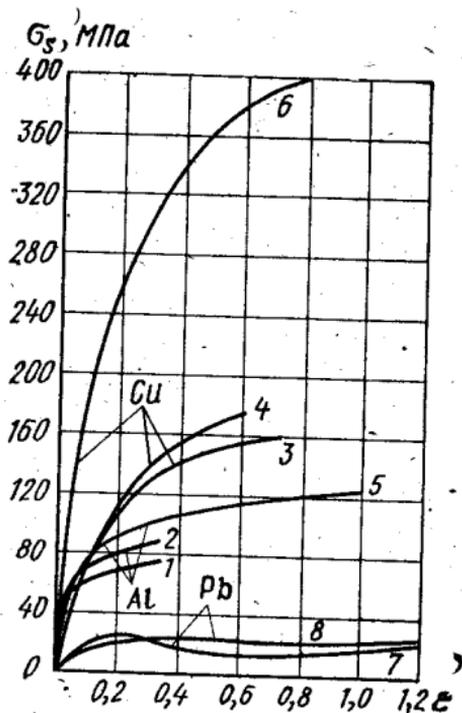


Рис. 4. Кривые упрочнения различных металлов при сжатии:

1, 3 — осаживание в вакууме 1×10^{-1} Па, 2, 4 — осаживание на атмосфере, 5 — лист толщиной 1,63 мм, 6 — лист (1,57+1,63 мм), 7 — после прессования, 8 — после прессования и отжига

Температура, °С:	
плавления	157
кипения	2097
Плотность, кг/м ³	7310
Коэффициент температурного расширения, 1/°С	$3,3 \cdot 10^{-5}$
Предел прочности, МПа	12,5
Модуль упругости, МПа	10700
Твердость по Бринеллю, МПа	7,5
Давление истечения, МПа	30,6

Так как индий обладает очень высокой пластичностью, уплотнители из него занимают как бы промежуточное положение между твердыми и жидкими (рас-

плавляемыми) и используются, когда необходимо получить герметичность стыка сверхвысоковакуумного разъемного соединения при наименьших усилиях герметизации.

В соединениях с расплавленным уплотнителем обычно применяют металлы и сплавы с низкими температурой плавления и упругостью паров, например свинец, олово, индий, или эвтектический сплав, в котором содержится 48,7% олова, остальное — индий. Температура испарения некоторых металлов-уплотнителей и другие их физико-механические характеристики приведены в табл. 1 и 2.

Таблица 1. Температура испарения металлов в вакууме

Металл	Температура испарения, °С, при давлении, МПа									
	10 ⁻⁸	10 ⁻⁷	10 ⁻⁶	10 ⁻⁵	10 ⁻⁴	10 ⁻³	10 ⁻²	10 ⁻¹	1	10
Олово	582	632	688	751	823	906	1002	1114	1248	1412
Индий	390	427	472	521	577	641	716	805	912	1042
Свинец	278	320	346	387	435	489	554	630	722	837

Таблица 2. Физико-механические характеристики металлов-уплотнителей

Металлы	Температура плавления, °С	Плотность в жидком состоянии, кг/м ³	Поверхностное натяжение, Н/м	Вязкость при температуре плавления, Па·с
Олово	232	7000	0,480	0,00195
Индий	157	—	—	0,0017
Свинец	327,3	10300	0,424	0,003

Для поддержания стабильного уплотняющего усилия и герметичности сверхвысоковакуумных разъемных соединений (особенно уплотнительных пар клапанов) при высоких температурах прогрева в них вводят различные упругие элементы, например тарельчатые пружины, способные развивать значительные усилия при небольшой осадке. Материалы, применяемые для изготовления упругих элементов, должны обладать высокими упругими свойствами при температурах до 450°С, достаточной прочностью и выносливостью, коррозионной стойкостью, немагнитностью, а также штампуемостью и свариваемостью.

мостью с образованием вакуумно-плотных соединений. Такими материалами являются стали 20X13, 30X13, 40X13, 36НХТЮ, 36НХТЮМ5, 36НХТЮМ8 и 40КХНМ. Основные физико-механические свойства некоторых из них приведены ниже.

	20X13	40X13	36НХТЮ	36НХТЮМ8	40КХНМ
Предел прочности, МПа	1450	1700	1300	1480	2700
Условный предел текучести, МПа	1180	1450	1000	1150	2600
Модуль упругости, ГПа	300	400	192	210	205
Предел пропорциональности, МПа	—	—	800	1000	—
Пределная температура, при которой сохраняются упругие свойства, °С	—	300	200	500	400
Магнитные свойства	ферромагнитны			парамагнитны	

§ 3. ОБРАЗОВАНИЕ ВАКУУМНО-ПЛОТНОГО КОНТАКТА В СВЕРХВЫСОКОВАКУУМНЫХ РАЗЪЕМНЫХ СОЕДИНЕНИЯХ

При образовании вакуумно-плотного контакта в сверхвысоковакуумных разъемных соединениях материал уплотнителя при воздействии на стыкуемые элементы внешних сжимающих сил заполняет неровности уплотняемых поверхностей, перекрывая газопроводящие каналы. Для заполнения всех поверхностных неровностей материал уплотнителя, как уже отмечалось, должен быть пластичным, а для поддержания приложенного усилия — упругим. Таким сочетанием свойств металлические уплотнители не обладают. На практике процесс уплотнения происходит при деформации контактирующих поверхностей и продолжается до тех пор, пока пластичный уплотнитель не примет форму жестких поверхностей стыкуемых элементов.

Неровности поверхностей деталей разделяют на макроотклонения формы, волнистость и шероховатость. Макроотклонениями формы являются такие единичные, не регулярно повторяющиеся отклонения реальной поверхности от номинальной, как выпуклость, вогнутость, конусность и др. Волнистость представляет собой совокупность периодических, регулярно повторяющихся, близких по размерам выступов и впадин, расстояние

между которыми значительно больше высоты неровностей, образующих шероховатость поверхности, и превышает базовую длину l , используемую для оценки шероховатости. Расстояния между вершинами волн (шаг волны) находятся в пределах 0,8—10 мм, а высота 0,03—500 мкм.

Под шероховатостью понимают совокупность микро-неровностей с относительно малым шагом, образующих рельеф поверхности и рассматриваемых в пределах участка, длина которого равна некоторой базовой длине l . Шаг микро-неровностей изменяется от 2 до 800 мкм, а высота 0,03—400 мкм. Кроме того, на выступах, образующих шероховатость, имеются еще более мелкие неровности высотой от 2 до 20 нм — субмикрощероховатость.

При контактировании под действием уплотняющих усилий твердой поверхности фланца и относительно мягкой прокладки можно, хотя и приближенно, выделить следующие четыре основных этапа образования вакуумно-плотного контакта стыка.

1. Исходное положение. При отсутствии внешней нагрузки контакт поверхностей происходит по выступающим неровностям без их деформации. Проводимость стыка определяется суммой проводимостей зазоров и каналов, образованных макроотклонениями формы и микро-неровностями поверхностей.

2. Контурное контактирование. Под воздействием внешней нагрузки при пластической деформации уплотняющий материал заполняет зазоры, появляющиеся вследствие макроотклонений формы контактирующих поверхностей. Выступающие участки упругопластически деформируются с образованием отдельных пятен контакта. При этом разрушаются пленки оксидов и адсорбированных газов. Проводимость стыка резко уменьшается и определяется суммой проводимостей каналов, образованных в основном шероховатостью стыкуемых поверхностей.

3. Фактическое контактирование. При дальнейшем воздействии нагрузки происходит контактирование микро-неровностей поверхностей, причем уплотняющий материал находится в состоянии текучести и суммарная площадь фактического контакта возрастает. Так как разрушение пленок оксидов и адсорбированных газов протекает интенсивно, возможно образование металли-

ческих связей. Сквозные газопроводящие каналы прерываются и газопроницаемость стыка уменьшается.

4. Полное контактирование. При продолжающемся воздействии нагрузки поверхность прокладки копирует шероховатую поверхность фланца, что эквивалентно диффузионной сварке и на практике наблюдается сравнительно редко (только при достаточно длительном воздействии внешней нагрузки и повышенных температурах). Более вероятным является формирование в контактной зоне прокладки и фланцев переходного слоя, содержащего некоторое количество разнообразных по форме и протяженности микроканалов, суммарная проводимость которых ниже экспериментально фиксируемого натекания.

Необходимо отметить, что строго разграничить процесс герметичности на этапы нельзя, поскольку на каждом из них наблюдаются явления, характерные для других.

Описанная модель образования вакуумно-плотного контакта стыкуемых элементов уплотнительных пар сверхвысоковакуумных разъемных соединений объясняет подтвержденный экспериментально так называемый гистерезис натекания, т. е. существование области, в которой проводимость (натекание) Q микроканалов после создания герметичности не возрастает при уменьшении до некоторого значения действующих на уплотнение усилий P . Эта область существует до тех пор, пока упругая деформация уплотнителя способна компенсировать возрастание зазора между контактными поверхностями фланцев. Гистерезисом натекания можно объяснить, например, сохранение герметичности стыка разъемного вакуумного соединения при ослаблении натяга крепежных элементов, вызываемого прогревом. Это явление используют для увеличения долговечности уплотнительных пар прогреваемой в закрытом положении вакуумной арматуры, снижая после создания герметичности внешнее сжимающее усилие.

Зависимость натекания Q от внешнего сжимающего усилия P при его изменении от нуля до момента прекращения течи и обратно называют, по А. Роту, *силовым циклом процесса герметизации* (рис. 5).

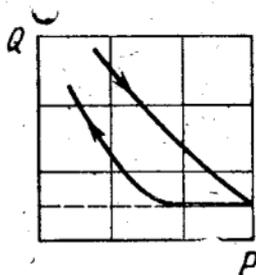


Рис. 5. Силовой цикл процесса герметизации

Для конкретных конструкций сверхвысоковакуумных разъемных соединений зависимость $Q = f(P)$, необходимую для определения усилия герметизации при заданной герметичности, находят экспериментально. Несмотря на конструктивные отличия фланцевых и клапанных соединений, процессы образования в них вакуумно-плотных контактов стыков при использовании металлических уплотнителей одинаковые.

§ 4. ВЛИЯНИЕ КОНСТРУКТИВНЫХ, ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ФАКТОРОВ НА КАЧЕСТВО СВЕРХВЫСОКОВАКУУМНЫХ РАЗЪЕМНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Конструктивные факторы. Основными конструктивными факторами, влияющими на надежность и работоспособность сверхвысоковакуумных разъемных соединений, являются форма уплотняющего профиля контактирующей пары, вид связи фланцев с оборудованием, конструкция упругих элементов.

Уплотняющий профиль (форма уплотняющих поверхностей) определяет силовой цикл процесса герметизации и обуславливает явления, происходящие в зоне стыка. От его конструкции зависят также габариты соединения.

Надежные герметичность и работоспособность большинства сверхвысоковакуумных разъемных соединений с тем или иным уплотняющим профилем возможны лишь при очень точном совмещении контактирующих элементов, которые изготовляют с жесткими допусками. Так, для соединений с встречными выступами 1 и плоским уплотнителем 2 (рис. 6) допуск на сопрягаемые диаметры должен быть в пределах $\pm 0,05$ мм, на эксцентриситет — в пределах $\pm 0,12$ мм, а соосность должна быть выдержана с точностью до $\pm 0,25$ мм. Такая точность характерна для многих других конструкций. Исключениями являются разъемные соединения с плоскими уплотняемыми поверхностями (плоский уплотняющий профиль) и соединения, в которых плоские уплотняемые поверхности сопрягаются с профилированным уплотнителем.

Под воздействием внешнего сжимающего усилия уплотняющий материал начинает растекаться в стороны наименьшего сопротивления, т. е. в наибольшие зазоры, что требует для герметизации стыка приложения допол-

нительных усилий и при прогревах соединений приводит к образованию течей. Для ограничения растекания уплотняющего материала (рис. 7) уплотнитель 3 должен быть расположен в замкнутом объеме, образованном фланцами 1 и втулкой 2.

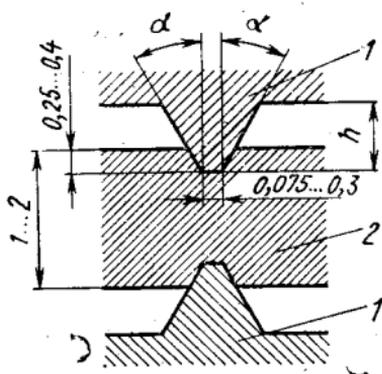


Рис. 6. Сверхвысоковакуумное разъемное соединение с встречными выступами:

1 — выступы, 2 — плоский уплотнитель

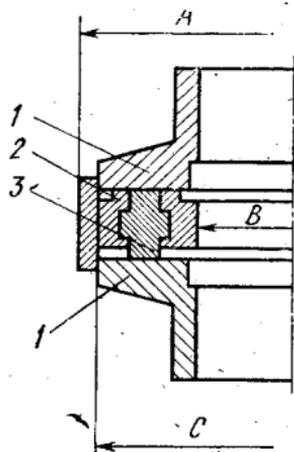


Рис. 7. Разъемное вакуумное соединение с ограничением растекания уплотнителя:

1 — фланцы, 2 — втулка, 3 — уплотнитель

Для перекрытия газопроводящих каналов в зоне уплотнения уплотнитель сжимают до напряжений, превосходящих предел текучести материала, из которого он выполнен. Поэтому для снижения усилия герметизации желательно по возможности уменьшать площадь стыка соединения, по которой происходит смятие уплотнителя, что позволяет уменьшать размеры крепежных элементов и соответственно металлоемкость разъемного соединения.

Одним из основных требований, предъявляемых к сверхвысоковакуумным разъемным соединениям, является симметричность фланцев, которая может быть обеспечена при идентичности уплотняющих профилей.

Связь фланцев с оборудованием может быть жесткой (рис. 8, а, б, в) и упругой (рис. 8, г).

Фланцы, жестко связанные с вакуумной системой, воспринимают дополнительные нагрузки, появляющиеся в системе при эксплуатации. Поэтому для обеспечения надежной работы их выполняют массивными. Так, фланцы в соединениях Уилера (рис. 8, б) имеют толщину

до 30—50 мм. В качестве гибких элементов при упругой связи фланцев с оборудованием используют сильфоны или выполняемые вместе с фланцем относительно тонкие перемишки (либо их комбинации). Образованный

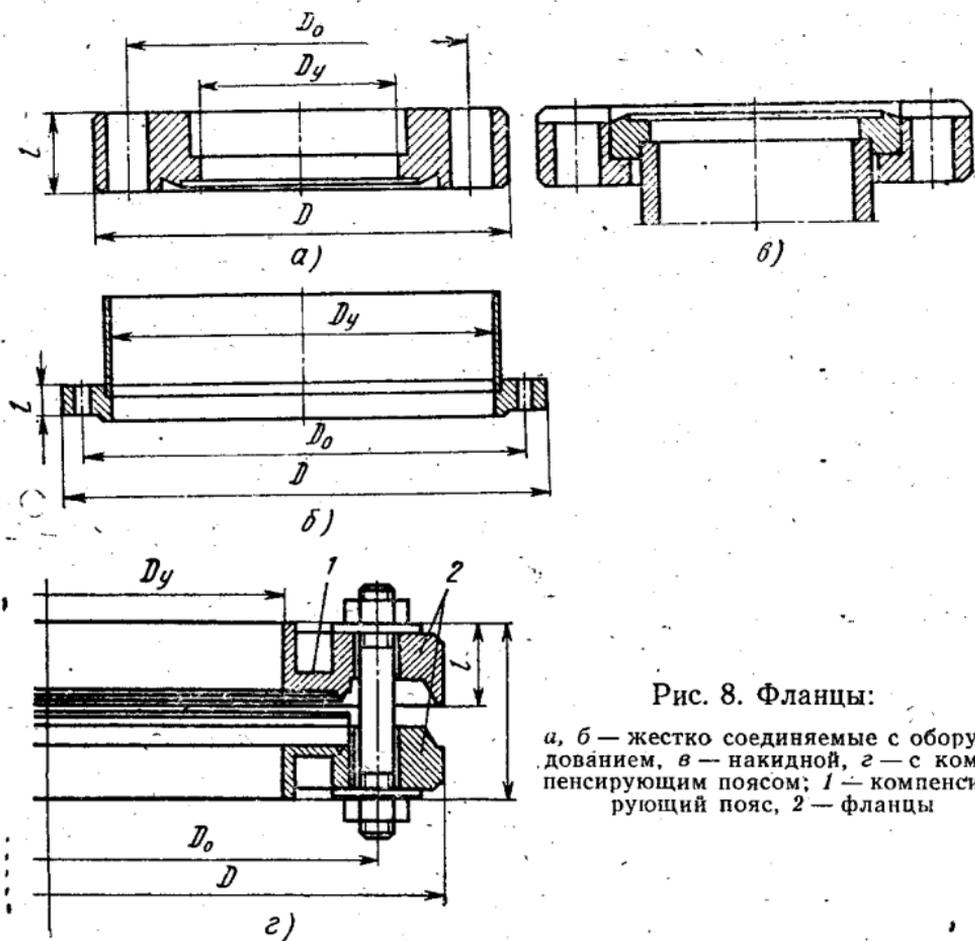


Рис. 8. Фланцы:

а, б — жестко соединяемые с оборудованием, в — накидной, г — с компенсирующим поясом; 1 — компенсирующий пояс, 2 — фланцы

таким образом на фланце компенсирующий пояс исключает влияние деформаций корпуса вакуумной камеры на герметичность, позволяет приваривать фланцы 2 в окончательно обработанном виде, так как все сварочные деформации или гасятся этим поясом, или выбираются при стягивании фланцев (см. рис. 8, в).

