


REHBER SAVUNMA SANAYİİ · 12 DK. · 10 ŞUBAT 2026

# Savunma sanayiinde yüksek sıcaklık prosesleri

Refrakter teknolojisi savunma sanayiinde neden vazgeçilmezdir: Savunma bağlamında metalurji, termal koruma ve enerji sistemleri.

## Savunma bağlamında metalurji

Savunma sanayii ürünlerinin üretimi, metalurjik proseslere en yüksek gereksinimleri getirir. Zırh çeliği alaşımları, motorlar için yüksek performanslı malzemeler ve balistik açıdan optimize edilmiş malzemeler; 1.600 °C'nin üzerinde sıcaklık gerektiren ergitme, döküm ve ısıl işlem proseslerinde üretilir. Elektrik ark ocakları, indüksiyon ocakları ve vakum fırınlarındaki refrakter astarlar yalnızca ısıl açıdan değil, kimyasal açıdan da yüksek dayanımlı olmalıdır — agresif cüruflar ve özel alaşımlar, geleneksel refrakter malzemeleri sivil çelik üretimine kıyasla çok daha fazla aşındırır.

- Zırh çeliği ve balistik koruma çeliği: Bazik refrakter astarlı elektrik ark ocaklarında 1.650 °C'nin üzerinde ergitme ve döküm
- Motor alaşımları (nikel bazlı): Alüminyum oksit veya magnezyum oksit potalarla vakumlu indüksiyon ergitme (VIM)
- Isıl işlem: Güvenlik açısından kritik parçaların ıslahı, sertleştirilmesi ve gerilim giderme tavlaması için sürekli fırınlar ve hücre fırınları
- Eklemeli imalat: 3D baskı için metal tozlarının atomizasyonu, özel pota astarlarıyla yüksek saflıkta ergitme prosesleri gerektirir
- Mühimmat üretimi: Tanımlı mikro yapıya sahip mermi gövdeleri ve penetratörler için döküm prosesleri

**Not:** Kalite gereksinimlerinin karşılaştırılması — Sivil çelik üretiminde %1–2 hurda oranı kabul edilebilirken, savunma metalurjisinde sıfır hata toleransı geçerlidir. Refrakter astardaki her sapma — örneğin aşınan refrakter malzemeden kaynaklanan bir kalıntı — kullanım koşullarında malzeme hasarına yol açabilir. Bu nedenle izlenebilirlik ve parti dokümantasyonu refrakter malzemeler için de zorunludur.

## Termal koruma ve ısı kalkanı sistemleri

Termal koruma, savunma sanayiinde kendi başına bir teknoloji alanıdır. Füzelerdeki ısı kalkanlarından zırhlı araçların egzoz sistemlerine ve deniz tahrik sistemlerindeki ısı yalıtımına kadar — sıcaklıkların geleneksel malzemelerin dayanım sınırını aştığı her yerde refrakter malzemeler kullanılır. Gereksinimler statik fırın astarlarının çok ötesine geçer: Termal şok direnci, düşük ağırlık ve titreşime ve ivmelenmeye karşı dayanım belirleyici seçim kriterleridir.

-

Füzeler ve atmosfere yeniden giriş araçları: Karbon elyaf ve seramik kompozit malzemelere dayalı ablatif ısı koruma malzemeleri

- Zırhlı araçların egzoz sistemleri: Refrakter astarlar, titreşim yüküyle birlikte 900 °C'nin üzerindeki sıcaklıklara dayanmalıdır
- Gemi tahrik sistemleri: Fırkateyn ve korvetlerdeki gaz türbini yanma odaları ve egzoz kanalları, yüksek sıcaklığa dayanıklı yalıtım malzemeleri gerektirir
- Roket motorları: Grafit, tungsten veya seramik matrisli kompozitlerden (CMC) lüle boğazı astarları

**Not:** Termal koruma malzemelerinin çift kullanım (dual-use) boyutu — Termal koruma için kullanılan birçok yüksek sıcaklık malzemesi, AB Çift Kullanım Tüzüğü'ne (AB 2021/821) tabidir. Seramik elyaf kompozit malzemeler, belirli grafit kaliteleri ve yüksek performanslı seramikler Ek I'de listelenmiştir. Bu nedenle tedarikçiler ihracat kontrolü yükümlülüklerini bilmeli ve şirket içi uyum (compliance) süreçleri oluşturmalıdır.

## Enerji sistemleri ve tahrik teknolojisi

Modern silah sistemleri ve platformlar, yüksek performanslı enerji sistemlerine bağımlıdır. Muharebe tanklarındaki gaz türbinleri, gemi tahrik sistemleri ve hava araçlarındaki yardımcı güç üniteleri; refrakter astarlar, yanma odası malzemeleri ve termal bariyerler gerektiren aşırı sıcaklıklar üretir. Yönlendirilmiş enerji silahları (Directed Energy Weapons, DEW) ve hipersonik teknolojilere yönelik gelişme, termal yönetime ilişkin gereksinimleri daha da ağırlaştırmaktadır.

- Gaz türbinleri (MTU, Rolls-Royce): İtriyum ile stabilize edilmiş zirkonyum oksit bazlı termal bariyer kaplamalar (TBC), türbin kanatlarını 1.300 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda korur
- Yönlendirilmiş enerji silahları: Yüksek enerjili lazerler için soğutma sistemleri ve termal perdeleme, son derece düşük ısıl iletkenliğe sahip malzemeler gerektirir
- Hipersonik teknoloji: Burun konisi ve hücum kenarı malzemeleri, aerodinamik yükle birlikte 2.000 °C'nin üzerindeki sıcaklıklara dayanmalıdır
- Sahra kampı enerji temini: Refrakter astarlı mobil yakma sistemleri ve atık ısı kullanımı

**Not:** Malzeme araştırmasıyla teknolojik üstünlük — Yüksek sıcaklık proseslerine hâkim olmak stratejik bir teknolojik üstünlüktür. Hafniyum karbür ve zirkonyum diborür gibi ultra yüksek sıcaklığa dayanıklı seramikleri (UHTC) kendi imkânlarıyla üretebilen ülkeler, hipersonik silahların ve atmosfere yeniden giriş araçlarının geliştirilmesinde belirleyici bir avantaja sahiptir.

