



GUIA DEFESA · 12 MIN

Processos de alta temperatura na indústria de defesa

Porque é que a tecnologia refratária é indispensável na indústria de defesa: metalurgia, proteção térmica e sistemas energéticos no contexto da defesa.

Metalurgia no contexto da defesa

O fabrico de material de defesa impõe exigências máximas aos processos metalúrgicos. Ligas de aço para blindagem, materiais de alto desempenho para motores e materiais otimizados do ponto de vista balístico são produzidos em processos de fusão, fundição e tratamento térmico que exigem temperaturas superiores a 1 600 °C. Os revestimentos refratários de fornos de arco elétrico, fornos de indução e fornos de vácuo têm de ser altamente resistentes não só do ponto de vista térmico, mas também químico: escórias agressivas e ligas especiais atacam os materiais refratários convencionais com muito mais intensidade do que na produção civil de aço.

- Aço de blindagem e aço de proteção balística: fusão e vazamento a mais de 1 650 °C em fornos de arco elétrico com revestimento refratário básico
- Ligas para motores (à base de níquel): fusão por indução em vácuo (VIM) com cadinhos de alumina ou de magnésia
- Tratamento térmico: fornos contínuos e fornos de câmara para têmpera e revenido, têmpera e recozimento de alívio de tensões de componentes críticos para a segurança
- Fabrico aditivo: a atomização de pós metálicos para impressão 3D exige processos de fusão de elevada pureza com revestimentos especiais de cadinho
- Fabrico de munições: processos de fundição para invólucros de projéteis e penetradores com microestruturas definidas

Nota: Requisitos de qualidade em comparação — Enquanto na produção civil de aço são aceitáveis taxas de rejeição de 1–2 %, na metalurgia de defesa aplica-se a tolerância zero a defeitos. Qualquer desvio no revestimento refratário, por exemplo uma inclusão provocada pela erosão do material refratário, pode levar à falha do material em condições de utilização. Por isso, a rastreabilidade e a documentação de lotes são obrigatórias também para os materiais refratários.

Proteção térmica e sistemas de escudo térmico

Na indústria de defesa, a proteção térmica é um domínio tecnológico autônomo. Dos escudos térmicos de mísseis aos sistemas de escape de veículos blindados e ao isolamento térmico de sistemas de propulsão navais, sempre que surgem temperaturas acima da capacidade de carga dos materiais convencionais, utilizam-se materiais refratários. Os requisitos vão muito além dos revestimentos estáticos de fornos: resistência ao choque térmico, baixo peso e resistência a vibrações e acelerações são critérios de seleção decisivos.

- Mísseis e veículos de reentrada: materiais ablativos de proteção térmica à base de fibra de carbono e compósitos cerâmicos
- Sistemas de escape de veículos blindados: os revestimentos refratários têm de resistir a temperaturas superiores a 900 °C sob vibração simultânea
- Propulsão naval: as câmaras de combustão de turbinas a gás e as condutas de escape de fragatas e corvetas exigem materiais isolantes resistentes a altas temperaturas
- Motores de foguete: revestimentos de garganta de tubeira em grafite, tungstênio ou compósitos de matriz cerâmica (CMC)

Nota: Dupla utilização dos materiais de proteção térmica — Muitos materiais de alta temperatura para proteção térmica estão sujeitos ao Regulamento de Dupla Utilização da UE (UE 2021/821). Os compósitos de fibra cerâmica, determinadas qualidades de grafite e as cerâmicas de alto desempenho constam do Anexo I. Os fornecedores têm, por isso, de conhecer as suas obrigações de controlo das exportações e estabelecer processos internos de conformidade.

Sistemas energéticos e tecnologia de propulsão

Os sistemas de armas e as plataformas modernos dependem de sistemas energéticos de elevado desempenho. As turbinas a gás de carros de combate, a propulsão naval e as unidades auxiliares de potência de aeronaves geram temperaturas extremas que exigem revestimentos refratários, materiais para câmaras de combustão e barreiras térmicas. A evolução para armas de energia dirigida (DEW) e tecnologias hipersónicas agrava ainda mais os requisitos de gestão térmica.

- Turbinas a gás (MTU, Rolls-Royce): os revestimentos de barreira térmica (TBC) à base de zircónia estabilizada com ítria protegem as pás das turbinas a mais de 1 300 °C
- Armas de energia dirigida: os sistemas de refrigeração e a blindagem térmica de lasers de alta energia exigem materiais com condutibilidade térmica extremamente baixa
- Tecnologia hipersónica: os materiais da ogiva e dos bordos de ataque têm de resistir a temperaturas superiores a 2 000 °C sob esforço aerodinâmico simultâneo
- Abastecimento energético de acampamentos: sistemas de combustão móveis e aproveitamento de calor residual com revestimento refratário

Nota: Vantagem tecnológica através da investigação de materiais — O domínio dos processos de alta temperatura é uma vantagem tecnológica estratégica. Os países com capacidade própria para produzir cerâmicas de ultra-alta temperatura (UHTC), como o carboneto de háfnio e o diboreto de zircónio, têm uma vantagem decisiva no desenvolvimento de armas hipersónicas e veículos de reentrada.