Гибкая связь с вакуумной системой предопределяет также стыковку фланцев по наружному диаметру D помимо ее стыковки по месту уплотнения. Такие фланцы называют *контактирующими*. Сечение венцов контактирующих фланцев, как правило, имеет форму швеллера с массивной полкой в зоне уплотнения. При такой форме венцов состыкованные фланцы представляют собой упругую систему, являющуюся компенсатором деформа-

ций, возникающих в соединении при термоциклировании, что повышает надежность герметичности стыка. Контактное фланцев по наружному диаметру имеет немаловажное значение для работы соединения, так как устраняется неуправляемое, возникающее при затягивании крепежных элементов (зонтичное) зависание фланцев и их перемещение при сближении ограничивается в основном деформацией уплотнителя. Это повышает долговечность фланцевого соединения и особенно крепежных элементов.

Упругие элементы (компенсаторы) вводят в разъемные соединения для повышения их надежности, особенно при термоциклировании. Повышение упругости соединения целесообразно с точки зрения снижения нагрузки на стяжные элементы (болты, шпильки) при резком нагреве соединения. Более целесообразно и перспективно введение непосредственно в зону уплотнения упругих элементов, обеспечивающих постоянство контактирования уплотнителя и поверхностей стыка.

Примером могут служить соединения с так называемой наведенной упругостью* (рис. 9, а, б), герметичность стыка которых получают сжатием пластичного материала уплотнителя 2, заключенного между двумя кольцами 1 и 4. Высота колец, выполненных из упругой стали, несколько меньше высоты уплотнителя (рис. 9, а). Эффект наведенной упругости состоит в том, что при сближении уплотняемых поверхностей фланцев 3 уплотнитель 2, деформируясь, заставляет внешнее ограничительное кольцо 4 растягиваться, а внутреннее 1 сжиматься (рис. 9, б), что создает в них определенный запас энергии. При частичном расхождении уплотняемых поверхностей кольца стремятся вернуться в исходное положение и вытесняют уплотняющий материал в образовавшийся зазор. Таким образом обеспечивается контактирование уплотнителя и уплотняемых поверхностей,

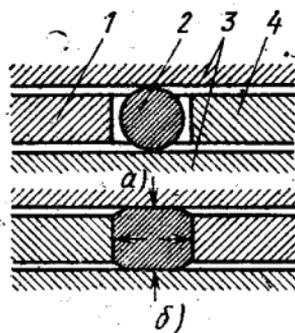


Рис. 9. Разъемное соединение с наведенной упругостью:

а — до герметизации, б — в процессе герметизации; 1, 4 — кольца, 2 — уплотнитель, 3 — фланцы

* Р. Бернар. Патент СССР № 291493, 1973 г.

что гарантирует надежную работу соединения. Достоинством соединений с наведенной упругостью является возможность многократного использования уплотнителя.

На рис. 10, *а—д* приведены сверхвысоковакуумные разъемные соединения с упругими уплотнителями.

Технологические факторы. Надежность и работоспособность сверхвысоковакуумных разъемных соединений

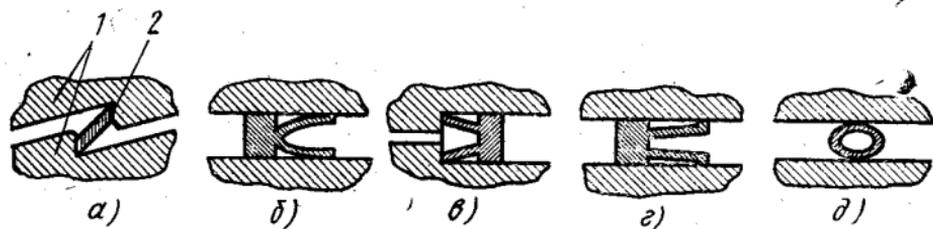


Рис. 10. Сверхвысоковакуумные соединения с упругими уплотнителями:

а, б — типа «Conoseal» и «Bobbin», *в, г* — самоуплотняющиеся, *д* — образное полое металлическое; 1 — фланцы, 2 — уплотнитель

в значительной степени зависят от технологии их изготовления. При механической обработке элементов соединений могут образоваться трещины и микроканалы, по которым впоследствии возникают течи. Трещины и микроканалы обычно развиваются вдоль волокон и совпадают с направлением прокатки, протяжки иковки металла. Необходимо стремиться к тому, чтобы эти дефекты не стали каналами, сообщающими вакуумную полость с атмосферой. Поэтому следует правильно размещать ось заготовки будущей детали относительно направления обработки.

Со стороны вакуума поверхности разъемных соединений после механической обработки не должны быть загрязнены частицами протирочного материала и какими-либо испаряющимися веществами, скрытыми в микроканалах, т. е. должны обладать минимальным газовыделением. Наилучшим способом обработки, удовлетворяющим этим требованиям, является резание твердосплавным инструментом.

Герметизация соединений с помощью металлических уплотнителей требует приложения больших уплотняющих усилий, которые можно уменьшить, повысив качество обработки уплотняемых поверхностей. Шероховатость уплотняемых поверхностей сверхвысоковакуумных разъемных соединений должна соответствовать 7—8-му классам (ГОСТ 2789—73). Одновременно необходимо

стремиться к тому, чтобы следы обработки были направлены вдоль линии уплотнения.

Особенно большое значение имеет качество обработки деталей соединений, эксплуатируемых в условиях воздействия циклических знакопеременных нагрузок. В этом случае только уменьшением высоты микронеровностей при обработке можно в несколько раз увеличить сопротивление усталости — вредное явление снижения прочности материала при знакопеременных нагрузках, возникающее в результате прогрессивно развивающихся микротрещин. Объясняется это тем, что циклическая прочность стали зависит от образующихся при механической обработке и являющихся эффективными концентраторами напряжений микронеровностей, трещин, царапин, рисок, действие которых тем эффективней, чем грубее дефект. Например, острая царапина глубиной 0,1 мм, нанесенная абразивом, снижает предел усталости металла на 40%.

При обработке медных уплотнителей особое внимание надо уделять уменьшению возможности насыщения меди кислородом, особенно при отжиге и пайке, так как при повышении температуры скорость проникновения кислорода в медь резко увеличивается.

Эксплуатационные факторы. Основным эксплуатационным фактором, влияющим на работоспособность сверхвысоковакуумных разъемных соединений, является высокотемпературный прогрев, ускоряющий нарастание во времени пластических деформаций, особенно уплотнителя и крепежных элементов. Это явление обуславливает постепенную разгерметизацию стыков. Чтобы обеспечить длительную работоспособность и надежность соединений, рекомендуется периодически подтягивать крепежные элементы.

Прогревы являются основной причиной появления термомеханических деформаций материалов стыкуемых элементов и вызывают дополнительные деформации уплотнителя, что отрицательно сказывается на надежности соединения. Поэтому материалы сверхвысоковакуумных разъемных соединений должны быть согласованы по КТР или должны быть предусмотрены специальные компенсирующие устройства, устраняющие влияние высокотемпературного прогрева.

Увеличение пластичности уплотняющего материала при прогреве можно в некоторых случаях использовать

для получения герметичности стыка уплотнительной пары при небольших усилиях герметизации (например, при эксплуатации цельнометаллической прогреваемой арматуры в системах вакуум—вакуум). Так, если седло выполнено в виде профилированного выступа из нержавеющей стали, а плоский уплотнитель — из меди (рис. 11), натекание Q через зону уплотнения стыкуемых элементов с увеличением температуры T уменьшается без увеличения усилия герметизации.

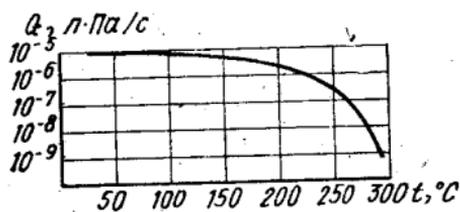


Рис. 11. Изменение натекания через зону уплотнения цельнометаллического клапана ДУ-25

Надежность герметичности стыка в большой степени зависит от скорости нагрева и охлаждения соединения. Для большинства современных сверхвысоковакуумных фланцевых соединений скорость нагрева не должна превышать $10^\circ\text{C}/\text{мин}$, а скорость охлаждения после прогрева составляет $4\text{—}7^\circ\text{C}/\text{мин}$. Важно, чтобы изменение температуры не превышало указанных максимальных значений. В ином случае герметичность стыка может быть нарушена.

При эксплуатации сверхвысоковакуумные фланцевые соединения помимо тепловых нагрузок воспринимают внешние механические нагрузки: растягивающие усилия P_p при креплении различного оборудования на нижних фланцах в соединениях, плоскости разъема которых имеют горизонтальное положение; изгибающий момент $M_{\text{изг}}$ при нагружении вертикально расположенных фланцев; крутящий момент $M_{\text{кр}}$ при закрывании и открывании цельнометаллических клапанов с ручным приводом и др.

В этих случаях необходимо применять специальные силовые устройства, воспринимающие внешние нагрузки. Допустимые по вакуумной плотности внешние нагрузки для фланцевых соединений с диаметром условного прохода D_y до 250 мм определяют, используя следующие выражения:

при воздействии растягивающего усилия $[P_p] = 0,2 r_g D_{\text{упл}}$ (где r_g — удельное усилие герметизации; $D_{\text{упл}}$ — средний диаметр уплотняющего профиля);

при воздействии изгибающего момента $[M_{\text{изг}}] = 0,025 r_g D_{\text{упл}}^2 [1 + \lambda (D_{\text{шп}}/D_{\text{упл}})^2]$ (где $D_{\text{шп}}$ — диаметр

окружности, по которой располагаются центры отверстий для шпилек); $\lambda = \lambda_{\text{пр}} / (\lambda_{\text{шп}} + \lambda_{\text{фл}})$ — упругая постоянная фланцевого соединения (где $\lambda_{\text{пр}}$, $\lambda_{\text{шп}}$ и $\lambda_{\text{фл}}$ — коэффициенты податливости прокладки, шпилек и фланцев, расчет которых приведен в [Л. 3.]);

при воздействии крутящего момента $[M_{\text{кр}}] = 0,2 f p_{\text{г}} D_{\text{упл}} (D_{\text{но}}^3 - D_{\text{во}}^3) / (D_{\text{но}}^2 - D_{\text{во}}^2)$, где f — коэффициент трения фланца о прокладку; $D_{\text{но}}$ и $D_{\text{во}}$ — наружный и внутренний диаметры отпечатка прокладки.

ГЛАВА ВТОРАЯ

КОНСТРУКЦИИ СВЕРХВЫСОКОВАКУУМНЫХ РАЗЪЕМНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Разнообразие конструкций сверхвысоковакуумных разъёмных соединений, обусловленное эксплуатационными требованиями, определяется разными способами герметизации и возможными сочетаниями геометрии и взаимного расположения фланцев и уплотнителя. Классификация сверхвысоковакуумных разъёмных соединений приведена на рис. 12.

§ 5. СВЕРХВЫСОКОВАКУУМНЫЕ РАЗЪЕМНЫЕ ФЛАНЦЕВЫЕ СОЕДИНЕНИЯ С МЕТАЛЛИЧЕСКИМИ УПЛОТНИТЕЛЯМИ

Герметичность вакуумной системы в первую очередь определяется герметичностью стыков разъёмных соединений, являющихся ее необходимыми элементами. Среди разъёмных сверхвысоковакуумных соединений наибольшее распространение получили фланцевые, количество которых в современных вакуумных установках исчисляется сотнями.

По форме уплотняемых поверхностей фланцевые соединения бывают плоские, канавочно-клиновые, конические, угловые и ступенчатые, а также с одним профилированным выступом или с двумя встречными.

Плоские соединения имеют уплотняемые поверхности в виде плоскостей, что значительно упрощает технологию их изготовления, процесс сборки, а также профилактику и ремонт при эксплуатации. Плоские разъёмные соединения могут иметь проволоочный или

фасонный уплотнитель, а также дополнительный вставной элемент.

Соединения с проволочным уплотнителем надежны и просты как при изготовлении, так и эксплуатации. Не-

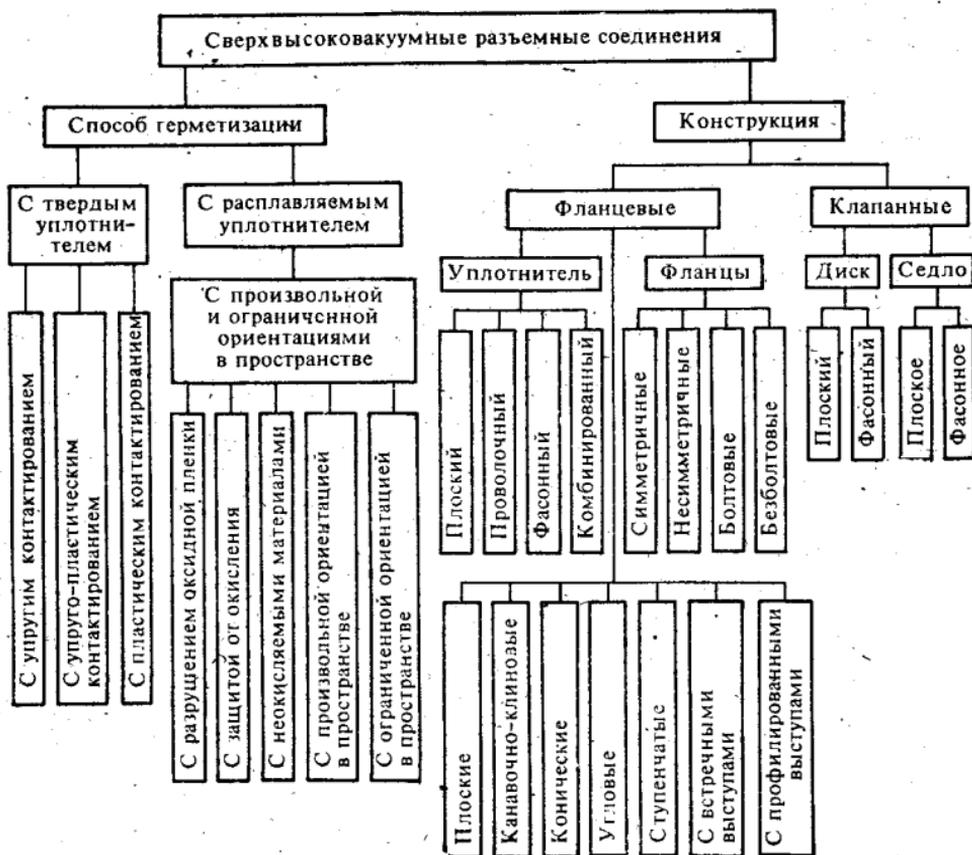


Рис. 12. Классификация сверхвысоковакуумных разъёмных соединений

сложность обработки уплотняемых поверхностей позволяет изготавливать такие соединения различной формы (рис. 13). Фланцы этих соединений выполняют из окончательно обработанных секций, которые сваривают встык, а место сварки зачищают. Перед стыковкой фланцев 3 (рис. 14, а) проволочный уплотнитель 2 натягивается на утапливаемые штифты 1, размещенные в одном из фланцев. В соединениях с круглым проходным

отверстием для монтажа уплотнителя обычно применяют утапливаемое кольцо 4 (рис. 14, б). Соединения с проволочным уплотнителем широко используют в ваку-

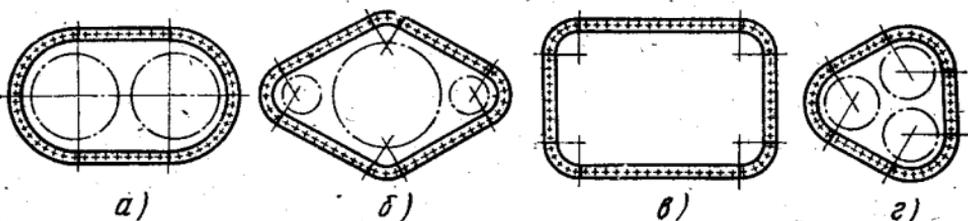


Рис. 13. Фланцы плоского соединения из окончательно обработанных секций:

а — овалный, б — ромбический, в — прямоугольный, г — треугольный

умной технике, особенно в крупногабаритных вакуумных камерах и устройствах.

Недостатками соединений с проволочным уплотнителем являются большие усилия герметизации, обуслов-

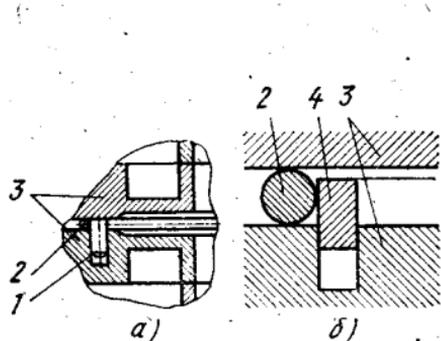


Рис. 14. Плоские разъемные соединения с проволочными уплотнителями:

а — с утапливаемыми штифтами, б — с утапливаемым кольцом; 1 — штифты, 2 — уплотнитель, 3 — фланцы, 4 — кольцо

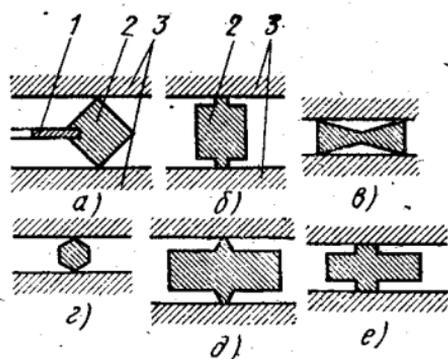


Рис. 15. Плоские разъемные соединения с фасонными уплотнителями:

а — ромбическим, б — прямоугольным с буртиками, в — X-образным, г — шестиугольным, д — трапециевидными выступами; е — прямоугольными выступами; 1 — кольцо; 2 — уплотнитель, 3 — фланцы

ленные растеканием уплотняющего материала в зоне стыка; и сложность изготовления прокладок малого диаметра.

