

UHV 챔버의 디자인 및 제조: 초고진공으로 가는 과정에서의 모범 사례 및 함정.

초고진공에서 재료 선택, 표면 마감 및 설계 실행의 영향은 무엇입니까?
어떤 펌핑 출력이 응용 분야에 실제로 필요합니까? 그리고 양호한 최종
압력을 달성하는 것이 왜 어려울 수 있습니까?



초고진공(UHV)은 정의에 따라 10^{-7} mbar의 절대 압력에서 시작합니다. 이는 outgassing이 이 압력 범위에서 최종 압력에 대해 중요해진다는 것을 의미합니다. UHV의 흐름은 분자이며, 평균 자유 경로 길이는 1 km 이상입니다. 압력이 10^{-12} mbar으로 계속 떨어지면, 자유 경로 길이는 10,000 km로 커집니다. 진공 챔버에 남아 있는 나머지 입자는 이제 용기 벽과만 상호 작용을 경험하고, 서로서로는 상호 작용을 아예 경험하지 않거나 거의 경험하지 않습니다. 이 범위에서 챔버의 재료와 표면이 중요해집니다. 그렇다면 이 압력 범위에 대한 챔버 및 구성품을 디자인, 제조 및 작동할 때 무엇을 고려해야 합니까?



UHV 챔버

재료 선택 기준

우선 챔버 벽에 대한 높은 기밀성과 낮은 고유 증기압 및 낮은 함량의 외부 기체가 필요합니다. 이를 피할 수 없는 경우 물질은 적어도 문제가 될 수 있는 잔류 가스를 신속하게 펌핑할 수 있도록 최대한 신속하게 기체를 빼내야 합니다. UHV에서 챔버 부피는 중요한 요소가 아니며, 기껏해야 펌프의 스위치가 꺼지거나 눌린 후 압력이 상승하는 동안 버퍼로 작용합니다. 이 경우 잔류 가스는 용기 벽 또는 설비의 표면 및 부피에서 나옵니다.

강도와 내부식성은 추가적인 기준입니다. 밀봉 표면은 1 bar의 압력 차이에서 변형되지 않아야 하므로 충분히 강한 재료가 필요합니다.

내부식성은 대기 중의 베이크 아웃 또는 화학적으로 활성인 공정 기체와 같은 어려운 조건에서도 보장되어야 합니다. 그러므로 재료의 내부식성을 테스트하는 것이 중요합니다. 챔버가 기밀한 상태이며 그 상태로 유지되도록 보장하기 위해서는 온도 변화 도중의 우수한 안정성과 조정된 팽창 거동이 필요합니다. 플랜지와 개스킷의 재료가 서로 맞아야 합니다.

스테인레스강과 구리는 열팽창 계수가 비슷하므로 우수한 조합입니다. 스테인리스 스틸과 알루미늄은 온도가 150°C를 넘은 이후로는 냉각 시 플랜지 연결이 더 이상 기밀하지 않기 때문에 제한적으로만 가능한 조합입니다.

속성 다음으로는 재료의 처리 및 가용성이 있으며, 이는 재료를 적정한 비용으로 처리할 수 있어야 하고 물론 사용도 가능해야 하기 때문입니다.

UHV 기술에서의 수요가 낮아 자체 재료 개발이 없으며 이미 사용 가능한 재료로 작업해야 합니다. 오스테나이트 스테인레스강은 UHV 응용 분야에 특히 적합합니다.