## Test ve kalite güvencesi

Savunma bağlamındaki refrakter malzemeler, sivil sanayiye kıyasla daha sıkı test ve dokümantasyon gereksinimlerine tabidir. Kalite güvencesi yalnızca malzeme teknolojisine ilişkin testleri (basma dayanımı, porozite, ısıl iletkenlik) değil, hammaddelerin eksiksiz izlenebilirliğini, partinin işveren tarafından onaylanmasını ve askeri spesifikasyonlara uyumu da kapsar.

- İlk Ürün Muayenesi (First Article Inspection, FAI): Savunma bağlamındaki her yeni refrakter ürün için AS9102'ye göre ilk numune muayenesi
- Parti takibi: Hammaddeden monte edilmiş refrakter malzemeye kadar eksiksiz dokümantasyon — AQAP 2110 uyumlu
- Tahribatsız muayene (NDT): Monte edilmiş durumdaki astarın bütünlüğünü değerlendirmek için ultrason, röntgen ve termografi
- Çevre simülasyonu: Simüle edilmiş kullanım koşullarında termal döngüsel yük, titreşim testi ve korozyon dayanımı

**Not:** Tedarikçilere yönelik AQAP gereksinimleri — NATO Müttefik Kalite Güvence Yayınları (Allied Quality Assurance Publications, AQAP), savunma sanayii tedarikçilerine yönelik kalite gereksinimlerini tanımlar. AQAP 2110 (ISO 9001 tabanlı) en kapsamlı seviyedir ve kendi tasarım ve konstrüksiyonunu yapan tedarikçiler için

geçerlidir. Yalnızca verilen dokümanlara göre üretim yapanlar AQAP 2120'ye göre çalışır. Uyum, Bundeswehr (Alman Silahlı Kuvvetleri) kalite kontrol birimleri (GüPrSt) tarafından denetlenir.

## Gelecek teknolojileri ve trendler

Savunma sanayii, tamamı yüksek sıcaklık prosesleri gerektiren gelecek teknolojilerine yoğun yatırım yapmaktadır. Gelecekteki Muharebe Hava Sistemi'nden (Future Combat Air System, FCAS) hipersonik füzelere ve yeni zırh konseptlerine kadar — refrakter teknolojisine ve termal yönetime yönelik gereksinimler artmaya devam edecektir. Bu durum uzman tedarikçiler için uzun vadeli iş fırsatları doğurmaktadır.

- FCAS/NGWS: Gizlilik (stealth) gereksinimleri ve daha yüksek çalışma sıcaklıkları için yeni nesil motor malzemeleri
- Eklemeli imalat: Prototipler ve çok küçük seriler için refrakter parçaların 3D baskısı — geliştirme döngülerini yıllardan aylara indirir
- Seramik matrisli kompozitler (CMC): Metalden hafif, sıcaklığa daha dayanıklı — motor teknolojisinde paradigma değişimi
- Nadir toprak elementlerinin geri dönüşümü: Hizmet dışı kalmış silah sistemlerinden stratejik hammaddelerin geri kazanımı için yüksek sıcaklık prosesleri

## Sık sorulan sorular

### Savunma sanayiinde en sık hangi refrakter malzemeler kullanılır?

En yaygın refrakter malzemeler; ergitme fırınları için yüksek aluminalı tuğlalar ve monolitik malzemeler (Al2O3 > %70), bazik fırın astarları için magnezyum oksit bazlı ürünler, aşınma koruması için silisyum karbür ve termal bariyer kaplamalar için zirkonyum oksit bazlı malzemelerdir. Aşırı uygulamalarda grafit, tungsten ve ultra yüksek sıcaklık seramikleri (UHTC) de kullanılır.

### Savunma sanayiine hizmet veren bir refrakter tedarikçisi hangi sertifikalara ihtiyaç duyar?

Asgari gereklilik, temel kalite yönetim sistemi olarak ISO 9001'dir. Savunma sanayii şirketlerine veya Bundeswehr'e (Alman Silahlı Kuvvetleri) doğrudan tedarik için ek olarak AQAP 2110 (NATO kalite standardı) istenir. Bilgiye erişim düzeyine bağlı olarak bir gizlilik koruma prosedürü (Ü1 veya Ü2) gerekebilir. İhracat için Çift Kullanım Tüzüğü ve KrWaffKontrG (Alman Savaş Silahları Kontrol Kanunu) bilgisi gereklidir.

### Savunma alanında refrakter malzemelere yönelik gereksinimler sivil sanayiden farklı mıdır?

Evet, önemli ölçüde. Savunma alanında daha dar toleranslar, eksiksiz izlenebilirlik, partinin işveren tarafından onaylanması ve AQAP standartlarına göre dokümantasyon geçerlidir. Malzemelerin kendisi çoğu zaman aynıdır; ancak kalite güvencesi, test derinliği ve kanıt yükümlülükleri çok daha kapsamlıdır.

**Projenizi bizimle görüşün**

İş günlerinde 24 saat içinde geri dönüş.

**info@sbs-rs.de**

**+49 89 541 960 200**

**Çevrimiçi okuyun: www.sbs-rs.de/defense-industrie/ratgeber/hochtemperaturprozesse-ruestungsindustrie**