В плоских соединениях с фасонным уплотнителем (рис. 15, а—е) уплотняющий выступ наиболее часто представляет собой равностороннюю трапецию (рис. 15, д). Высота выступа и ширина его уплотняющей поверхности 0,25 мм. В этих соединениях большое

значение имеет плоскостность уплотняемых поверхностей стыкуемых элементов. Так, при наличии рисок глубиной 0,08—0,1 мм и отклонении уплотняемой поверхности от плоскости разреза на 0,02—0,05 мм на каждые 20 мм длины линии уплотнения загерметизировать стык затруднительно.

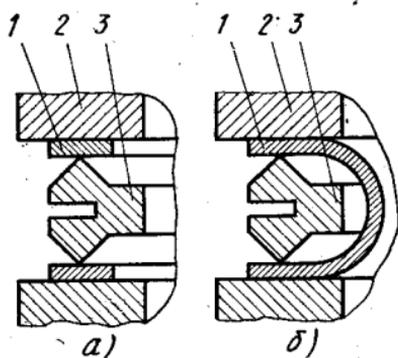


Рис. 16. Плоское соединение со вставным кольцом (вкладышем):

a — с двумя прокладками, *б* — с U-образной прокладкой; 1 — уплотнитель, 2 — фланцы, 3 — вкладыш

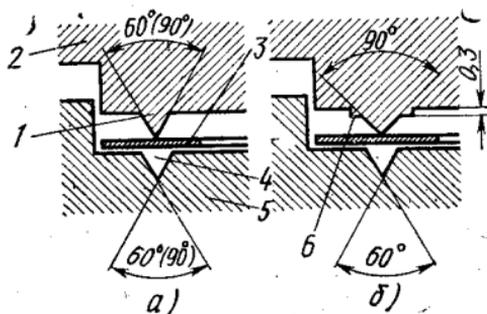


Рис. 17. Канавочно-клиновые соединения:

a — без заплечиков, *б* — с заплечиками; 1 — выступ, 2, 5 — фланцы; 3 — уплотнитель, 4 — канавка, 6 — заплечики

Плоские соединения с дополнительным вставным элементом 3 (рис. 16, *a*, *б*) имеют упрощенную конструкцию фланцев 2, которые могут быть полностью взаимозаменяемыми. Недостатками таких соединений являются частый выход из строя вставных элементов ввиду незащищенности уплотняющего профиля, трудность их реставрации при эксплуатации, а также сложность изготовления U-образных уплотнителей. К плоским соединениям со вставными элементами относятся также соединения с наведенной упругостью, рассмотренные в § 4.

Канавочно-клиновые соединения благодаря высокой надежности герметичности стыка, удобству сборки и обслуживания получили широкое распространение в вакуумной технике и применяются при диаметрах условных проходов от 10 до 630 мм.

Уплотняющий профиль канавочно-клинового соединения (рис. 17, *a*, *б*) представляет собой клиновидный выступ 1 на одном фланце 2 и V-образную канавку 4 на другом 5. Заплечики 6, выполненные у основания высту-

па, являются прижимами, удерживающими уплотнитель 3 при герметизации, что ограничивает его растекание в зоне стыка и способствует надежной работе соединения при термоциклировании. Натекание через стык канавочно-клинового уплотнения не превышает $5 \cdot 10^{-9}$ л·Па/с, а удельные усилия герметизации при использовании различных уплотнителей равны от 40 до 330 Н/мм (табл. 3).

Таблица 3. Основные характеристики канавочно-клиновых разъемных соединений

Материал уплотнителя	Толщина уплотнителя, мм	Рабочая температура, °С	Удельное усилие герметизации, Н/мм
Свинец	0,6	150	44
Алюминий	0,2	200	330
	1,0		58
Медь + серебро	0,5	450	210
Медь	0,4		330
	0,5		260
	0,6		280
Никель	0,1	600	97
	0,3		283

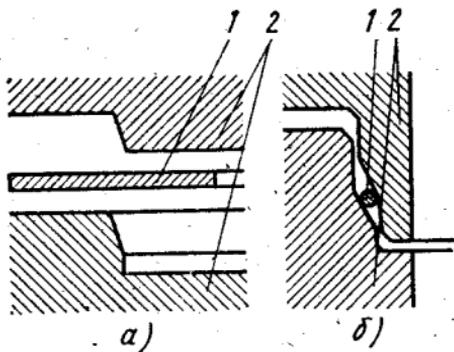
Примечание. Домрачев С. Н., Моисеев В. Я., Саксаганский Г. Л. Конструирование разъемных вакуумных соединений с металлическими уплотнителями. «Электронная техника», серия 4, вып. 3, 1975.

Канавочно-клиновые соединения сохраняют работоспособность и герметичность после многих циклов прогрева. Соединения с медными уплотнителями, кроме того, надежны в эксплуатации при температурах до -196°C .

Недостатками этих соединений являются: жесткие допуски на размеры посадочных мест и уплотняющего профиля; сложность контроля геометрии профиля; наличие в пространстве между выступом и дном канавки замкнутого объема, который при определенных условиях может стать источником газовой выделенной; большие габариты и масса фланцев, а также их несимметричность,

что не удовлетворяет требованиям, предъявляемым к разъемным сверхвысоковакуумным соединениям.

Конические соединения бывают с уплотнителем и без него. Наибольшее распространение получили конические соединения с плоскими и проволочными уплотнителями (рис. 18, а, б). Несущая способность крепежа таких соединений снижена вследствие небольшого угла конусности, в результате чего осевая составляющая усилия герметизации, создаваемого стяжными элементами, намного меньше нормальной, действующей на уплотнительную пару.



В конических соединениях с плоским уплотнителем (рис. 18, а) используются прокладки толщиной 0,125—0,5 мм. Угол конусности уплотняющего профиля составляет 10—15°. В конических соединениях с проволочным уплотнителем (рис. 18, б) угол конусности равен

Рис. 18. Конические соединения:

а — с плоским уплотнителем, б — с проволочным; 1 — уплотнитель, 2 — фланцы

20—30°. Для удобства монтажа соединений уплотнитель должен быть меньше номинального диаметра посадочной выточки, на которую его натягивают.

Основные характеристики конических соединений приведены в табл. 4.

Обеспечение герметичности стыка при малых усилиях герметизации является основным преимуществом конических уплотнений. Однако этим соединениям присущи недостатки, главный из которых — их высокая чувствительность к прогреву. Образующийся при этом перепад температур между наружными и внутренними частями фланцев обуславливает ослабление натяга стыкуемых элементов соединения в зоне уплотнения, что приводит к разгерметизации стыка. Кроме того, для них характерны растекание материала уплотнителя в зоне стыка, а также большая толщина и несимметричность фланцев. Конические соединения требуют изготовления деталей по жестким допускам. Незначительные отклонения диаметров охватывающего и охватываемого конусов приводят к значительной просадке деталей соедине-

Т а б л и ц а 4. Основные характеристики конических
разъемных соединений

Материал уплотнителя	Угол конусности	Диаметр уплотните- ля, мм	Рабочая темпе- ратура, °С	Удельное усилие гер- метизации, Н/мм
Алюминий	20°	1,5	200	49
	30°	2,0		72
Медь + индий	20°	1,5 2,0	200	32 52
	30°	1,5 2,0		35 57
Медь + свинец	20°	1,5 2,0	250	52 68
	30°	1,5 2,0		84 105
Медь + серебро	20°	1,5 2,0	450	96 154
	30°	1,5 2,0		88 100
Медь	20°	1,5 2,0	450	92 90 150
	30°	1,5 1,6 2,0		92 90 150
Серебро	20°	1,0 1,5 2,0	600	42 73 100
	30°	1,0 1,5 2,0		62 70 100

См. примечание к табл. 3.

ния по оси и недостаточной деформации уплотнителя. Для устранения отмеченных недостатков конические соединения выполняют такой конфигурации, чтобы уплотнитель деформировался в замкнутом объеме, как, например, это сделано в конических соединениях с дифференциальным углом (рис. 19). В таких соединениях фланец 3 имеет буртик сечением в виде прямоугольно-

го треугольника и углом наклона конической уплотняемой поверхности к плоскости разъема 18° , а фланец 1 — впадину такого же сечения, но с углом наклона уплотняемой поверхности 25° . Центрируются фланцы относительно друг друга по боковым наружным поверхностям выступа и впадины. В качестве уплотнителя использует-

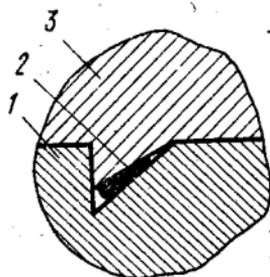


Рис. 19. Коническое соединение с дифференциальным углом:

1, 3, — фланцы, 2 — уплотнитель

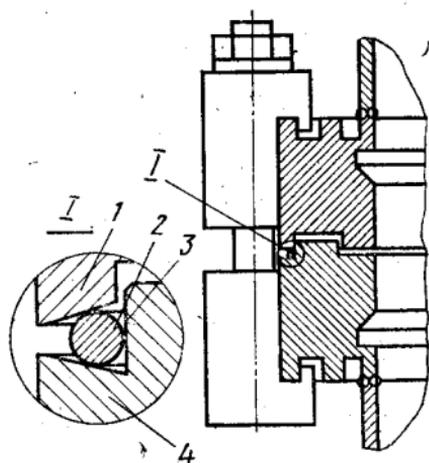


Рис. 20. Коническое соединение Уилера:

1, 4 — фланцы, 2 — уплотнитель, 3 — кольцевой выступ

ся плоская медная прокладка 2 толщиной 0,6—0,8 мм. Испытания показали возможность двух-трехкратного использования уплотнителя. Основные размеры соединений с дифференциальным углом приведены в табл. 5, а их обозначения были даны на рис. 1, а.

Недостатками соединения с дифференциальным углом являются несимметричность фланцев и сложность замены уплотнителя во время эксплуатации.

Таблица 5. Основные размеры, мм, соединений с дифференциальным углом

D_y	D	D_0	l	Число шпилек, шт.	Размер шпильки
63	105	88	9	8	M8
100	150	132	9	12	M8
210	250	235	12	20	M10

В коническом соединении Уилера (рис. 20) проволочный уплотнитель 2 деформируется в объеме, образованном скошенными под углом 20° , направленными навстречу друг другу уплотняемыми поверхностями фланцев 1 и 4 и центрирующим уплотнителем кольцевым выступом 3, выполненным на фланце 4. При этом растекание уплотнителя ограничено, что повышает надежность герметичности стыка при прогревах. Недостатками такого соединения являются несимметричность фланцев, наличие в зоне уплотнения замкнутого газового объема, а также неудобство установки и снятия (извлечения) уплотнителя. Конические соединения Уилера применяются при диаметрах условного прохода более 250 мм. Основные размеры конических соединений Уилера приведены в табл. 6 (см. рис. 8, б).

Таблица 6. Основные размеры, мм, соединений Уилера

D_y	D	D_0	l	Число болтов, шт.
248	314	288	29	24
298	371	345		32
348	438	399	33	36
399	497	454		
451	562	529	44	40
603	689	656		
902	1040	1010		60

Коническое сверхвысоковакуумное разъемное соединение с симметричными фланцами и центрирующим кольцом было показано на рис. 1, а, а его уплотняющий профиль приведен на рис. 21. Между двумя симметричными фланцами 1 (см. рис. 1, а) с плоскими уплотняемыми поверхностями, выполненными в виде конических фасок, размещается уплотнитель 2 толщиной 2—3 мм, который насажен на центрирующее кольцо 3, имеющее прорези для удаления газов при откачке. Фланцы стягиваются болтами 5 и гайками 4, под которыми расположены пружинные шайбы 6. Основные размеры фланцев приведены в табл. 7.

В угловых соединениях фасонный или проволочный уплотнитель размещается в угловой проточке одного из фланцев. Угловые соединения с фасонным уп-

Таблица 7. Основные размеры, мм, симметричных фланцев конического соединения

D_y	D	D_0	l	Число болтов, шт.	Размер болтов
25	55	40	10	4	M6
40	70	55		6	M8
63	105	90	12	8	M10
100	150	130	14	12	
160	210	190	18	16	
250	300	280	16	24	

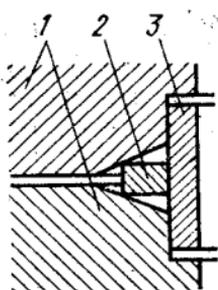


Рис. 21. Коническое соединение с симметричными фланцами:

1 — фланцы, 2 — уплотнитель, 3 — центрирующее кольцо

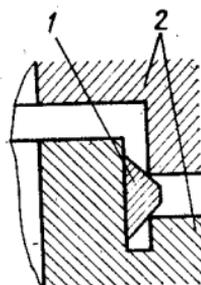


Рис. 22. Угловое соединение с фасонным уплотнителем:

1 — уплотнитель, 2 — фланцы

уплотнителем 1 (рис. 22) применяют при диаметрах условного прохода до 50 мм и прогреве до 250°С. Основным недостатком их является наличие под уплотнителем пространства, которое при эксплуатации может стать источником газовой выделения. Помимо фасонных уплотнителей в угловых соединениях применяют проволоочные (рис. 23, а, б). Для надежной герметизации деформация уплотнителя 1 должна составлять 40—50%. Радиальный зазор между уплотняемыми поверхностями фланцев 2 в различных соединениях колеблется от 0,025 до 0,125 мм.

Основными недостатками таких соединений являются несимметричность фланцев, заедание их при демонтаже

вследствие перекосов и очень малого радиального зазора, жесткие допуски на размеры посадочных мест, сложность извлечения отработавшего уплотнителя.

Ступенчатые соединения бывают с зазором между уплотняемыми поверхностями фланцев 1 и 3, когда уплотнитель работает на срез (табл. 8), и с перекрытием их, когда уплотнитель работает на смятие (рис. 24, а, б). Основные характеристики ступенчатых соединений с зазором приведены в табл. 8.

Ступенчатые соединения в ос-

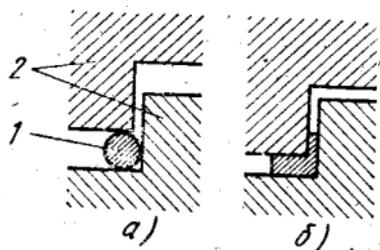


Рис. 23. Угловое соединение с проволочным уплотнителем до герметизации (а) и после нее (б):

1 — уплотнитель, 2 — фланцы

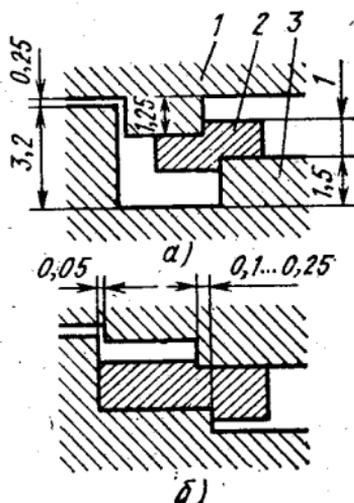


Рис. 24. Ступенчатые соединения с уплотнителем, работающим на срез (а) и на смятие (б):

1, 3 — фланцы, 2 — уплотнитель

новном применяют для герметизации разъемов с небольшим диаметром условного прохода. Наиболее распространены соединения с уплотнителем, работающим на смятие. Номинальное перекрытие ступеней уплотняющего профиля $0,25$ мм с каждой стороны. Толщина фланцев при D_y до 40 мм составляет $23,4$ мм, а при D_y до 150 мм — 42 мм. Глубина смятия при уплотнении ($0,25 \pm \pm 0,05$) мм. Основное преимущество ступенчатых соединений — простота конструкции уплотняющего профиля, а их недостаток — необходимость высокой точности изготовления как уплотняющего профиля, так и уплотнителя, особенно по толщине. Неточности при их изготовлении или реставрации обуславливают увеличение площади стыка и, следовательно, усилия герметизации, что в итоге приводит соединение к выходу из строя. Необходимо отметить также растекание уплотнителя в зоне стыка и быстрый износ граней уплотняющего профиля.

Таблица 8. Основные характеристики ступенчатых соединений, работающих на срез

Уплотнитель		Рабочая температура, °С	Усилие герметизации, Н/мм
материал	толщина, мм		
Алюминий	0,5	200	29
	0,8		35
Медь	0,5	450	77
	0,8		110
	1,5		147

См. примечание к табл. 3.

В соединениях с профилированным выступом большое значение имеет его форма. Острый выступ разрезает уплотнитель, а тупой требует для герметизации больших сжимающих усилий. Графический анализ и экспериментальная проверка для уплотнений

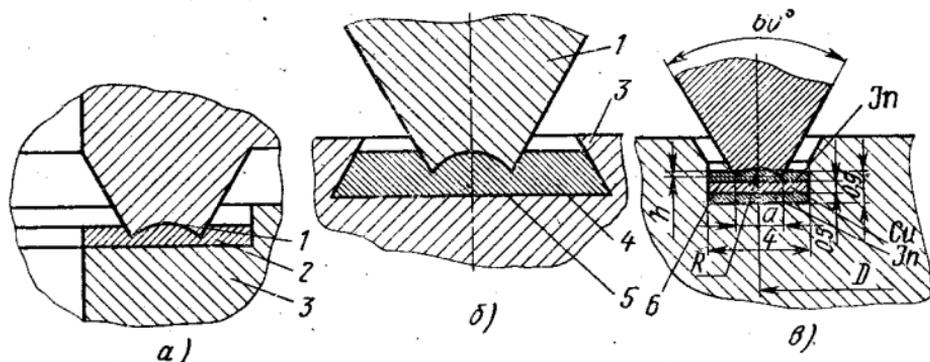


Рис. 25. Соединения с профилированным выступом:

a — с медным уплотнителем; *б* — с запрессованным индиевым, *в* — с армированным; 1, 3 — фланцы, 2, 4, 6 — медный, индиевый и армированный уплотнитель, 5 — канавка

показали, что наилучшей формой поперечного сечения выступа является трапеция с вогнутым основанием. Уплотняющий профиль с выступом такой формы называют серповидным (рис. 25, *a—в*). При герметизации серповидный профиль фланца 1, внедряясь в уплотнитель 2, захватывает своей вогнутой частью уплотняющий

материал и не позволяет ему растекаться, что обеспечивает надежную герметичность стыка. При использовании медных (рис. 25, а) и алюминиевых уплотнителей толщиной 0,3—0,5 мм серповидный профиль должен иметь следующие размеры: радиус $R = 3,5$ мм и глубину вогнутой части $h = 0,15$ мм; ширину уплотняющего профиля $a = 2$ мм. Для медных уплотнителей удельное усилие герметизации составляет 400—500 Н/мм, а для алюминиевых — 300—450 Н/мм. При использовании в качестве уплотняющего материала индия (рис. 25, б) серповидный профиль обеспечивает надежную герметичность стыка при удельных усилиях герметизации до 50 Н/мм.