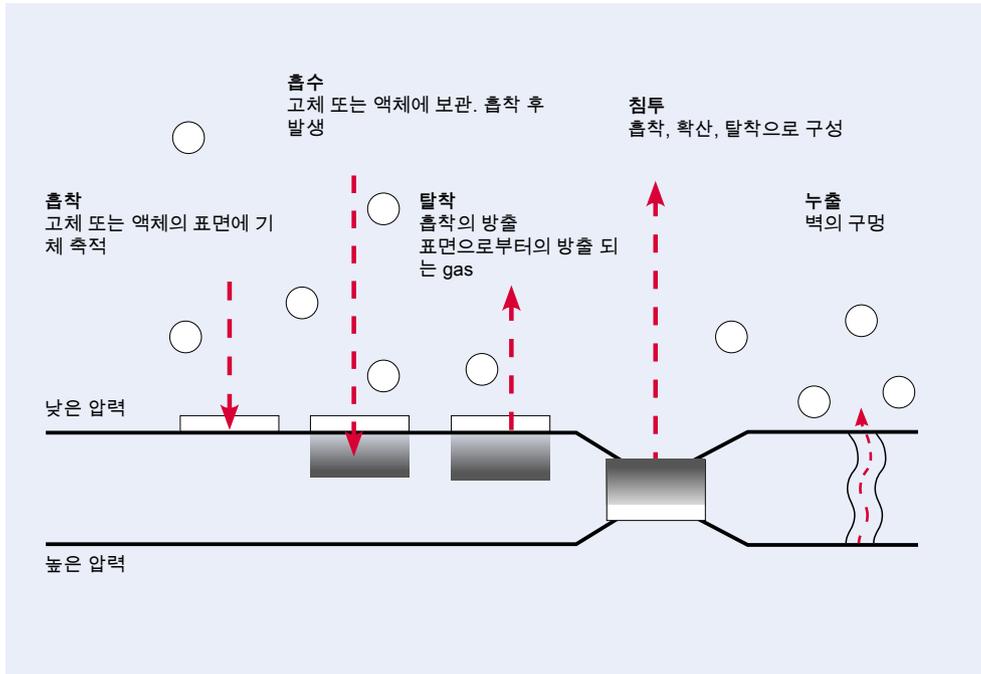


그림 1: 진공 챔버의 표면과 주변 기체 사이 상호 작용.

초고진공에서의 효과

다음의 용어는 UHV의 표면에서 일어나는 효과를 설명합니다.

1. 흡착: 챔버 벽에 달라붙는 입자와 같은, 고체 또는 액체 표면의 기체 침전물.
2. 흡수: 고체 또는 액체에 갇힌 기체. 흡수는 종종 흡착 후 따라옵니다. 이전에는 표면에만 부착되었던 입자가 이제 챔버 벽에 내장됩니다.
3. 탈착: 환경으로의 흡착 기체 방출. 처음 두 효과에 의해 보유된 입자가 챔버 벽에서 다시 분리됩니다.
4. 침투: 액체 또는 고체를 통한 기체 운반. 침투 = 흡착 + 확산 + 탈착.

가압, 흡착 및 흡수는 입자가 고정되어 있고 진공을 방해하지 않으므로 문제가 되지 않습니다. 두 효과 모두 각각의 환기뿐만 아니라 대기와 접촉하는 모든 표면에서 발생합니다. 탈착은 양호한 최종 압력으로 가는 길에 있어서 주요한 대항자입니다. 이는 챔버 외부에 부착된 입자가 침투 과정에서 챔버 벽을 통해 확산되어 진공 챔버로의 탈착이 증가하기 때문입니다.

작동 압력의 정의

이제까지 재료의 요구 사항에 대한 몇 가지 기본 사항에 대해 설명했습니다. 다음으로 원하는 작동 압력 p_{work} 를 진공 챔버 구성을 처리하기 위해 결정해야 합니다.

배압 펌프, 적합한 펌핑 용량의 고진공 또는 초고진공 펌프가 작동 압력을 제공한 후 체적을 최대 10-3 mbar 까지 펌프로 끌어냅니다. 이러한 목적을 위하여 탈착, 침투, 누출 및 공정 기체로 인한 기체 부하를 계산하거나 적어도 추정해야 합니다.

$$p_{Work} = p_{End} + + \frac{Q_{Desorption}}{S_{eff}} + \frac{Q_{Permeation}}{S_{eff}} + \frac{Q_{Leakage}}{S_{eff}} + \frac{Q_{Process}}{S_{eff}}$$

다음에서는 서로 다른 gas 부하 Q_i 가 어떻게 영향을 받을 수 있는지 설명하겠습니다. 이는 가스, 압력 및 설치 유형에 따라 달라지는 유효 흡입력 S_{eff} 에 의해 반대 됩니다

- p_{End} : 펌프 선택에 따른 펌프의 최종 압력.
- S_{eff} : 기체, 압력 및 설치 유형에 따른 유효 펌프 속도.
- $Q_{Desorption}$: 탈착으로 인한 기체 부하. 이는 청결을 포함해 재료와 표면의 선택에 따라 다릅니다. 탈착은 베이크 아웃에 의해 가속화됩니다.
- $Q_{Permeation}$: 침투는 챔버 크기뿐만 아니라 재료 선택에 따라서도 달라집니다.
- $Q_{Leakage}$: 누출은 적절한 제조 기술에 의해 예방됩니다.
- $Q_{Process}$: 응용 분야에 따른 공정 기체 및 고유 증기압.