Ensaaios e garantia da qualidade

No contexto da defesa, os materiais refratários estão sujeitos a requisitos de ensaio e documentação mais rigorosos do que na indústria civil. A garantia da qualidade abrange não só os ensaios de materiais (resistência à compressão, porosidade, condutibilidade térmica), mas também a rastreabilidade integral das matérias-primas, a liberação dos lotes pelo cliente e o cumprimento das especificações militares.

- First Article Inspection (FAI): inspeção do primeiro artigo segundo a AS9102 para cada novo produto

refratário no contexto da defesa

- Rastreabilidade de lotes: documentação integral da matéria-prima ao material refratário aplicado, em conformidade com a AQAP 2110
- Ensaios não destrutivos (END): ultrassons, radiografia e termografia para avaliar a integridade do revestimento no estado aplicado
- Simulação ambiental: ciclos térmicos, ensaios de vibração e resistência à corrosão em condições de utilização simuladas

Nota: Requisitos AQAP para fornecedores — As NATO Allied Quality Assurance Publications (AQAP) definem os requisitos de qualidade para os fornecedores da indústria de defesa. A AQAP 2110 (baseada na ISO 9001) é o requisito mínimo. Para fornecedores que realizam ensaios próprios aplica-se adicionalmente a AQAP 2120. O cumprimento é supervisionado pelos serviços de inspeção da qualidade da Bundeswehr (GüPrSt).

Tecnologias do futuro e tendências

A indústria de defesa investe maciçamente em tecnologias do futuro que, sem exceção, exigem processos de alta temperatura. Do Future Combat Air System (FCAS) aos mísseis hipersônicos e aos novos conceitos de blindagem, os requisitos de tecnologia refratária e gestão térmica vão continuar a aumentar. Abrem-se assim oportunidades de negócio de longo prazo para fornecedores especializados.

- FCAS/NGWS: nova geração de materiais para motores, com requisitos de furtividade e temperaturas de serviço mais elevadas
- Fabrico aditivo: impressão 3D de componentes refratários para protótipos e microsséries, que encurta os ciclos de desenvolvimento de anos para meses
- Compósitos de matriz cerâmica (CMC): mais leves do que o metal e mais resistentes à temperatura, uma mudança de paradigma na tecnologia de motores
- Reciclagem de terras raras: processos de alta temperatura para a recuperação de matérias-primas estratégicas a partir de sistemas de armas desativados

Perguntas frequentes

Que materiais refratários são mais utilizados na indústria de defesa?

Os materiais refratários mais comuns são tijolos e massas de alta alumina ($\text{Al}_2\text{O}_3 > 70\%$) para fornos de fusão, produtos à base de magnésia para revestimentos básicos de fornos, carboneto de silício para proteção contra o desgaste e materiais à base de zircónia para revestimentos de barreira térmica. Para aplicações extremas utilizam-se também grafite, tungsténio e cerâmicas de ultra-alta temperatura (UHTC).

Que certificações necessita um fornecedor de refratários para a indústria de defesa?

O requisito mínimo é a ISO 9001 como sistema de gestão da qualidade de base. Para o fornecimento direto a grupos de defesa ou à Bundeswehr é exigida adicionalmente a AQAP 2110 (norma de qualidade da NATO). Consoante o acesso a informação, pode ser necessário um procedimento de credenciação de segurança (Ü1 ou Ü2, níveis alemães de habilitação de segurança). Para a exportação é necessário conhecer o Regulamento de Dupla Utilização e a Kriegswaffenkontrollgesetz (KrWaffKontrG, lei alemã de controlo de armas de guerra).

Os requisitos para materiais refratários na defesa diferem dos da indústria civil?

Sim, consideravelmente. Na defesa aplicam-se tolerâncias mais apertadas, rastreabilidade integral, liberação dos lotes pelo cliente e documentação segundo as normas AQAP. Os materiais em si são muitas vezes idênticos, mas a garantia da qualidade, a profundidade dos ensaios e as obrigações de comprovação são muito mais extensas.

Fale conosco sobre o seu projeto

Resposta em 24 horas nos dias úteis.

info@sbs-rs.de**+49 89 541 960 200**Ler online: www.sbs-rs.de/defense-industrie/ratgeber/hochtemperaturprozesse-ruestungsindustrie