Фланец 3, на который помещается уплотнитель, представляет собой в большинстве случаев плоскость, что не требует жестких допусков по посадочным местам и уплотняющим профилям. Достоинством соединений с серповидным профилем является возможность многократного использования уплотнителя (при повторном использовании его переворачивают). Соединения с профилированным выступом широко используются в уплотнительных парах цельнометаллической вакуумной арматуры.

Основным недостатком фланцевых соединений с одним профилированным выступом является несимметричность фланцев, а соединений с серповидным профилем — возможность образования под его вогнутой частью кармана, который может стать источником длительного газовыделения.

В соединениях с встречными выступами герметичность стыка достигается при вдавливании уплотняющих выступов в тело относительно толстого (1—2 мм) уплотнителя, который, деформируясь, заполняет микронеровности уплотняемых поверхностей. Соединение с встречными выступами, сечение которых представляет собой равносторонний треугольник, было показано на рис. 6. Угол наклона боковых граней выступов $\alpha = 30 \div 45^\circ$, а высота их $h = 0,6 \div 2$ мм. Грани вершин выступов либо слегка притупляют, либо закругляют.

В уплотнении типа «Conflat» (рис. 26 и 8, а) плоский медный уплотнитель толщиной 2 мм сжимается между

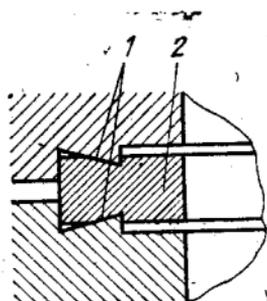


Рис. 26. Соединение типа «Conflat»:

1 — кольцевые встречные выступы,
2 — уплотнитель

фланцами, имеющими кольцевые выступы 1 с сечением в виде прямоугольного треугольника и углом при вершине около 70° . Одна грань выступа перпендикулярна плоскости фланца. Основные размеры соединений типа «Conflat» (см. рис. 8, а) приведены в табл. 9.

Таблица 9. Основные размеры, мм, соединений типа «Conflat»

D_y	D	D_0	l	Число бол- тов, шт.
38	70	59	13	6
51	86	72	17	8
64	114	92	19	8
102	152	130	21	16
152	203	181	24	20
203	254	232	25	24

Недостатками соединений типа «Conflat» являются необходимость высокой точности изготовления фланцев и ограниченная возможность применения при диаметрах условных проходов более 250 мм или некруглых проходах.

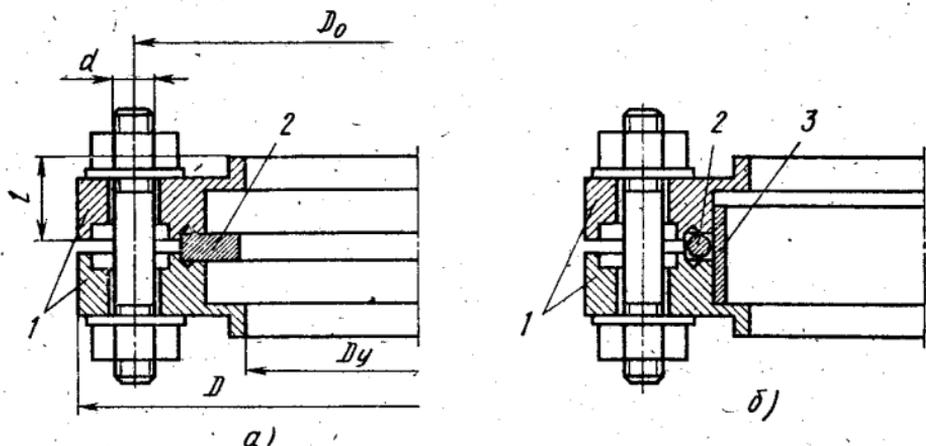


Рис. 27. Соединения с комбинированным профилем:

а — с плоским уплотнителем, б — с проволочным; 1 — фланцы, 2 — уплотнитель, 3 — центрирующее кольцо

В последнее время разработаны новые малогабаритные сверхвысоковакуумные разъемные соединения с комбинированным профилем, фланцы которых симметричны, просты в изготовлении и по габаритам и массе соответствуют международным стандартам. Эти соеди-

нения могут иметь как плоские уплотнители 2 толщиной 2 мм (рис. 27, а), так и проволочные диаметром 2—2,5 мм (рис. 27, б). При использовании плоских уплотнителей фланцы 1 центрируются уплотнителем 2, а герметизация происходит по внутренней трапецеидального сечения кромке канавки. Проволочный уплотнитель центрируется кольцом 3, которое одновременно центрирует фланцы относительно друг друга. Герметизация происходит по боковым поверхностям канавок, между которыми размещен уплотнитель. При диаметрах условных проходов до 100 мм рекомендуются плоские уплотнители, а для больших — проволочные.

Основные размеры соединений с комбинированным профилем приведены в табл. 10.

Таблица 10. Основные размеры, мм, соединений с комбинированным профилем

D_y	D	D_0	i	Число шпилек, шт.	Размер шпилек
10	45	30	17	4	М6
16	56	42			
20	60	46			
25	63	48			
32	70	58,7	18	8	
40	90	71	19		
50	100	81	21		
63	114	92,1	23		
80	130	111		12	
100	152	130,2		16	М8
125	175	156			
150	202	181	25	20	
160	210	192			
200	253	231,8	24	М10	
250	330	306			

§ 6. СВЕРХВЫСОКОВАКУУМНЫЕ РАЗЪЕМНЫЕ СОЕДИНЕНИЯ С ИНДИЕВЫМИ УПЛОТНИТЕЛЯМИ

Индиевые уплотнители применяют в тех случаях, когда требуется уплотнить стыки сверхвысоковакуумных

разъемных соединений с минимальными усилиями герметизации. Удельные усилия герметизации для соединений с индиевыми уплотнителями составляют от 4 до 57 Н/мм (от 4 до 10 Н/мм — для простых соединений, а большие — для соединений с биметаллическими, армированными и комбинированными уплотнителями). Для многократного использования наиболее пригодны

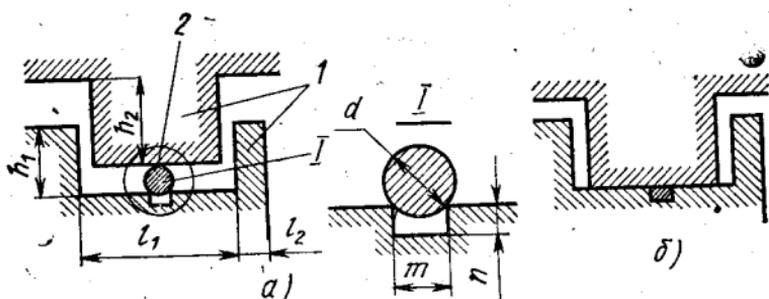


Рис. 28. Фланцевые соединения с проволочным индиевым уплотнителем:

a — до уплотнения, *б* — после уплотнения; *1* — фланцы, *2* — уплотнитель

биметаллические и армированные уплотнители, а также уплотнители, изготовляемые предварительной запрессовкой. При однократном использовании уплотнителя для получения наименьших усилий герметизации уплотняемые поверхности должны иметь высоту шероховатостей 40—80 мкм, а при многократном — 5—8 мкм.

При работе с индиевыми уплотнителями необходимо окончательно контролировать герметичность не ранее чем через 15 мин после стыковки соединяемых элементов и приложения сжимающего усилия. Обычно стыки герметизируют сразу после изготовления уплотнителей. При длительном хранении готовых уплотнителей необходимо создать условия, исключающие окисление индия.

Для герметизации сверхвысоковакуумных разъемных соединений наиболее часто применяют проволочные индиевые уплотнители (рис. 28, *a*, *б*), основные размеры которых приведены в табл. 11. Выступ прямоугольной формы и ответную канавку, в которую закладывают уплотнитель *2*, выполняют с допусками по 9-му качеству. Шероховатость стыкуемых поверхностей фланцев *1* должна соответствовать 6-му классу. Удельные усилия герметизации составляют 5—6 Н/мм при ширине зоны стыка 1 мм.

Таблица 11. Основные размеры, мм, индиевых уплотнителей для фланцевых соединений

D_y	h_1	h_2	l_1	l_2	n	m	d
До 100	2	3	5	1	0,3	0,4	0,6
От 100 до 500	2	4	6	2	0,3	0,5	0,8
Более 500	3	5	8	2	0,4	0,6	1,0

Недостатком таких соединений является однократность использования уплотнителя, так как при демонтаже его целостность, как правило, нарушается.

Быстроразъемное фланцевое соединение с индиевым уплотнителем фирм «Balzers» и «VAT», которое было показано на рис. 7, может прогреваться до 100°C , радиационно стойко и используется для диаметров условных проходов от 10 до 50 мм (табл. 12).

Таблица 12. Основные размеры, мм, быстроразъемных фланцевых соединений с индиевым уплотнителем

D_y	A	B	C
10—16	32	18	30
20—25	42	28	40
32—40	57	43	55
50	77	63	75

Уплотнения для вакуумных клапанов, имеющих диаметры условных проходов 100, 260, 380 и 500 мм, с ограничением растекания индия из зоны стыка показано на рис. 29. Канавка 2 в уплотняющем диске 1 имеет глубину 2 мм, угол при вершине 60° . Высота выступа седла 4 равна 5 мм, а его угол заострения составляет 58° . В выступе протачивается прямоугольная выточка шириной 1,2 мм и глубиной 1,5—2 мм, в которую помещается индиевый уплотнитель. Герметизация стыка происходит при выдавливании индия в результате упругой деформации кромок выступа при его сопряжении с боковыми стенками канавки. Индий оказывается в замкнутом пространстве и под действием приложенных сил перекрывает газопроводящие каналы в зоне уплотнения.

Сверхвысоковакуумное разъемное соединение с запрессованным индиевым уплотнителем было показано

на рис. 25, б. Канавка 5 под индиевый уплотнитель 4 имеет ширину 3,4 мм, глубину 1 мм и угол наклона боковых стенок 15°. Серповидный выступ 1 высотой 4 мм имеет угол заострения 60°, глубину радиусной проточки 0,15 мм и ширину 1 мм. Такое уплотнение позволяет многократно (не менее 5 раз) герметизировать стык без

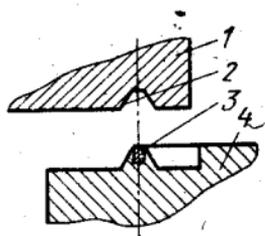


Рис. 29. Индиевое уплотнение для вакуумных клапанов:

1 — уплотняющий диск,
2 — канавка, 3 — индиевый уплотнитель,
4 — седло

смены уплотнителя при удельных усилиях герметизации порядка 4 Н/мм.

Армированные уплотнители с пластичными внешними слоями и упругой сердцевинной обеспечивают сохранение постоянного напряженного контакта элементов соединения по уплотняемым поверхностям (см. рис. 25, в). Армированные уплотнители надежны в работе и удобны в эксплуатации при температуре $\pm 120^\circ\text{C}$. Удельные усилия герметизации 25—48 Н/мм.

При использовании индиевых уплотнений в соединениях с автоматическим приводом отношение массы движущихся деталей (приведенной к плоскости разъема) к периметру уплотнения не должно превышать $m = \sum_1^n M_i / l_{\text{упл}} = 1$ г/мм (где M_i — масса одной детали; n — количество деталей; $l_{\text{упл}}$ — периметр уплотнения).

В уплотнительных парах малогабаритной вакуумной арматуры при конической форме клапанов иногда используют комбинированные индиево-фторопластовые уплотнители, представляющие собой чередующиеся спрессованные индиевые и фторопластовые прокладки, соответственно толщиной 1 и 0,7 мм. Такие уплотнения позволяют многократно герметизировать стыки проходов диаметром до 5 мм.

§ 7. СВЕРХВЫСОКОВАКУУМНЫЕ РАЗЪЕМНЫЕ СОЕДИНЕНИЯ С РАСПЛАВЛЯЕМЫМИ УПЛОТНИТЕЛЯМИ

Герметизация сверхвысоковакуумных разъемных соединений с расплавляемыми уплотнителями основана на адгезионном взаимодействии легкоплавкого металла-уплотнителя и твердых уплотняемых поверхностей. При постепенном заполнении расплавленным металлом-уп-

лотнителем микронеровностей уплотняемых поверхностей в результате смачивания происходит перекрытие газопроводящих каналов и после охлаждения образуется твердофазное герметичное соединение. Для разгерметизации стыка металл-уплотнитель необходимо расплавить.

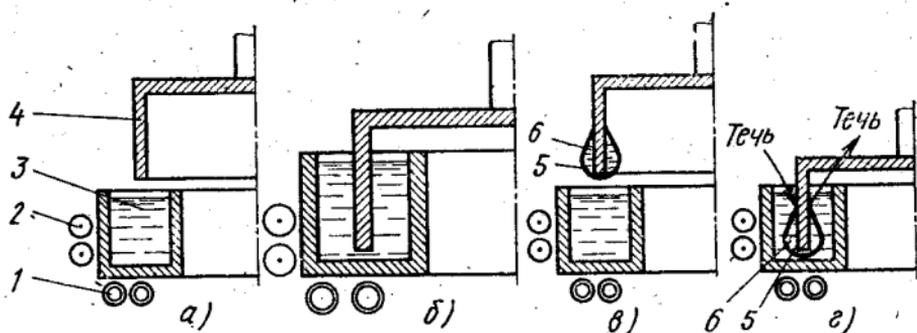


Рис. 30. Сверхвысковакуумное разъемное соединение с расплавляемым металлом-уплотнителем:

a — перед первой герметизацией, *б* — загерметизированное, *в* — разгерметизированное, *г* — повторно загерметизированное; 1 — система охлаждения, 2 — электроннагреватель, 3 — металл-уплотнитель, 4 — уплотнительный диск, 5 — оксидная пленка, 6 — слой полуды

Герметичность соединений зависит не только от выбранных металлов-уплотнителей, характеристики которых были приведены в табл. 1 и 2, но и от предварительной подготовки герметизируемых поверхностей — механической обработки и очистки. Смачиваемость тем лучше, чем меньше шероховатость герметизируемых поверхностей и чем они чище.

Для соединений с расплавляемым металлом-уплотнителем важной является первая герметизация, в результате которой на уплотняемых поверхностях образуется тонкое покрытие из металла-уплотнителя. Первую герметизацию (рис. 30, *a*, *б*) выполняют в вакууме при давлении не более 10^{-4} Па, при этом шероховатость уплотняемых поверхностей должна быть не хуже 7-го класса. Режим первой герметизации обеспечивает хорошее адгезионное взаимодействие расплавленного металла-уплотнителя и твердых уплотняемых поверхностей. При многократной герметизации на покрытии уплотняемых поверхностей в результате контакта с остаточной газовой средой вакуумного объема или атмосферой образуется оксидная пленка (рис. 30, *в*), которая в дальнейшем может служить причиной появления течей

(рис. 30, з). Сверхвысоковакуумные соединения, имеющие уплотнители из расплавленного металла и защиту герметизируемых поверхностей от окисления или с разрушением образовавшейся на них оксидной пленки, либо с уплотнителями из неокисляемых материалов, лишены этого недостатка. Такие разъемные соединения могут иметь горизонтальную или произвольную ориентацию в пространстве.

Сверхвысоковакуумные разъемные соединения с расплавленным металлом-уплотнителем и защитой герметизируемых поверхностей от окисления (рис. 31) имеют защитное кольцо 3, предохраняющее поверхности уплотнительного диска 5 от возможного контакта в разгерметизированном положении с атмосферой, а следовательно, от окисления. Разъемное соединение такого типа*, применяемое для уплотнения рабочего объема установок с колпаком, показано на рис. 32. Колпак состоит из герметизируемых уплотнителями 3 и 7 наружной оболочки 9 и уплотнительного экрана 1, между которыми расположен нагреватель 10 для обезгаживания поверхностей.

Для герметизации разъемного соединения через штуцер 6 или зазор между металлом-уплотнителем 3 и торцом уплотнительного экрана 1 откачивают полость 13. При этом наружная оболочка 9 уплотняется атмосферным давлением. Затем металл-уплотнитель нагревают в вакууме до температуры на 50—100°С выше его температуры плавления и после расплавления опускают в него уплотнительный экран 1 с защитным кольцом 8. Опорный диск кольца 8 упирается в неподвижную стенку корпуса установки, а экран 1 опускается ниже так, что между его торцом и защитным кольцом образуется зазор 3—4 мм. После опускания уплотнительного экрана в крайнее нижнее положение металл-уплотнитель охлаждают и при температуре 50—60°С в один из объемов, расположенных внутри или снаружи экрана 1, может напускаться атмосферный воздух.

Подъем и опускание колпака осуществляют приводом с помощью штока 11, уплотненного сильфоном. Привод позволяет перемещать уплотнительный экран относительно наружной оболочки, а также поднимать их вместе после напуска в рабочий объем атмосферного воздуха.

* Данилов К. Д. «Приборы и техника эксперимента» № 2, 1981 г.