다단계 루츠 펌프 ACP, 큐빅 챔버 및 진공 밸브.



ISO-KF 구성품

탈착

시간 경과에 따라 금속 표면의 탈착으로 인해 기체 부하가 감소합니다. 감소는 다음 시간 $t > t_0$ 부터 선형인 것으로 가정합니다. t_0 는 1시간으로 가정합니다. 따라서 탈착 흐름은 다음과 같이 설명될 수 있습니다.

$$Q_{DesM} \approx q_{DesM} \cdot A_M \cdot \frac{t_0}{t},$$

이때,

- Q_{DesM} : 금속의 탈착 흐름 [$Pa \cdot m^3/s$],
- q_{DesM} : 금속의 탈착 흐름 밀도(영역 특정) [$Pa \cdot m^3/s \cdot m^2$],
- A_M : 금속 영역 [m^2] 기체 분자가 용존함, 및
- t : 표면이 진공 상태인 시간 [s].

UHV에서는 금속 탈착이 플라스틱에서보다 덜 중요합니다. 특히, 개스킷은 그 안에 용해된 가스를 방출합니다. 그러므로 더 긴 시간이 지나면 플라스틱에서의 탈착이 금속 표면에서의 탈착보다 우세할 수 있습니다. 개스킷의 상대적으로 작은 표면적은 시간 경과에 따른 탈착 속도의 느린 감소보다 더 중요합니다. 시간적 감소는 시간의 제곱근으로 발생한다고 가정합니다.

따라서 플라스틱 표면에 의한 기체 축적은 다음과 같이 설명할 수 있습니다.

$$Q_{DesK} \approx q_{DesK} \cdot A_K \cdot \sqrt{\frac{t_0}{t}},$$

다음 포함

- Q_{DesK} : 플라스틱의 탈착 흐름 [$Pa \cdot m^3/s$],
- q_{DesK} : 플라스틱의 탈착 흐름 밀도(영역 특정) [$Pa \cdot m^3/s \cdot m^2$],
- A_K : 기체분자가 분리되는 플라스틱 면적 [m^2], 및
- t : 표면이 진공 상태인 시간 [s].

그러나, $E_{kin} > E_{Des}$ 의 에너지를 갖는 입자만 탈착됩니다.

탈착 흐름 밀도: $j_{Des} \propto e^{-\left(\frac{E_{Des}}{k_B \cdot T}\right)}$

챔버의 베이크 아웃을 의미하는 온도를 높이는 것은 이러한 에너지를 제공하는 가장 쉬운 방법입니다.

표면의 특정 특성(예: 생산, 추가 공정, 세정)은 면적에 관련된 기체 방출 q_{Des} 에 큰 영향을 미칩니다. 10배 이상의 배율로 변화하는 것은 펌핑 출력의 10배 증가를 필요로 합니다.

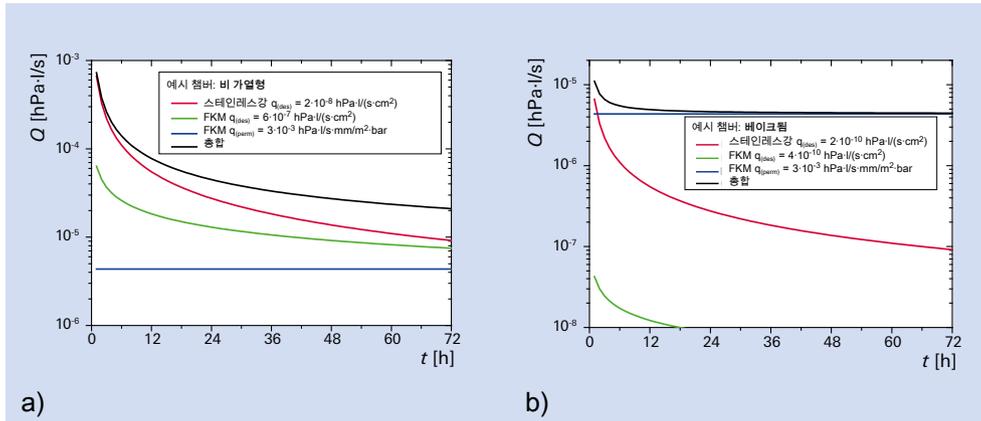


그림 2: 탈착 & 침투 - 계산 예시, 챔버 (a) 가열되지 않음 및 (b) 베이킹 아웃됨.

일반적인 예시 챔버의 계산은 이를 보여줍니다.

1. 스테인레스강 원통형 본체
 - a) 직경(Ø) 600 mm, 길이 1,000 mm, 면적 약 25,000 cm²
 - b) 다양한 플랜지 배출구(금속 실링)로 약 8,000 cm²의 추가 영역이 발생하여 총 스테인레스강 영역은 다음과 같습니다. 33,000 cm².
2. 불화탄소 고무(FKM) O ring이 있는 메인 플랜지
 - a) 직경(Ø) 640 mm, 코드 두께 7mm, 홈 깊이 5.25 mm, 진공 FKM 영역: 약 106 cm²
 - b) 폭(압축됨): 약 7.3 mm
3. 폴리테트라플루오르에틸렌 (PTFE) 플레이트의 설치 50 · 50 · 10 mm³
 - a) PTFE 영역: 70 cm².

메인 플랜지에 금속 개스킷을 사용할 수 있습니다. 그러나 이는 한 번만 사용할 수 있으며 연 후에 매년 교체해야 하므로, 매년 열 때마다 약 1,000€의 비용이 발생합니다. 또한, 챔버를 세울 때 실링 엣지가 있는 플랜지에 대한 비용이 발생할 수 있습니다. 이러한 추가 비용은 특별한 경우에만 할 가치가 있으므로 여기서의 계산 예시에서 고려하지 않습니다.

피팅으로 인한 기체 부하는 PTFE 플레이트에 의해 표현됩니다. 이는 높은 탈착률을 가지는 다소 작은 영역입니다.

그림 2의 그래프는 탈착 계산을 보여줍니다. 수신 측 표면이 깨끗한 것으로 가정합니다. 표면의 탈착은 청결도에 따라 다르며 $1 \cdot 10^{-7}$ hPa · l/s 다음보다 5배 더 클 수 있습니다 그림 2는 유효 펌프 속도 1,000 l/s가 3일 후에 압력 p_{72h} $1.8 \cdot 10^{-8}$ hPa가 됨을 보여줍니다.

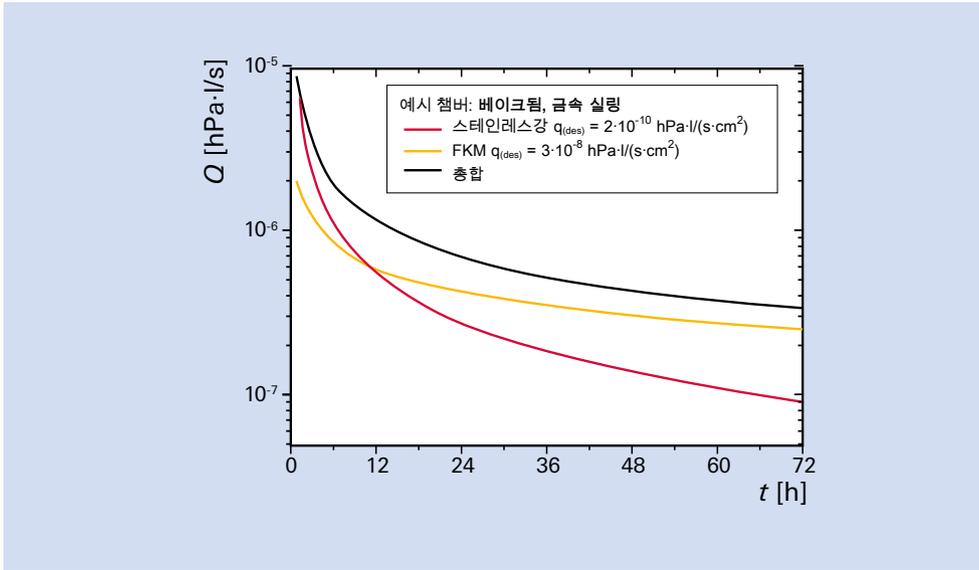


그림 3: 피팅으로 탈착

침투

침투는 재료의 기체 침투성 또는 침투 전도성입니다.

$$Q_{\text{Perm}} \approx q_{\text{Perm}} \cdot \frac{A}{d} \cdot \Delta p$$

실제 경우,

Q_{Perm}	침투 흐름 [$\text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$],
q_{Perm}	침투 상수(재료별 특정) [m^2/s],
A	진공 상태 영역 [m^2]
d	벽 두께, 분자에 의해 덮혀질 경로 길이 [m], 및
Δp	압력 차이.