При разгерметизации колпака объемы, расположенные по обе стороны уплотнительного экрана, откачивают до давления не менее 10 Па, расплавляют металл-

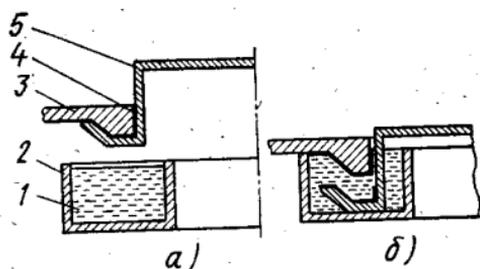


Рис. 31. Сверхвысоковакуумное разъемное соединение с расплавляемым металлом-уплотнителем и защитой герметизируемых поверхностей от окисления:

a — в открытом положении, *b* — в закрытом; 1 — металл-уплотнитель, 2 — кольцевая ванна, 3 — защитное кольцо, 4 — слой полуды, 5 — уплотнительный диск

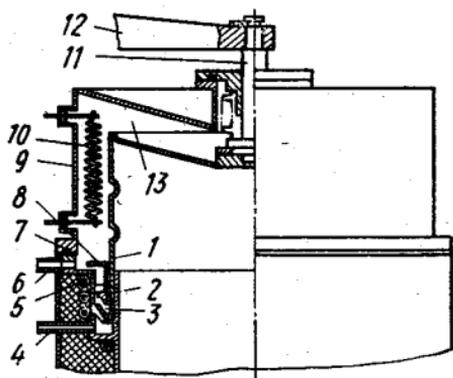


Рис. 32. Сверхвысоковакуумное быстроразъемное соединение:

1 — уплотнительный экран, 2 — ванна; 3 — металл-уплотнитель, 4, 6 — штуцера змеевика водяного охлаждения и форвакуумной откачки, 5, 10 — электронагреватели, 7 — уплотнитель, 8 — защитное кольцо, 9 — наружная оболочка колпака, 11 — шток, 12 — кронштейн, 13 — полость

уплотнитель и поднимают экран, внутренняя уплотнительная поверхность которого, находясь в расплавленном уплотнителе, входит в контакт с поверхностью защитного кольца. Дальнейший подъем осуществляется вместе с кольцом до разгерметизации соединения. После этого металл-уплотнитель охлаждают. Таким образом, в разгерметизированном состоянии поверхность уплотнительного экрана защищена от соприкосновения с газами защитным кольцом, что способствует надежной герметизации при повторном уплотнении.

Сверхвысоковакуумное фланцевое соединение с защитой герметизируемых поверхностей от окисления, работающее при произвольной ориентации в пространстве*, показано на рис. 33, *a*, *b*. В этом соединении расплавляемый металл-уплотнитель и герметизируемые им поверхности не контактируют с атмосферой и, следова-

* Александрова А. Т., Соломатин В. Ф. Авт. свид. № 1000659 от 1982 г.

тельно, не окисляются, что способствует надежной герметизации. Соединение (рис. 33, а) состоит из верхнего фланца 1 с накидной гайкой 14 и нижнего фланца 10 с герметично закрепленной обечайкой 11, имеющей внеш-

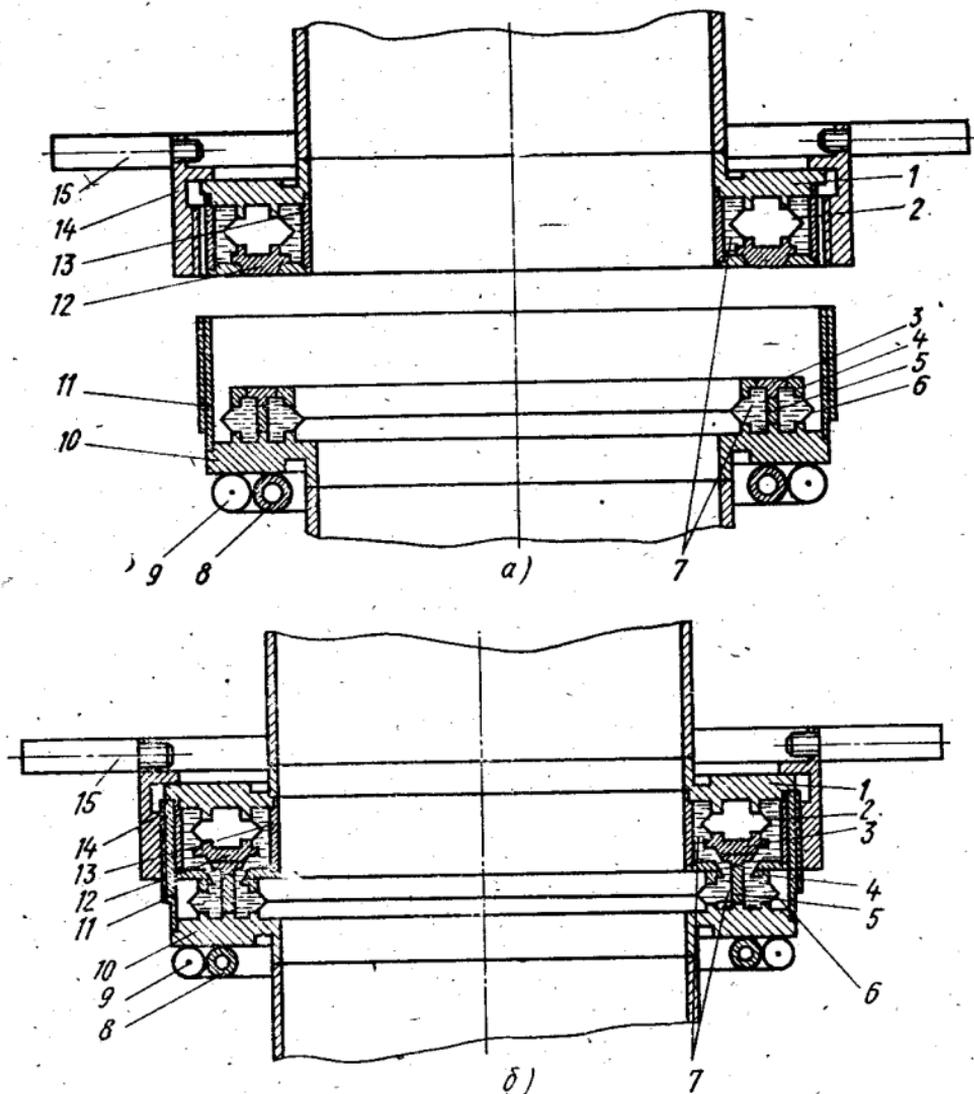


Рис. 33. Разъемное фланцевое соединение с защитой герметизируемых поверхностей от окисления, работающее при произвольной ориентации в пространстве:

а — в открытом положении, б — в закрытом; 1, 10 — нижний и верхний фланцы, 2, 6 — полые упругие оболочки, 3, 12 — клапаны, 4 — подвижный диск, 5 — кольцо, 7 — металл-уплотнитель, 8 — система охлаждения, 9 — нагреватель, 11 — обечайка, 13 — кольцевая емкость, 14 — гайка, 15 — ручка

нюю резьбовую поверхность. На фланце 1 концентрично проходному отверстию размещена герметичная кольцевая емкость 13, внутри которой расположен подвиж-

ный кольцевой клапан 12, герметично соединенный с фланцем 1 поллой упругой оболочкой 2 и уплотняющий кольцевое отверстие торца емкости 13. Полость между кольцевой емкостью и упругой оболочкой заполнена металлом-уплотнителем 7.

На фланце 10 напротив емкости 13 размещена вдоль оси проходного отверстия подвижная герметичная кольцевая ванна, образованная поллой упругой оболочкой 6, герметично соединенной с одной стороны с фланцем 10, а с другой — с подвижным диском 4, имеющим кольцевое отверстие, уплотненное неподвижным клапаном 3, размещенным внутри оболочки 6. Полость ванны заполнена металлом-уплотнителем.

При герметизации фланцевого соединения гайку 14 навинчивают ручкой 15 на обечайку 11 до тех пор, пока торец емкости 13 нижнего фланца 1 войдет в плотный контакт с диском 4 верхнего фланца 10. При этом металл-уплотнитель, находящийся в емкости 13 и кольцевой ванне в твердом состоянии, препятствует перемещению подвижных клапана 12 и диска 4.

Затем электронагревателем 9 расплавляют металл-уплотнитель 7, вследствие чего появляется возможность перемещения клапана 12 и диска 4, и продолжают навинчивать гайку 14 на обечайку 11. При этом торец емкости 13, воздействуя на подвижный диск 4, опускает его, сжимая упругую оболочку 6, а клапан 3 поднимает клапан 12, сжимая упругую оболочку 2. В результате в кольцевой зазор (рис. 33, б) из кольцевой емкости 13 и кольцевой ванны начинает поступать чистый неокисленный металл-уплотнитель 7, что приводит к образованию надежного герметичного соединения. Сжатие кольцевых упругих элементов 2 и 6 происходит до тех пор, пока обечайка 11 не упрется в ограничительный буртик на верхнем фланце 1. При этом прекращают навинчивать гайку 14 на обечайку 11, нагреватель 9 выключается и включается система охлаждения 8. Разгерметизацию фланцевого соединения выполняют в обратной последовательности.

Сверхвысоковакуумное разъемное соединение с расплавляемым металлом-уплотнителем и разрушением на герметизируемых поверхностях образовавшейся оксидной пленки* пока-

* Назаров Л. Н., Соломатин В. Ф. Авт. свид. № 806974 от 1961 г.

зано на рис. 34. При герметизации такого соединения под действием сил гидростатического давления расплавленный металл-уплотнитель 1 перетекает из кольцевой ванны 2 в кольцевой объем уплотнительного диска 4. В результате металл-уплотнитель 1 заполняет свободный объем во внутреннем сосуде уплотнительного диска 4 и на поверхности металла-уплотнителя, располо-

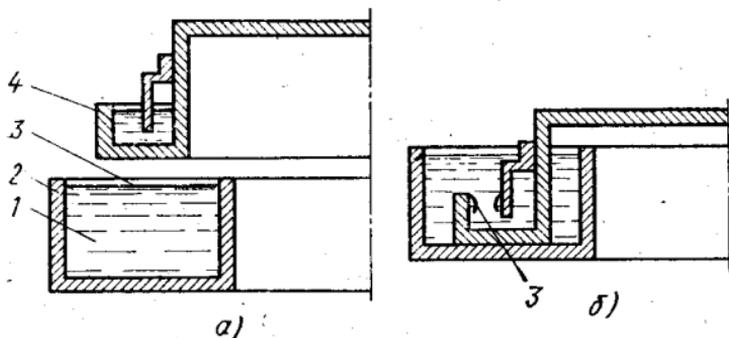


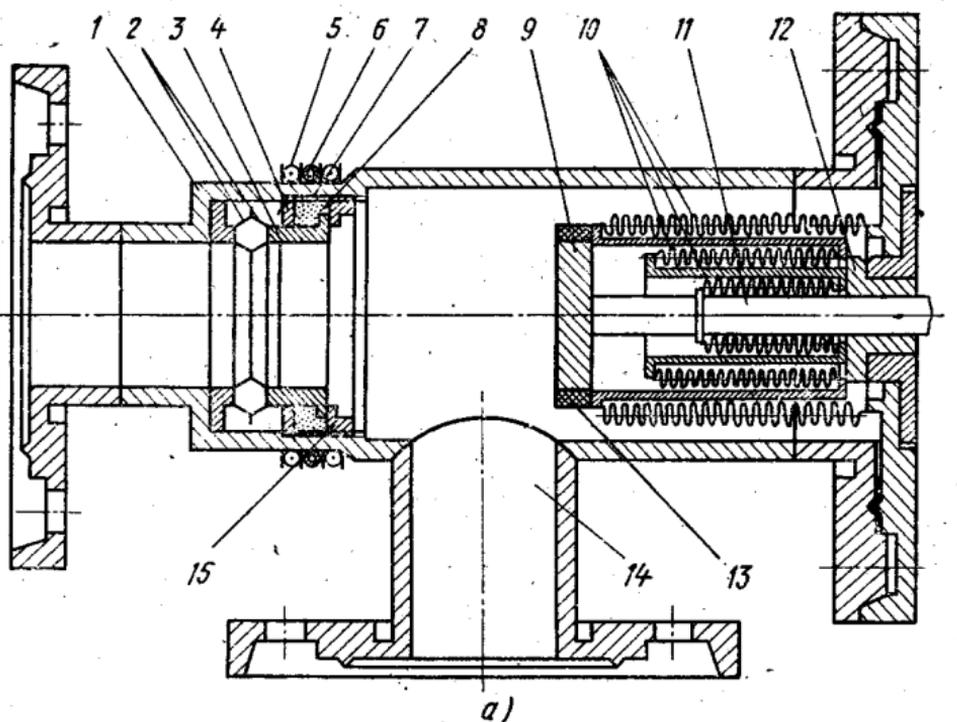
Рис. 34. Разъемное сверхвысоковакуумное соединение с разрушением оксидной пленки:

а — в открытом положении, *б* — в закрытом; 1 — металл-уплотнитель, 2 — ванна, 3 — оксидная пленка, 4 — уплотнительный диск

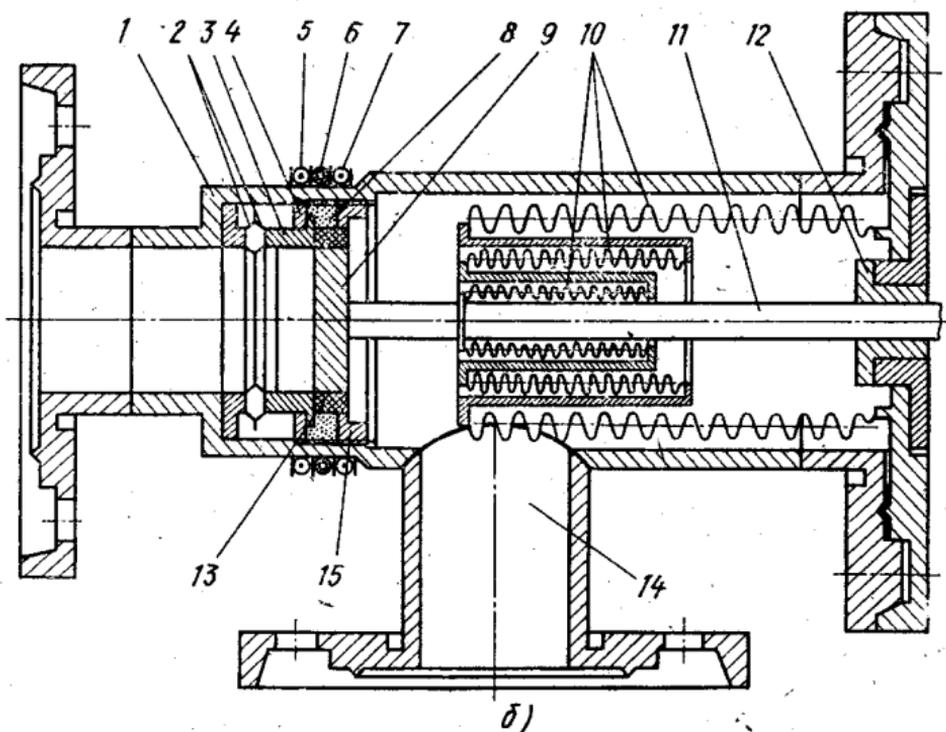
женного во внешнем сосуде, оксидная пленка 3 разрывается. При этом происходит контакт чистого неокисленного металла-уплотнителя в кольцевой ванне 2 с чистым неокисленным металлом-уплотнителем в кольцевом объеме уплотнительного диска, что позволяет многократно воспроизводить надежную герметизацию.

Клапанное соединение с разрушением оксидной пленки, работающее при произвольной ориентации в пространстве, показано на рис. 35. Для герметизации клапана включают нагреватель 5, расплавляют расположенный в кольцевой ванне 7 металл-уплотнитель 8 и при воздействии на шток 11 внешнего привода перемещают уплотнительный диск 9 до упора в кольцевой выступ подвижной защитной втулки 3 с подпружиненной системой герметичных упругих мембран 2.

В результате кольцевой выступ защитной втулки 3 начинает перемещаться внутри кольцевой ванны с металлом-уплотнителем 8 и снимает оксидную пленку с его поверхности. При этом кольцевая шайба 13, выполненная из пористого пропитанного металлом-уплотнителем материала (например, пористого никеля) входит в контакт с чистым неокисленным металлом-уплотните-



a)



b)

Рис. 35. Сверхвысоковакуумное клапанное соединение с разрушением оксидной пленки:

a — в открытом положении, б — в закрытом; 1 — корпус, 2 — упругие мембраны, 3 — защитная втулка, 4, 13 — фигурная и кольцевая шайбы, 5 — нагреватель, 6 — система охлаждения, 7 — кольцевая ванна, 8 — металл-уплотнитель, 9 — уплотнительный диск, 10 — силфонные вводы, 11 — шток, 12, 15 — направляющие втулки, 14 — проходное отверстие

лем 8 в кольцевой ванне 7. В конце хода штока перемещение уплотнительного диска 9 ограничивается кольцевым выступом втулки 3, упирающимся в торец шайбы 4.

После этого происходит разогрев и расплавление находящегося в капиллярах пористого материала кольцевой шайбы 13 металла-уплотнителя, который за счет сил объемного расширения вытесняется из пор, разрывая оксидную пленку на ее боковой поверхности. В результате чистый неокисленный металл-уплотнитель 8 в кольцевой ванне 7 контактирует с чистым неокисленным металлом-уплотнителем кольцевой шайбы, что является гарантией создания надежного герметичного соединения. Затем нагреватель 5 выключается и включается система охлаждения 6. Открытие клапана происходит в обратной последовательности.

Кольцевая шайба из пористого материала, пропитанного металлом-уплотнителем, а также оригинальная конструкция ванны обеспечивают надежную работу клапана с уплотнением расплавляемым металлом при произвольной ориентации в пространстве*.