따라서 침투는 시간과 무관하며 최종 압력의 증가를 지속적으로 제공합니다. 압력 차이에 대한 의존성은 이를 줄이는 데 사용될 수 있습니다. 소위 차동 펌핑은 단간 펌프가 있는 이중 실을 의미하며, Δp 를 1bar에서 1~10 mbar로 3~4배 규모로 감소시킵니다. 이는 또한 침투 흐름을 100 또는 1000배 감소시키게 됩니다. 그러나 침투는 또한 온도와 매체 및 재료의 특정 조합에 따라 달라집니다. 헬륨으로 침투하는 용융 실리카와 같이 일부 재료는 다른 재료보다 유독 특정 매체에 더 침투성이 있습니다. 예를 들어, 엘라스토머는 비교적 높은 침투율을 가지며, 또한 온도에도 크게 의존합니다. 침투 전도성은 100K의 온도 증가에 대해 100배 증가합니다. 그러나 O ring이 타원형이 되므로 150°C 이상의 온도는 엘라스토머로 가능하지 않습니다.

원칙에 따라, 매우 낮은 압력(10^{-8} hPa)에서의 침투를 실제 누출과 혼동하지 마십시오.

이제 침투가 그림 2의 탈착 계산 예시에 추가되었습니다. 시간 독립 상수로서의 침투는 그림 3에서 시간 축에 평행한 선으로 나타납니다.

이전과 동일한 펌프 이용하여 압력 $p_{72h} 2 \cdot 10^{-8}$ hPa에 3일 후에 도달합니다.

가열된 챔버에 대한 동일한 계산의 결과가 그림 4에 나와 있습니다. 베이크 아웃 덕분에 표면의 탈착이 이전보다 100배 더 작아지고 침투가 지배적인 효과를 갖습니다.

3일 후의 최종 압력은 $p_{72h} = 3.5 \cdot 10^{-9}$ hPa.

누출

누출 가능성은 국부 또는 통합 리크 감지 과정에서 발견됩니다. 두 경우 모두 진공 챔버는 진공 상태입니다(진공 방법). 국부 리크 감지의 리크율(진공 방법):
 $10^{-10} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s} \approx 0.1 \mu\text{m}$ 모세관 직경. 통합 리크 감지의 리크율(진공 방법):
 $10^{-9} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s} \approx 0.3 \mu\text{m}$ 모세관 직경.

리크 테스트 시작 시 남아 있는 기체 부하는 $10^{-7} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 범위 안에 있어야 합니다. 가끔, 값 10^{-10} 또는 $10^{-11} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 가 요구될 때도 있습니다. 그러나 이러한 요구는 필요한 시간이 현저히 증가됨에도 불구하고 새로운 결과를 제공하는 것은 아니므로 비실용적입니다. 경험에 따르면: $10^{-7} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 에서 리크가 발견되지 않으면, 10^{-10} 또는 $10^{-11} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 에서 아무 리크도 발견되지 않을 것입니다.

시스템 리크 테스트 시 테스트 기체인 헬륨의 펌프 속도와 챔버의 진공이 신호에 영향을 미치므로, 표시 없음이 누출이 없는 것과 같지는 않다는 점에 유의하는 것이 중요합니다. 누출이 있는 경우 가스가 챔버로 흘러 들어가서 확산되고, 비교적 낮은 확률로 리크 감지기에 연결됩니다. 또한 공정이 너무 빠르면 신호가 모호할 수 있습니다.

시간 상수를 고려해야 합니다.

예제 1:

$S_{\text{eff(He)}}$ 리크 감지기: 1 l/s

챔버 부피: 315 l

→ = 315초

리크 감지기 표시는 적어도 5분 후에 예상할 수 있습니다.

예제 2:

리크 감지기의 터보 펌프 $S_{\text{eff(He)}}$ 를 이용한 향상된 펌프 속도 : 1,300 l/s

챔버 부피: 315 l

→ = 0.24초

리크 감지기의 반응은 1초 내에 예상할 수 있습니다.

It는 일반적으로 테스트 장비에 익숙하게 만들 때 추천됩니다. 이는 테스트 리크를 통해 쉽게 수행할 수 있습니다.

피팅 및 고유 증기압

피팅은 추가 탈착 표면을 나타냅니다. 이 효과는 탈기체율이 낮은 재료를 사용하고, 깨끗하게 작업하고, 부품을 사전에 탈기함으로써 완화될 수 있습니다.

고유 증기압은 오일 및 그리스의 경우 중요한 역할을 합니다. 이는 최종 진공 압력을 제한하므로 충분히 낮아야 합니다. 이 효과는 금속에도 나타납니다. 예를 들어, 100°C가 넘는 온도에서는 황동 내 아연 분압이 현저히 증가하므로 이 영역에서는 사용하지 않는 것이 좋습니다.

구성 과정에서 환기가 잘 되지 않는 체적(허누출)은 미리 제거해야 합니다. 예를 들어 가스가 도입되고 탈기체율이 높은 재료를 사용하거나 표면을 스퍼터링해야 하므로, 높은 가스 부하를 피할 수 없는 경우 펌프를 유리하게 선택 및 배치하여 상황을 개선할 수 있습니다.

피팅을 이용한 탈착의 계산 예시

그림 3의 그래프를 더 잘 표현하기 위해, 예시 챔버가 이제 완전히 금속 실링되었습니다. 메인 플랜지의 엘라스토머 실에 대한 그래프는 생략되지만 PTFE 플레이트의 탈착에 대한 그래프는 노란색으로 나타냅니다. 최종 압력 p_{72h} $3.5 \cdot 10^{-10}$ hPa에 3일 후에 도달합니다.

UHV 챔버의 실제 디자인

가스 실린더나 탱크 카와 같은 압력 용기와 달리 진공 챔버에 대한 필수 규칙 세트는 없습니다. 그러나 안전한 제품을 제조할 책임은 남아 있습니다. 디자인은 "우수한 엔지니어링 방식"에 따른 경험을 기반으로 합니다. 따라서 디자인 책임은 챔버를 설계한 사람에게 있습니다. 계약 제조업체는 확장된 작업대로 간주됩니다.

진공 챔버 디자인의 경우 압력 용기용 AD 2000과 같은 관련 규칙 및 표준이 참고가 될 수 있습니다. 압력 용기(데이터 시트 B0), 원통형 셸(데이터 시트 B6) 또는 디스크 바닥(데이터 시트 B4)의 계산이 종종 사용됩니다. 계산은 또한 유한 요소법 (FEM)을 사용하여 수행할 수도 있습니다. 그러나, 이 경우에는 특히 대형 구성품 및 파이프의 경우 압력비가 뒤바뀐다는 점을 고려해야 합니다. 진공 챔버에서는 외부에서 압력이 작용하며, 탄성 좌굴 및 소성 변형이 발생합니다.

또한 진공 챔버의 모든 작동 조건을 고려해야 합니다. 예를 들어 베이크 아웃 과정에서 상승하는 온도로 인해 재료의 강도가 감소할 수 있습니다. 또한 메인 튜브에 측면 부하를 가할 수 있는 챔버의 발과 같은 추가 부하가 있습니다.

기계 지침 및 위험 평가

진공 챔버가 CE 마크를 받지 않았는데, 그 이유는 무엇입니까? CE 마크를 받기 위해서는 구성품이 CE 마크를 제공하는 EU 지침의 범위 이내에 있어야 합니다. 진공 챔버는 기계가 아니므로, 이는 진공 챔버에는 적용되지 않습니다. 따라서 적합성 선언, CE 마크 및 통합 선언이 없습니다.

그러나 구성품을 기계인 챔버에 장착하면 이는 달라집니다. 그러면 제품 책임이 제품을 시장에 내놓은 사람, 즉 운영자에게 있을 수 있습니다. 전체 시스템은 안전 설계를 위한 3단계 원칙을 따르는 EN ISO 12100에 따라 위험 평가를 받습니다. 요구 사항은 다음과 같습니다(우선순위 내림차순 정렬). 첫째, 위험은 디자인 단계에서 제거되어야 합니다. 위험 지점이 없으면 위험이 없는 것입니다. 위험을 피할 수 없는 경우, 위험 영역을 에워싸는 것과 같은 기술적 보호 조치를 취해야 합니다. 이 부분이 구현될 수 없는 경우 사용자는 운영 지침에 있는 위험을 인지해야 합니다.