Сверхвысоковакуумные разъемные соединения с уплотнителями из легкоплавких неокисляемых материалов (например, стекла) созданы недавно. По сравнению с соединениями с защитой герметизируемых поверхностей от окисления или разрушением на них оксидной пленки они имеют более простую конструкцию, так как окислительные процессы не влияют на герметичность.

Эксплуатация фланцевых и клапанных соединений с расплавляемым уплотнителем показала их высокую надежность. Суммарное натекание через уплотнительную пару после длительной работы (1000 циклов) составляет $5 \cdot 10^{-10}$ л.Па/с. Отсутствие усилий при герметизации позволяет применять приводы малой мощности и изготавливать корпуса, уплотнительные диски и другие элементы из тонколистовой нержавеющей стали, что существенно снижает габариты и массу сверхвысоковакуумных фланцевых и клапанных соединений. Уплотнительные пары могут быть круглой, прямоугольной, эллипсной формы и допускают прогрев в закрытом положении до 400—450° С.

* Александрова А. Т. и др. Авт. свид. № 974011 от 1982 г.

§ 8. СВЕРХВЫСОКОВАКУУМНЫЕ КЛАПАННЫЕ СОЕДИНЕНИЯ ВАКУУМНОЙ АРМАТУРЫ

Высокие требования, предъявляемые к сверхвысоковакуумным клапанным соединениям, объясняются необходимостью их многократного срабатывания, в том числе при прогревах в закрытом состоянии. При этом усилие герметизации должно быть минимальным, так как от него зависят конструкция и мощность привода, а также габариты и масса клапана. Такие факторы, влияющие на усилие герметизации, как прочностные свойства материалов, площадь и состояние контактируемых поверхностей, а также уплотняющий профиль взаимосвязаны и должны быть учтены наиболее рационально.

Распределение усилия герметизации по контуру стыка должно быть равномерным при каждом цикле срабатывания клапана, так как неравномерность распределения нагрузки приводит к перенапряжению уплотнителя в одних местах и недостаточной нагрузке в других, что обуславливает появление течей. Поэтому необходимо обеспечивать центральное, перпендикулярное плоскости разъема воздействие усилия на уплотнительный диск и не допускать появления усилий, вызывающих смещение уплотняемых элементов относительно друг друга. Для компенсации неточностей изготовления и сборки, а также различных микросмещений, возникающих при эксплуатации клапанов, должна быть предусмотрена возможность самоустановки элементов уплотнительной пары. Значительное влияние на надежность герметизации оказывают такие отклонения формы уплотнительных пар, как неплоскостность, нецилиндричность и несферичность, которые должны быть наименьшими. В ином случае один из элементов уплотнительной пары должен упруго деформироваться.

Элементы уплотнительных пар должны точно центрироваться относительно друг друга, так как многократное воспроизведение герметичности при постоянном усилии герметизации возможно при условии контактирования одних и тех же участков поверхности от цикла к циклу.

Необходимым условием длительной работы уплотнительных пар является постоянство усилия герметизации. Поэтому в клапанах должны быть предусмотрены устройства и элементы для автоматической компенсации возникающих при эксплуатации и отрицательно влияю-

щих на стабильность усилия герметизации термических и механических деформаций.

Материалы элементов уплотнительных пар должны быть строго согласованы по физико-химическим свойствам, так как важным эксплуатационным фактором является прогрев клапанов в закрытом положении (КТР материалов уплотнительных пар должны быть равны или близки по значению). Кроме того, для одинакового рас-

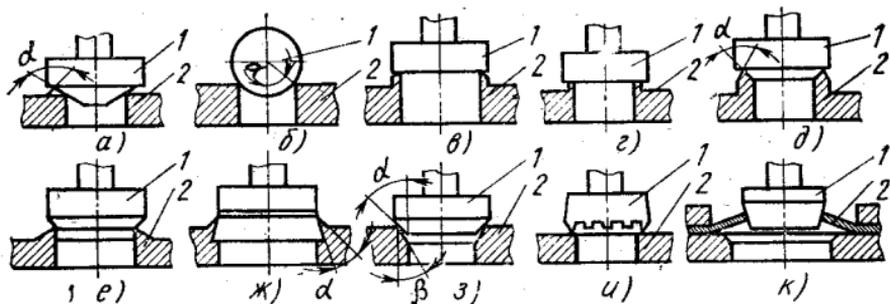


Рис. 36. Уплотняющие профили (а—к) сверхвысоковакуумных цельнометаллических угловых клапанов:

1 — уплотнительный диск, 2 — седло

пределения теплоты седло и уплотнительный диск должны быть согласованы по размерам и массе. При прогреве клапанов в закрытом положении уплотнительные элементы пар не должны схватываться.

Конструкция клапанов должна также обеспечивать простую замену уплотнительного диска и реставрацию седла. В зависимости от взаимного расположения входного и выходного отверстий различают угловые и прямопролетные сверхвысоковакуумные клапаны. В угловых входное и выходное отверстия находятся под углом 90° , а в прямопролетных — на одной оси.

Уплотнительные пары сверхвысоковакуумных цельнометаллических угловых клапанов показаны на рис. 36, а—к. Чаще всего вакуумно-плотный контакт получают при смятии мягкого материала уплотнительного диска (рис. 36, а, в, г, д, з, и). Для уменьшения усилия герметизации профилированный выступ седла заостряют. Однако в клапанах без компенсаторов при повторных уплотнениях площадь контактирования увеличивается, что требует повышения усилия герметизации.

Уплотняющий профиль, показанный на рис. 36, г, обладает тем достоинством, что независимо от глубины внедрения выступа в уплотнительный диск площадь контакта не изменяется, что обеспечивает стабильность усилия герметизации. Уплотнительные пары, показанные на рис. 36, б, к, отличаются самоустановкой стыкуемых элементов. Причем уплотнительная пара, показанная на рис. 36, к, предпочтительнее, поскольку ее седло упруго, а следовательно, более долговечно.

Наименьшие усилия герметизации могут быть получены при разрушении приповерхностного слоя одного из элементов уплотнительной пары профилем другого. При этом более мягкий элемент работает на срез (рис. 36, е, ж). Уплотнительная пара, показанная на рис. 36, ж, предпочтительнее, так как имеет упругое седло.

Уплотнительные пары сверхвысоковакуумных цельнометаллических прямопролетных клапанов показаны на рис. 37, а—л, а их вакуумно-технические характеристики приведены в табл. 13.

Таблица 13. Вакуумно-технические характеристики уплотнительных пар сверхвысоковакуумных цельнометаллических прямопролетных клапанов

Уплотнительная пара	Натекание, л. Па/с	Рабочая температура, °С	Число циклов	Удельное усилие герметизации, Н/мм
Рис. 37, а	10^{-7} — 10^{-8}	300	4500	200
Рис. 37, б	10^{-4}		250	
Рис. 37, в	10^{-8} — 10^{-9}	250	2000—8000	100
Рис. 37, г	10^{-7} — 10^{-8}	300		
Рис. 37, д		400	1000	
Рис. 37, е	10^{-9}	300		50—80
Рис. 37, ж	10^{-8}	250	500	100
Рис. 37, з	10^{-7}		250	80
Рис. 37, и		450	200—600	200—300
Рис. 37, к	10^{-8} — 10^{-9}	120	1000	5—10
Рис. 37, л	10^{-9}	50—200	100—500	—

Особенностью уплотнительной пары, показанной на рис. 37, а, является наличие кольцеобразной проточки 4 на обратной стороне уплотнительного диска 3 с выступом, имеющим золотое пленочное покрытие толщиной 50 мкм. Проточка упруго компенсирует волнистость поверхности уплотнительного диска 3 и седла 1.

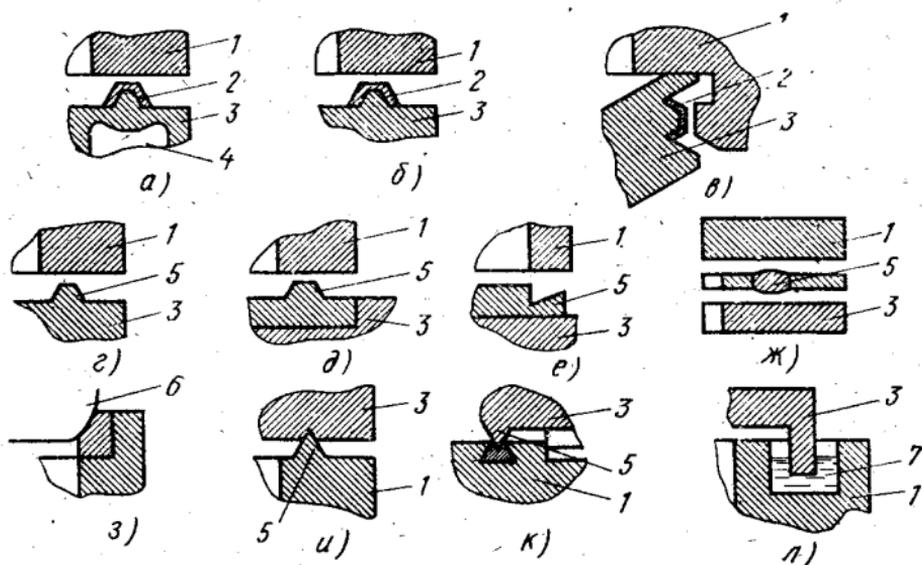


Рис. 37. Уплотнительные пары сверхвысоковакуумных цельнометаллических прямопролетных клапанов:

а, б, в — с пленочным покрытием, г, д, е — с мягкой плоской кромкой, ж — с наведенной упругостью, з — со сферической поверхностью, и, к — с выступом, л — с расплавляемым уплотнителем; 1 — седло, 2 — пленочное покрытие, 3 — уплотнительный диск, 4 — проточка, 5 — выступ, 6 — сферический диск, 7 — расплавляемый металл

Уплотнительная пара с титановым диском 3, имеющим выступ шириной 0,25—0,3 мм, покрытый серебром, и седлом 1 из нержавеющей стали, показанная на рис. 37, б, чувствительна к неплоскости поверхности контакта. Материалы, из которых ее выполняют, значительно отличаются по КТР, что является недостатком.

В уплотнительной паре, показанной на рис. 37, в, на уплотнительном диске 3 по периферии имеется выступ 2, покрытый золотой пленкой толщиной 50 мкм, которым герметизируется цилиндрическая поверхность седла 1 из твердой нержавеющей стали.

В уплотнительных парах, показанных на рис. 37, г, д, е, ж, уплотнительные диски, выполненные из меди или алюминия, отличаются формой выступа. Так как ответная уплотняемая поверхность плоская, соблюдения

большой точности совмещения осей уплотнительного диска 3 и седла 1 при повторных закрытиях клапана не требуется. Однако при прогреве клапана вследствие текучести материала диска герметичность стыка может быть нарушена. При эксплуатации клапанов с такими уплотнительными парами из-за увеличения площади контакта приходится повышать усилия герметизации.

В уплотнительной паре, показанной на рис. 37, з, уплотнительный диск 3 имеет сферическую поверхность б, что обеспечивает небольшие усилия герметизации.

В уплотнительных парах, показанных на рис. 37, и, к, герметизация стыка происходит при внедрении выступа 5 диска 3 в мягкий материал седла 1. Основным недостатком их является нестабильность усилия герметизации при повторных уплотнениях.

Уплотнительная пара, показанная на рис. 37, л, не требует значительных усилий герметизации, так как расплавляемый металл 7, находящийся в ванне седла 1, не оказывает значительного сопротивления уплотнительному диску 3. Однако такое уплотнение обладает большой инерционностью и может работать только в горизонтальном положении.

Как уже отмечалось, габариты и масса клапанов, а также мощность привода зависят от необходимых усилий герметизации уплотнительной пары. Уплотнительные пары с пониженным аксиальным (вдоль оси проходных отверстий) усилием герметизации показаны на рис. 38, а—д. Уменьшение усилия герметизации в уплотнительных парах, показанных на рис. 38, а, б, в, г, обеспечивается специальной формой уплотнительного диска. При приложении к диску осевого аксиального усилия Q создается превышающее его в несколько раз усилие герметизации P .

Особенностью уплотнительной пары, показанной на рис. 38, а, является наличие двузвенного шарнира, состоящего из двух сферических опор 1, и сопряженного с ними компенсатора 2, что позволяет диску самоустанавливаться относительно седла 4 не только при угловом, но и при параллельном смещении осей и значительно повышает надежность работы клапана, а также упрощает его сборку.

В уплотнительной паре *, показанной на рис. 38, б,

* Малышев И. Ф., Моисеев В. Я. Авт. свид. № 440518, 1975 г.

уплотнительный диск 3 имеет глухую диафрагму 5 из меди или алюминия, снабженную выравнивающим кольцом 6, который уплотняется коническим седлом 4.

В уплотнительной паре *, показанной на рис. 38, в, уплотнительный диск 3 с прокладкой 7 соединен со што-

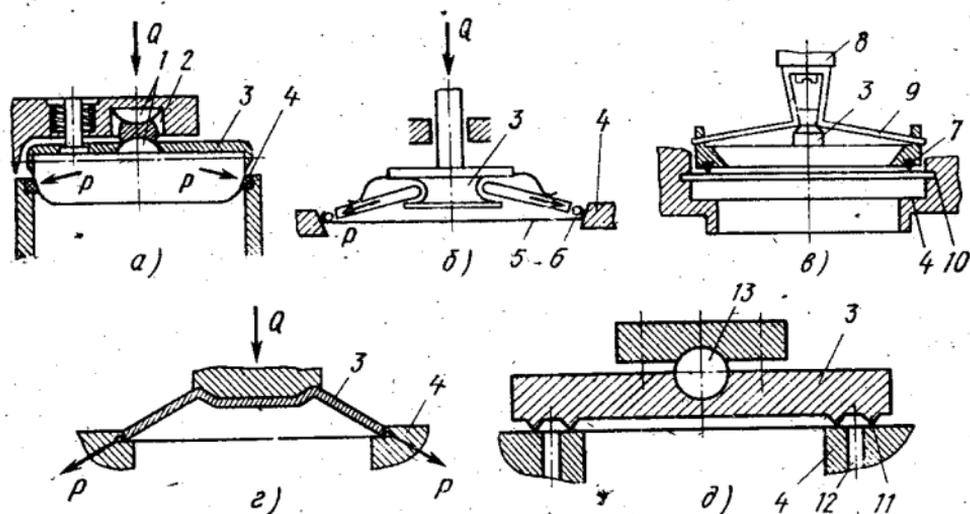


Рис. 38. Уплотнительные пары сверхвысоковакуумных цельнометаллических клапанов с пониженным аксиальным усилием герметизации:

а — сферическая, б, в, г — коническая, д — с промежуточной откачкой; 1 — сферические опоры, 2 — компенсатор, 3 — диск, 4 — седло, 5 — диафрагма, 6 — выравнивающее кольцо, 7 — прокладка, 8 — шток, 9 — пружина, 10 — углубление, 11 — выступ, 12 — канал, 13 — сферический шарнир

ком 8 через плоские пружины 9, которые при уплотнении упираются в углубление 10, и, действуя как рычаги, обеспечивают герметизацию седла 4.

Особенностью уплотнительного диска 3 уплотнительной пары, показанной на рис. 38, в, является совмещение его упругого воздействия на седло 4 с пониженным аксиальным осевым усилием **.

В уплотнительной паре, показанной на рис. 38, д, уплотнительный диск 3 имеет два выступа 11, объем между которыми откачивается через выполненные в седле 4 каналы 12, что значительно уменьшает натекание и позволяет снизить усилие герметизации. Самоустановка диска 3 относительно седла 4 обеспечивается сферическим шарниром 13.

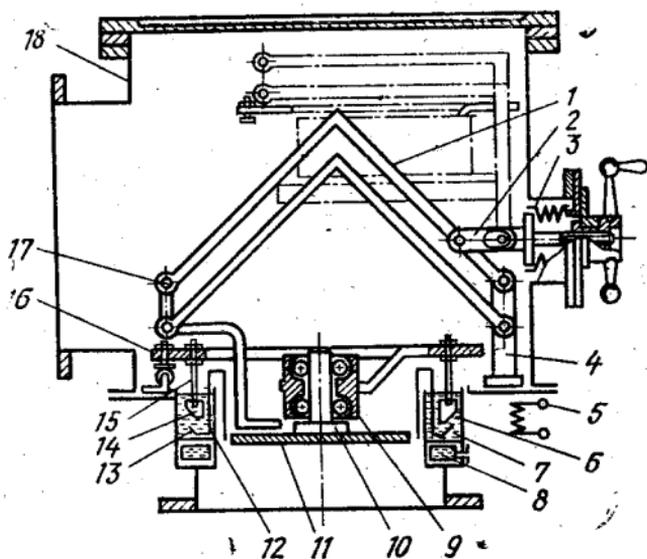
* Патент Швейцарии № 576604, 1976 г.

** Патент США № 3973753, 1976 г.

Как уже отмечалось, сверхвысоковакуумные клапаны для поддержания постоянного усилия герметизации при различных температурах эксплуатации имеют компенсирующие элементы, повышающие надежность и увеличивающие срок службы уплотнительных пар. Чаще всего в качестве компенсаторов используют пружины, подпружиненные седла, пружинные штоки. Пружинные

Рис. 39. Сверхвысоковакуумный клапан с расплавляемым металлом-уплотнителем, работающий в горизонтальном положении:

1 — механизм перемещения уплотнительного диска, 2 — шток, 3 — сильфон, 4 — кронштейн, 5 — нагреватель, 6 — ванна, 7 — металл-уплотнитель, 8 — система водяного охлаждения, 9 — втулка, 10 — направляющая, 11 — заслонка, 12, 16 — уплотнительный и опорный диски, 13 — буртик, 14 — подвижное кольцо, 15 — чипилка, 17 — ось, 18 — корпус



компенсаторы должны иметь пологую упругую характеристику и небольшие габариты, что при больших усилиях герметизации получить трудно.

Недостатками сверхвысоковакуумных клапанных соединений являются большие усилия герметизации, малая долговечность, высокая точность изготовления. Этих недостатков можно избежать, если использовать металлические уплотнители из легкоплавких материалов.

Клапан с расплавляемым металлом-уплотнителем и разрушением оксидной пленки, работающий при произвольной ориентации в пространстве, был показан на рис. 35.

В клапане с расплавляемым металлом-уплотнителем и защитой от окисления*, работающем в горизонтальном положении (рис. 39), основным элементом является уплотнительная пара, которая состоит из ванны 6 с металлом-уплотнителем 7 и уплотнительного диска 12. Ванна снабжена электронагревателем 5, предназначен-

* Данилов К. Д. «Приборы и техника эксперимента» № 2, 1982 г.

ным для быстрого расплавления металла-уплотнителя, и системой водяного охлаждения 8. Уплотнительный диск, представляющий собой цилиндрическую тонкостенную обечайку, имеет в верхней части герметично приваренную крышку чашеобразной формы. В нижней части уплотнительного диска имеется буртик, во внутренней полости которого расположены металл-уплотнитель и выступающая часть подвижного кольца, соединенного шпильками с опорным диском 16. Механизм перемещения 1 уплотнительного диска выполнен в виде пантографа, который обеспечивает большой рабочий ход диска при малой деформации сильфона 3.

ГЛАВА ТРЕТЬЯ

ИЗГОТОВЛЕНИЕ, ЭКСПЛУАТАЦИЯ И ИСПЫТАНИЯ СВЕРХВЫСОКОВАКУУМНЫХ РАЗЪЕМНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

§ 9. ИЗГОТОВЛЕНИЕ И СБОРКА СВЕРХВЫСОКОВАКУУМНЫХ РАЗЪЕМНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Высокая надежность и длительная работоспособность сверхвысоковакуумных разъемных соединений зависят от качества их изготовления и обслуживания, а также соблюдения вакуумной гигиены.

Фланцы сверхвысоковакуумных разъемных соединений рекомендуется изготавливать из листовой нержавеющей прокатной стали, причем их ось должна быть направлена перпендикулярно направлению волокон исходного материала. При использовании круглого проката вероятность образования течей резко возрастает, что в итоге приводит к неисправимому браку.

Как уже отмечалось, необходимым условием обеспечения изготовления элементов разъемного соединения высокого качества является правильный выбор оси заготовки детали, т. е. ориентировать ось изготавливаемой детали относительно волокон исходного материала нужно так, чтобы исключить возможность образования сквозных каналов, сообщающих полость с атмосферой.

При токарной обработке элементов разъемных соединений используют твердосплавной режущий инструмент (без применения охлаждающей жидкости). Наибо-

лее ответственным моментом их изготовления является обработка уплотняющего профиля.

При обработке комбинированного уплотняющего профиля (рис. 40, а) растачивают отверстие диаметром D_2 ; протачивают выточку диаметром D и глубиной h_1 , которую контролируют глубиномером с индикаторной головкой; выставляют фасонный резец (рис. 40, б) вершиной

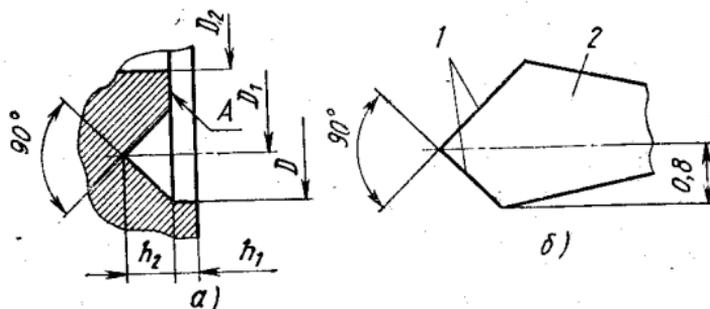


Рис. 40. Геометрия комбинированного уплотняющего профиля (а) и режущая часть фасонного резца (б):

1 — режущие кромки, 2 — головка резца

заточки к плоскости A по размеру D_1 и протачивают треугольную канавку глубиной h_2 , которую выдерживают по нониусу станка. Режимы резания должны быть такими, чтобы высота шероховатостей рабочих поверхностей уплотняющего профиля была 0,63—1,25 мкм. Для окончательной доводки используют мелкозернистую наждачную бумагу.

При обработке серповидного уплотняющего профиля (рис. 41) применяют фасонный резец, режущая кромка которого представляет собой полуокружность радиусом R . На одном из фланцев вытачивают этим резцом серповидный профиль глубиной $h^{+0,05}$, поверхность которого полируют. Затем обрабатывают конические поверхности так, чтобы ширина кольцевых площадок не превышала 0,15 мм. Высота шероховатостей на уплотняемой поверхности другого фланца должна быть порядка 0,63—1,25 мкм.

Сверхвысоковакуумные фланцы приваривают к оборудованию только в окончательно обработанном виде.

Крепежные элементы (шпильки, болты, гайки, шайбы) в большинстве случаев изготавливают из нержавеющей стали. При этом особое внимание следует уделять

качеству резьбы. Чтобы крепежные элементы при прогреве не схватывались, их подвергают сульфацианированию или сульфидированию.

Металлические уплотнители требуют для создания герметичности стыка больших усилий, удельные значения которых достигают сотен ньютон на миллиметр длины линии уплотнения. Наличие на рабочих поверхностях уплотнителей рисок, царапин, инородных включений и других дефектов не допускается, так как при этом значительно повышается необходимое усилие герметизации.

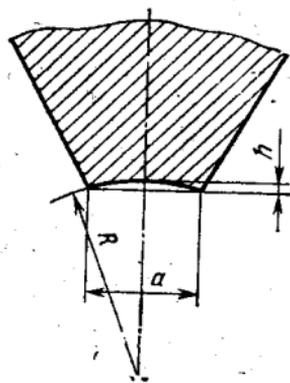


Рис. 41. Геометрия серповидного уплотняющего профиля

Как уже отмечалось, в сверхвысоковакуумных разъемных соединениях, прогреваемых до 450°C , наиболее часто применяют медные плоские и проволочные уплотнители. Соединения с уплотнителями из индия, алюминия и никеля допускают прогрев соответственно до 150 , 300 и 600°C .

Плоские медные уплотнители небольшого диаметра (до 160 мм) и толщиной до $0,8$ мм вырезают на токарных станках из листовой меди, а толщиной 2 мм и больше штампуют из листа или вытачивают. Высота шероховатостей на поверхности уплотнителей не должна превышать $1,25$ мкм. При точении в качестве охлаждающей жидкости можно применять керосин, соблюдая правила пожарной безопасности. Обработка поверхностей уплотнителей наждачной бумагой не допускается. Уплотнители большого диаметра изготавливают из ленты, вырезая заготовки необходимой длины, которые изгибают, отжигают и соединяют встык пайкой мягким припоем.

Проволочные медные уплотнители изготавливают из проволоки необходимого диаметра. Длина заготовки должна быть несколько меньше средней длины периметра уплотнения, что обеспечивает натяжение и, следовательно, удержание уплотнителя на утапливаемых штифтах или кольце (см. рис. 14, а, б). После отрезания заготовок концы проволоки торцуют и сваривают встык, снимают образовавшийся облой надфилем и окончательно зачищают место сварки вдоль проволоки, контролируя диаметр.

Последней операцией изготовления как плоских, так и проволочных медных уплотнителей является отжиг в вакуумных камерах при 600°С в течение 10—15 мин. Допускается также отжигать уплотнители в пламени газовой горелки, после чего их следует протравить в азотной кислоте и промыть.

Аналогично изготавливают уплотнители из алюминия и никеля. Чтобы предохранить металлические уплотнители от механических повреждений, каждый из них укладывают в отдельный полиэтиленовый пакет или, разделив прокладками из безворсовой ткани либо бумаги, хранят в одном пакете.

Проволочные индиевые уплотнители изготавливают, продавливая через фильеру индий In-00, на специальном приспособлении (рис. 42). Профиль проволоки определяется формой рабочего отверстия фильеры, а качество зависит от свойств исходного материала. При работе особое внимание следует уделять соблюдению чистоты. Детали приспособления и индий необходимо периодически протирать белой бязью, смоченной этиловым спиртом. Ворсинки от бязи и другие инородные включения в проволоке не допускаются.

Процесс изготовления плоских уплотнителей из индия состоит из двух этапов: получения листовой заготовки и вырезки уплотнителя. Листовую заготовку получают прокаткой индия между валками, на рабочих поверхностях которых не должно быть вмятин, царапин и других повреждений. Перед прокаткой индий и валки протирают бязью, смоченной спиртом. Возможна прокатка индия, предварительно заключенного между двумя пластинами (рис. 43), внутренние поверхности которых должны удовлетворять тем же требованиям, что и рабочие поверхности валков. Перед прокаткой индий и пластины также протирают бязью, смоченной спиртом. Вырезают уплотнители из листовых заготовок острыми резаками или специальными обрезающими штампами. Го-

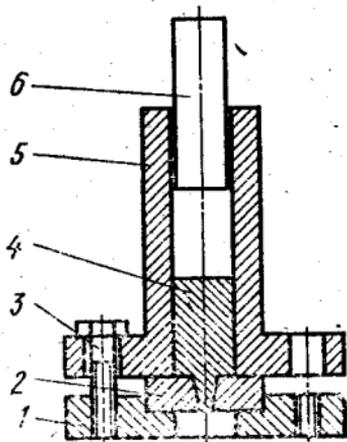


Рис. 42. Приспособление для получения индиевой проволоки:

1 — фланец, 2 — фильера, 3 — болт, 4 — индий, 5 — корпус приспособления, 6 — шток приспособления

товые уплотнители хранят отдельно друг от друга, чтобы предотвратить их схватывание.

Индиевые уплотнители, размещаемые в канавках, изготавливают прессованием. При этом получают индиевую проволоку, площадь поперечного сечения которой превышает на 8—12% площадь поперечного сечения уплотнителя и отрезают от нее заготовки, длина которых на 6—

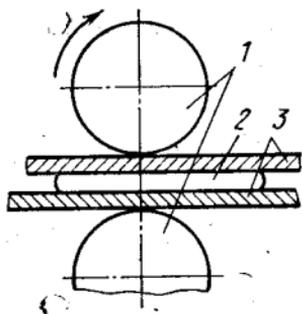


Рис. 43. Прокатка индиевого листа:

1 — валки, 2 — индий, 3 — пластины

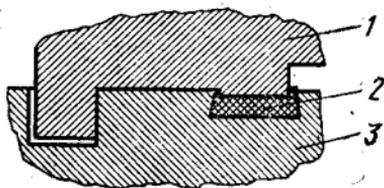


Рис. 44. Запрессовка индиевого уплотнителя:

1 — пуансон, 2 — индий, 3 — фланец (седло)

8 мм больше периметра уплотнения. Концы заготовок срезают «на ус» и после размещения в канавке накладывают друг на друга так, чтобы плоскость их разъема была фронтально-проецирующей. Запрессовывают уплотнители при удельном давлении не менее 30 МПа пуансоном 1 с ограниченным перемещением (рис. 44), который центрируют по одной из боковых поверхностей фланца 3 (седла). Для более полного и равномерного заполнения всего пространства, отведенного под уплотнитель 2, и лучшего перекрытия газопроводящих каналов между ним и дном канавки усилие выдерживают 15 мин. При этом излишки индия вытекают в зазоры между пуансоном и боковыми стенками канавки. После снятия усилия пуансон отделяют и вытекший в зазоры индий осторожно удаляют. Затем опрессовку повторяют дважды, поворачивая пуансон на 120°. При этом шероховатость наружной поверхности запрессованного уплотнителя соответствует шероховатости рабочей поверхности пуансона.

Плоские армированные уплотнители (см. рис. 25, в) имеют сердцевину из меди М1 толщиной 0,5 мм, на которую напаяют с двух сторон пластичные обкладки

из индия In-00. После механической зачистки и промывки уплотнители опрессовывают. Толщина индиевого покрытия после опрессовки около 0,2 мм. Излишки индия по периферии срезают.

При изготовлении медно-индиевых проволочных уплотнителей (рис. 45) индий 3 на медную основу 2 наносят гальваническим способом. При этом толщина индиевого покрытия должна быть 30—40 мкм. Такие биметаллические

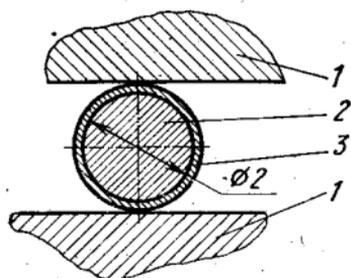


Рис. 45. Медно-индиевый проволочный уплотнитель:

1 — фланцы, 2 — медная основа, 3 — индий

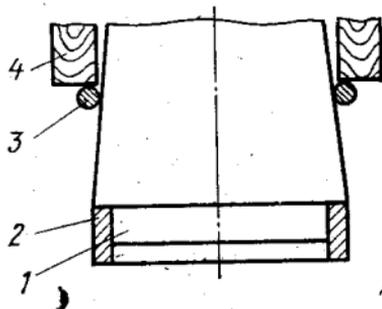


Рис. 46. Приспособление для монтажа проволочных уплотнителей:

1 — конический пуансон, 2 — кольцо фланцевого соединения, 3 — уплотнитель, 4 — деревянный брусок

таллические уплотнители обеспечивают снижение удельных усилий герметизации до уровня, характерного для индиевых, и имеют более высокие эксплуатационные свойства.

При изготовлении уплотнителей индий можно использовать многократно. Повторно используемый индий, а также его отходы, полученные при изготовлении проволочных, плоских и запрессованных уплотнителей, для удаления загрязнений промывают растворителем, расплавляют в сосуде из нержавеющей стали, удаляя образовавшийся шлак шпателем, и разливают в разъемную алюминиевую форму. Если индий предназначен для изготовления проволочных уплотнителей, диаметр рабочей полости формы должен соответствовать диаметру полости приспособления для выдавливания проволоки.

Элементы сверхвысоковакуумных разъемных соединений с расплавляемым металлом-уплотнителем изготавливают аналогично.

Сборку фланцевых соединений необходимо выполнять аккуратно, соблюдая требования вакуум-

ной гигиены. Перед сборкой все детали соединения должны быть промыты бензином, протерты и просушены.

При сборке фланцевых соединений, в которых используются плоские уплотнители толщиной до 0,5 мм, особое внимание следует уделять качеству уплотнителей большого диаметра, которые довольно часто поступают после хранения погнутыми. Выправлять уплотнители рекомендуется на плоской гладкой и чистой поверхности монтажного стола, используя белую бязь. После правки уплотнители протирают и аккуратно помещают в посадочные места фланцев.

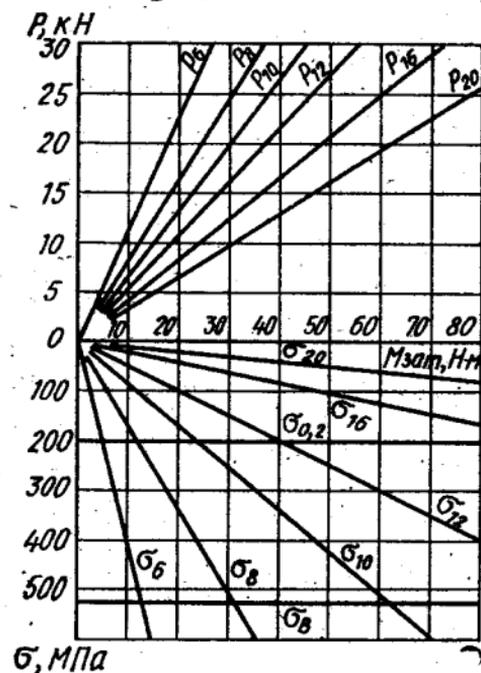


Рис. 47. Номограмма для определения усилий P и напряжений σ в крепежных элементах при их застяжке моментом $M_{заг}$

При сборке фланцевых соединений, в которых используются плоские уплотнители толщиной 2 мм и больше, иногда возникают трудности, связанные с их установкой: при монтаже вертикально расположенных фланцев уплотнители вследствие зазоров выпадают из посадочных мест. В этом случае рекомендуется придать уплотнителю эллипсную форму, слегка согнув его в радиальном направлении.

При сборке фланцевых соединений с комбинированным профилем (см. рис. 27) при использовании проволочных уплотнителей монтаж рекомендуется вести с помощью приспособления, показанного на рис. 46. Уплотнитель 3 надевают на конический пуансон 1, с помощью деревянных брусков 4 прогоняют по нему и натягивают на расположенное под пуансоном кольцо 2 фланцевого соединения, которое подается на окончательную сборку.

Проволочные уплотнители фланцевых соединений большого диаметра растягивают непосредственно при

уплотнителей большого диаметра, которые довольно часто поступают после хранения погнутыми. Выправлять уплотнители рекомендуется на плоской гладкой и чистой поверхности монтажного стола, используя белую бязь. После правки уплотнители протирают и аккуратно помещают в посадочные места фланцев.

При сборке фланцевых соединений, в которых используются плоские уплотнители толщиной 2 мм и больше, иногда возникают трудности, связанные с их установкой: при монтаже вертикально расположенных фланцев уплотнители вследствие зазоров выпадают из посадочных мест. В этом случае рекомендуется придать уплотнителю эллипсную форму, слегка согнув его в радиальном направлении.

натяжении на утапливаемые штифты или кольцо. Растяжение выполняют равномерно по всему периметру уплотнения. Работать следует в чистых хлопчатобумажных перчатках.