용접

용접은 진공 용기 제조의 핵심 공정입니다. 내부에서 용접을 수행하여 체적의 포함을 방지합니다. 필요시 지원 용접이 있는데, 이는 외부에서 지속적으로 이루어지지 않습니다. 용접이 내부와 외부에서 지속적으로 이루어질 경우 가상 누출이 발생할 수 있습니다. 이러한 조건에서는 내부 용접부에서 누출을 발견할 수 없고, 용접부 사이에 갇힌 체적을 펌프해 내보내기가 매우 어렵습니다. 예를 들어, 공간 제약으로 인해 내부에서 용접이 불가능한 경우 외부만 용접합니다. 이러한 용접은 완전히 관통하여 용접이 이루어지므로 진공 측에 좁은 틈이 남아 있지 않습니다.

강한 국부 가열로 인해 용접 왜곡이 발생합니다. 그러므로 숙련된 용접 기사가 용접할 이음매의 순서를 미리 결정하여 왜곡을 최소한도로 유지합니다. 밀봉 표면과 같은 기능 표면에는 일반적으로 추가 재작업을 해야 합니다.



자격 요건은 회사가 용접에 필요한 경험이 있는지 여부를 결정하는 데 사용될 수 있습니다. 용접 및 절차 자격 요건 테스트는 작업을 수행하는 회사의 능력에 대한 통찰력을 제공합니다.

텅스텐 불활성 가스(TIG) 용접, 레이저 용접 및 전자빔 용접은 진공 용접의 가장 일반적인 용접 공정입니다.

용접은 용접부에 미세 구조 차이를 유발하고 이 영역에서 기계적, 자기적 특성뿐만 아니라 화학적 특성이 변화합니다. 자기적 특성에 특히 주의해야 합니다. 급속 냉각은 상대 투자율을 증가시키는 마르텐사이트 변태를 유발합니다.

μr . 이는 특히 입자 가속기와 같이 자기장이 사용되는 응용 분야에 영향을 미칩니다. 챔버 재료와 외부 자기장의 상호 작용은 거의 눈에 띄지 않을 정도로 작아야 합니다.



진공 구성품의 용접

UHV 청소

마지막으로, UHV에 적합한 청결도를 달성하기 위해 진공 챔버를 청소해야 합니다. 그러나 이를 위한 기본 작업은 깨끗한 재료를 사용하고 연강과 같은 오염을 피함으로써 챔버 제조 과정에서 조성됩니다. 단조 과정에서 형성된 스케일 층이 완전히 제거됩니다. 기계에 사용되는 윤활유는 수용성이며 건조가 허용되지 않습니다. 마감 공정의 일부로서 용접으로 인한 변색은 브러싱, 연삭(탄화규소 SiC 사용), 유리 비드 스틸링, 산세척 또는 전해 연마로 제거됩니다. 이 공정에서는 깨끗한 도구만 사용해야 합니다. 마지막으로, 오염물을 세정 수조(예: 초음파)에 담그어 완전히 제거하고 세정제의 마지막 잔류물은 완전하게 탈염수 또는 탈이온수로 꼼꼼하게 헹궈서 제거합니다.

저수소 풀림 또는 소자 풀림라고도 하는 진공 풀림에 의해 최고 수준의 청결도가 달성됩니다. 이 공정에서 오스테나이트 스테인레스강은 $p < 10^{-4}$ hPa의 진공, 950 – 1,050°C에서 anneal 됩니다. 질소 대기 중 냉각하는 과정에서 900~550°C의 온도 범위를 30분 이내에 통과해야 합니다.

하지만 플랜지 절단 엣지의 강도가 충분히 높은 것이 풀림에 대한 전제조건이므로 1.4307 대신 일렉트로슬래그 재용해 공정에서 얻을 수 있는 고순도강인 1.4429 ESU를 이용해 만들어져야 합니다.

Your Success. Our Passion.

We give our best for you every day –
worldwide!

완벽한 진공 솔루션을 찾고 계
십니까 당사로 문의하십시오.

파이퍼베콤 GmbH
본사 · 독일
전화: +49 6441 802-0



Errors excepted. All data subject to change without prior notice. PI 0537 PKC (June 2022/0)

Follow us on social media
#pfeiffervacuum



www.pfeiffer-vacuum.com

PFEIFFER  **VACUUM**