Крепежные элементы затягивают поочередно, постепенно увеличивая усилие при каждом обходе, кроме последнего. Момент затяжки $M_{зат}$ крепежных элементов контролируют по индикатору динамометрического ключа. Ориентировочно усилия и соответственно напряжения в шпильках (болтах) при затяжке можно рассчитать по формуле $M_{зат} = 0,15 Pd$ (где P и d — усилие на шпильке и наружный диаметр ее резьбы). Номограмма для определения усилия P и напряжения σ от момента затяжки $M_{зат}$ крепежных элементов диаметром от 6 до 20 мм приведена на рис. 47, где также даны пределы текучести $\sigma_{0,2}$ и прочности σ_b стали 12X18H10T.

В разъемных соединениях с неконтактирующими фланцами зазор, контролируемый щупом, должен быть постоянным.

§ 10. ОСОБЕННОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ И ОБСЛУЖИВАНИЯ СВЕРХВЫСОКОВАКУУМНЫХ РАЗЪЕМНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

При работе со сверхвысоковакуумными разъемными соединениями следует учитывать, что после приложения к стыкуемым элементам внешнего сжимающего усилия процесс заполнения микронеровностей продолжается некоторое время и это приводит к уменьшению приложенной нагрузки, которое зависит от вида уплотняющего профиля и материала уплотнителя. Так, в плоских соединениях с проволочным уплотнителем из меди (см. рис. 14) усилие герметизации через 3 мин после приложения уменьшается на 9,6%, в ступенчатых (см. рис. 24) — на 5,8%, а в соединениях типа «Conflat» (см. рис. 26) — на 3,1%. При прогреве соединений это явление происходит интенсивнее.

При этом происходит соответствующее изменение натекания, зависимость которого от времени t при использовании уплотнителей из индия (см. рис. 25, б) показана на рис. 48. Таким образом, при проверке герметичности стыков соединений с индиевыми уплотнителями окончательный вывод следует делать не ранее чем через 15—20 мин после приложения внешнего сжимающего усилия.

При термоциклическом режиме работы необходимо внимательно следить за температурой, резкое изменение которой, особенно при охлаждении, приводит к разгерметизации фланцевых соединений, т. е. к образованию течей. Для обеспечения надежности и длительной работоспособности соединений рекомендуется первый прогрев производить до температуры, составляющей 0,6—0,7 от максимальной, и после охлаждения подтягивать крепежные элементы, а затем выполнять подтяжку периодически после прогревов до максимальной температуры. Это необходимо делать потому, что после прогрева усилие затяжки крепежных элементов снижается.

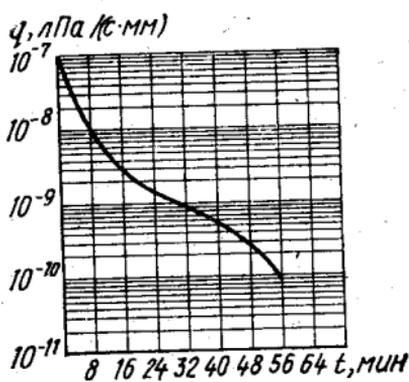


Рис. 48. Изменение протечки от времени в соединениях с индиевым уплотнителем профилированным выступом

Для разъединения соединений, подвергшихся прогреву, используют специальные резьбовые отверстия или шлицы во фланцах, соответственно применяя отжимные болты или специальные рычажные устройства.

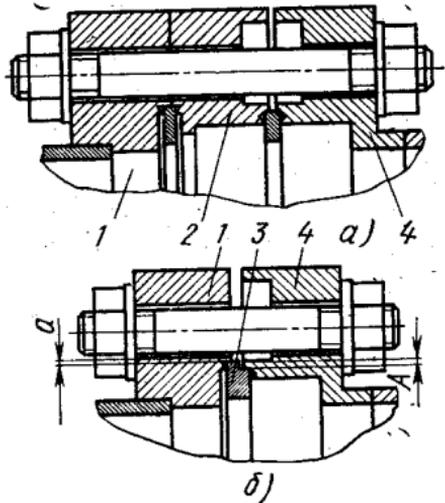
Демонтируют фланцевые соединения очень аккуратно и осторожно, так, чтобы обеспечить сохранность уплотняемых поверхностей и минимальное попадание на внутренние поверхности элементов вакуумной системы оксидов материала отработавшего уплотнителя, которые удаляют кисточкой или щеткой с мягким ворсом.

При техническом обслуживании фланцевых соединений наиболее ответственными операциями являются зачистка и, если необходимо, восстановление уплотняемых поверхностей. Случайные небольшие повреждения уплотняемых поверхностей фланцев, среди которых наиболее характерны царапины и забоины, устраняют, зачищая их шабером и оселком, а затем мелкой наждачной бумагой.

При эксплуатации с течением времени элементы сверхвысоковакуумных разъемных соединений покрываются оксидной пленкой. Слабо окисленные уплотняемые поверхности на герметичность стыка существенно не влияют. При сильном окислении уплотняющий про-

фильф рекомендуетсч зачистить, мелкой наждачной бумагой вдоль линии уплотнения (в направлении первоначальной обработки). Поперечные риски не допускаются. После обработки уплотняемые поверхности очищают кисточкой и протирают.

При эксплуатации сверхвысоковакуумного оборудования нередки случаи, когда приходится стыковать друг с другом элементы, соединительные фланцы которых имеют различную конструкцию. В этих случаях обычно используют специальные переходники. Для прямой стыковки необходимо, чтобы совпадали соединительные размеры крепежных элементов, а также размеры посадочных мест под уплотнитель. Отечественное оборудование чаще всего стыкуется с зарубежным, имеющим фланцевые соединения типа «Conflat». Поэтому основные размеры разработанных в последнее время отечественных фланцевых соединений с комбинированным уплотнением соответствуют размерам фланцев типа «Conflat». Соединения, имеющие диаметр условного прохода 63, 100 и 200 мм, стыкуются через переходные двусторонние вставки (рис. 49, а) или фасонные уплотнители (рис. 49, б).



венного фланцевого соединения а — с двусторонней переходной вставкой, б — с фасонным уплотнителем; 1, 4 — фланцы, 2 — вставка, 3 — фасонный уплотнитель.

При работе со сверхвысоковакуумными разъёмными соединениями следует использовать только исправный инструмент; при этом на рабочем месте не должно быть посторонних предметов.

Затягивают крепежные элементы в хлопчатобумажных перчатках. Промывать элементы соединения необходимо только в вытяжном шкафу, используя индивидуальные средства защиты (защитные очки, поливинилхлоридные перчатки и, если необходимо, респиратор).

Использованные при работе протирочные тампоны хранят в металлической плотно закрывающейся емкости, которую освобождают в специально отведенном месте.

§ 11. ИСПЫТАНИЯ СВЕРХВЫСОКОВАКУУМНЫХ РАЗЪЕМНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Основными видами испытаний сверхвысоковакуумных разъемных соединений являются испытания на герметичность, на необходимое усилие герметизации, и стендовые тепловые.

Испытания на герметичность необходимы для определения натекания через сверхвысоковакуумные разъемные соединения. Так как требования к допустимому натеканию весьма жестки, для контроля герметичности соединений применяют наиболее чувствительные методы, одним из которых является масс-спектрометрический, основанный на определении чрезвычайно малых концентраций гелия в вакуумном объеме. Для повышения чувствительности современных масс-спектрометрических теческательщиков используют селективную откачку газов. Например, размещают между испытываемым разъемным соединением и теческательщиком криосорбционный насос, не откачивающий гелий, что увеличивает чувствительность испытаний в 2—3 раза. При масс-спектрометрическом методе контроля герметичности испытываемое разъемное соединение обдувают гелием или помещают в гелиевую камеру.

В первом случае специальным ручным обдувателем, соединенным шлангом с источником гелия, проверяемые соединения обдувают гелием. Если имеется течь, то проникший через нее гелий попадает в масс-спектрометр и фиксируется индикатором. Контроль начинают с верхних разъемных соединений; при этом скорость перемещения обдувателя должна быть 0,5—1 м/мин. Недостатками этого способа являются утечка гелия, невыявление течей вследствие слишком быстрого перемещения обдувателя вдоль испытываемых участков или случайный пропуск отдельных участков.

Во втором случае испытываемое соединение накрывают колпаком (или помещают в чехол), в который напускают гелий. Так как возможность пропуска течи исключается, этот способ при определении потока натекания более объективен и точен.

Перед испытанием на герметичность с поверхностями элементов сверхвысоковакуумных разъемных соединений должны быть удалены все загрязнения, которые могут перекрыть течи и воспрепятствовать их обнаружению. Поэтому соединения тщательно обезжиривают растворителями, рекомендуемыми для промывки вакуумных систем, и сушат. Контроль герметичности состоит из трех этапов: предварительных испытаний, поиска течей и заключительной проверки. Цель предварительных испытаний — установление негерметичности. Если негерметичность обнаружена, переходят к поиску течи, а затем по индикатору течеискателя определяют натекание.

Испытания на необходимое усилие герметизации проводят на стенде (рис. 50), в который входят средства откачки, измерения вакуума, течеискания и нагружения испытываемого разъемного соединения. При испытаниях разъемное соединение откачивают и прикладывают к уплотняемому элементу 2 внешнее сжимающее усилие, увеличивая нагрузку до момента прекращения натекания через стык уплотнителя 1 с элементами соединения 2 и 3. Сумма трех усилий: зафиксированного в момент прекращения натекания $P_{сж}$, от атмосферного давления P_a и массы верхнего уплотнительного элемента P_m является усилием герметизации.

Усилие герметизации, полученное в результате испытаний, является основным параметром для оценки уплотняющего профиля, материалов и технологии изготовления стыкуемых элементов.

Усилие герметизации фланцевого соединения можно определить по формуле $P_r = ZP_{шп}$, где Z — количество шпилек в соединении, $P_{шп}$ — усилие затяжки шпилек. Усилие затяжки шпилек $P_{шп} = M_{зат} / (0,15 d_{шп})$, где $M_{зат}$ и $d_{шп}$ — момент затяжки шпилек и наружный диаметр их резьбы. Таким образом, усилие герметизации фланцевого соединения $P_r = ZM_{зат} / (0,15 d_{шп})$. Момент за-

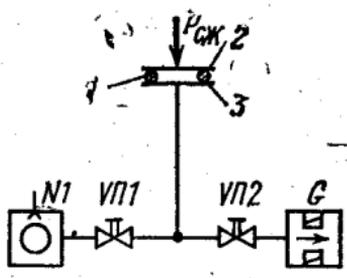


Рис. 50. Испытательный стенд для определения усилий герметизации:

- 1 — уплотнитель, 2, 3 — уплотняемые элементы соединения; N1 — механический вакуумный насос, VП1, VП2 — вакуумные клапаны, G — течеискатель

тяжки шпилек определяют с помощью динамометрического ключа.

При сравнении различных конструкций сверхвысоковакуумных разъемных соединений пользуются отношением усилия герметизации P_r к длине средней линии уплотнения $l_{упл.}$, называемым *удельным усилием герметизации* $p_r = P_r/l_{упл.}$

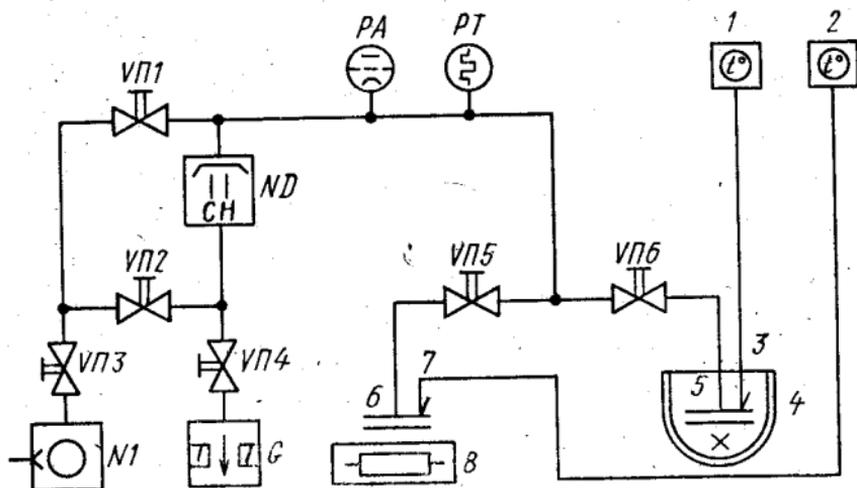


Рис. 51. Стенд для тепловых испытаний сверхвысоковакуумных разъемных соединений:

1, 2 — приборы, регистрирующие температуру, 3, 7 — термопары, 4 — охлаждаемая ванна, 5, 6 — испытываемые соединения, 8 — нагреватель;

N1 — механический вакуумный насос, VP1—VP6 — вакуумные клапаны, G — гелиевый течеискатель, ND — диффузионный насос, PA, PT — ионизационный и тепловой вакуумметры

Отношение усилия герметизации к площади контакта стыкуемых элементов в зоне уплотнения называют *удельным давлением герметизации*.

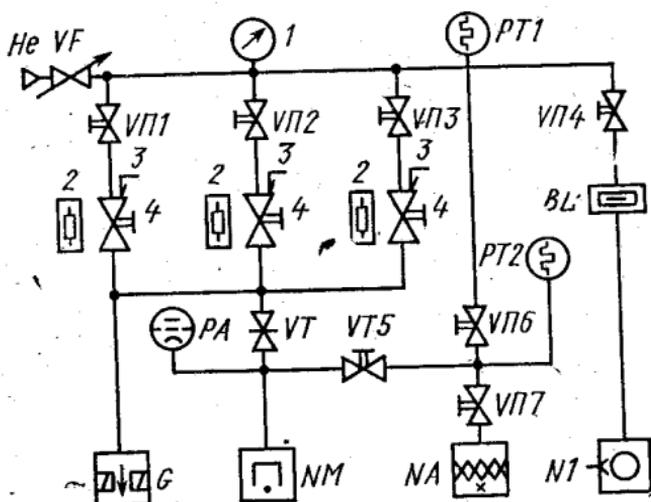
Тепловые стендовые испытания проводят для определения работоспособности и надежности сверхвысоковакуумных разъемных соединений в условиях воздействия повышенных или пониженных температур. При испытаниях (рис. 51) установленное на стенд разъемное соединение откачивают, проверяют его герметичность, а затем прогревают или охлаждают. Скорость нагрева фланцевых соединений с диаметром условного прохода до 250 мм составляет 10—15° С/мин, а скорость охлаждения — 5—7° С/мин. После достижения заданной температуры для ее выравнивания соединение выдерживают (обычно 30 мин), после чего темпера-

туру доводят до комнатной. Нагрев (охлаждение), выдержка и охлаждение (нагрев) соединений до комнатной температуры являются термоциклом испытаний. Минимальное количество термоциклов при испытаниях 20. Эти испытания часто называют также термоциклическими.

Герметичность стыка соединения проверяют как при экстремальных, так и промежуточных температурах. Пробный газ (гелий) подают через трубки, которые вво-

Рис. 52. Испытательный стенд:

1 — манометр, 2 — нагреватели, 3 — термодатчики, 4 — испытываемые клапаны; *PT1*, *PT2* — тепловой вакуумметр, *VF*, *VП1* — *VП7* — напускной и вакуумные клапаны, *ВЛ* — охлаждаемая ловушка, *РА* — вакуумметр ионизационный, *VT* — затвор, *G* — терченскатель, *NM*, *NA*, *NI* — магниторазрядный, цеолитовый и механический вакуумные насосы



рачивают в резьбовые отверстия под отжимные болты фланцев. При тепловых испытаниях все части оборудования с температурой выше 45°C и ниже -30°C должны иметь ограждения и защиту.

При испытаниях сверхвысоковакуумных клапанов (рис. 52) температуру измеряют снаружи их и непосредственно в зоне уплотнения, так как при изменении температуры прогрева температуры наружной и внутренней частей клапана различны.

Чтобы предупредить окисление уплотняющего материала (диска или седла), клапаны испытывают в условиях вакуум—вакуум в закрытом состоянии, для чего их входные патрубки подсоединяют к откачиваемому коллектору. Для исключения влияния паров масла на герметизацию клапанов в вакуумной системе испытательного стенда предусматриваются ловушки или безмасляные средства откачки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Балицкий А. В. Технология изготовления вакуумной аппаратуры, М., 1974.
2. Варламов В. А., Шехмейстер Е. И. Сборочные операции в электровакуумном производстве, М., 1974.
3. Волошин А. А., Григорьев Г. Т. Расчет и конструирование фланцевых соединений. Л., 1979.
4. Закиров Ф. Г., Николаев Е. А. Откачник-ваккумщик. М., 1983.
5. Кузнецов В. И., Немиллов Н. Ф., Шемякин В. Е. Эксплуатация вакуумного оборудования. М., 1978.
6. Львов Б. Г. Новые конструкции высоковакуумных прямопролетных клапанов. М., 1980.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3
Глава первая. Общие сведения	4
§ 1. Основные понятия и определения	4
§ 2. Материалы элементов сверхвысоковакуумных разъемных соединений	6
§ 3. Образование вакуумно-плотного контакта в сверхвысоковакуумных разъемных соединениях	13
§ 4. Влияние конструктивных, технологических и эксплуатационных факторов на качество сверхвысоковакуумных разъемных соединений	16
Глава вторая. Конструкции сверхвысоковакуумных разъемных соединений	23
§ 5. Сверхвысоковакуумные разъемные фланцевые соединения с металлическими уплотнителями	23
§ 6. Сверхвысоковакуумные разъемные соединения с индиевыми уплотнителями	37
§ 7. Сверхвысоковакуумные разъемные соединения с расплавляемыми уплотнителями	40
§ 8. Сверхвысоковакуумные клапанные соединения вакуумной арматуры	49
Глава третья. Изготовление, эксплуатация и испытания сверхвысоковакуумных разъемных соединений	56
§ 9. Изготовление и сборка сверхвысоковакуумных разъемных соединений	56
§ 10. Особенности эксплуатации и обслуживания сверхвысоковакуумных разъемных соединений	63
§ 11. Испытания сверхвысоковакуумных разъемных соединений	66
Литература	70