



RÁDCE DEFENCE · 12 MIN ČTENÍ

Vysokoteplotní procesy ve zbrojním průmyslu

Proč je žáruvzdorná technika ve zbrojním průmyslu nepostradatelná: metalurgie, tepelná ochrana a energetické systémy v kontextu obranného průmyslu.

Metalurgie v kontextu zbrojní výroby

Výroba zbrojního materiálu klade nejvyšší nároky na metalurgické procesy. Slitiny pancéřové oceli, vysoce výkonné materiály pro pohonné jednotky a balisticky optimalizované materiály vznikají v procesech tavení, odlévání a tepelného zpracování, které vyžadují teploty přes 1 600 °C. Žáruvzdorné vyzdívky v elektrických obloukových pecích, indukčních pecích a vakuových pecích proto musí být vysoce odolné nejen tepelně, ale i chemicky — agresivní strusky a speciální slitiny napadají konvenční žáruvzdorné materiály podstatně silněji než v civilní výrobě oceli.

- Pancéřová ocel a balistická ochranná ocel: tavení a odlévání při teplotách nad 1 650 °C v obloukových pecích s bazickou žáruvzdornou vyzdívkou
- Slitiny pro pohonné jednotky (na bázi niklu): vakuové indukční tavení (VIM) v kelímcích z oxidu hlinitého nebo oxidu hořečnatého
- Tepelné zpracování: průběžné a komorové pece pro zušlechťování, kalení a žíhání na snížení pnutí u bezpečnostně kritických dílů
- Aditivní výroba: atomizace kovových prášků pro 3D tisk vyžaduje vysoce čisté tavicí procesy se speciálními vyzdívkami kelímků
- Výroba munice: procesy odlévání plášťů střel a penetrátorů s definovanou strukturou materiálu

Poznámka: Srovnání požadavků na kvalitu — Zatímco v civilní výrobě oceli je přijatelný podíl zmetků 1–2 %, ve zbrojní metalurgii platí nulová tolerance vad. Každá odchylka v žáruvzdorné vyzdívce — například vměstek způsobený erodujícím žáruvzdorným materiálem — může vést k selhání materiálu v podmínkách nasazení. Sledovatelnost a šaržová dokumentace jsou proto povinné i pro žáruvzdorné materiály.

Tepelná ochrana a systémy tepelných štítů

Tepelná ochrana je v obranném průmyslu samostatnou technologickou oblastí. Od tepelných ochranných štítů v raketových střelách přes výfukové systémy v obrněných vozidlech až po tepelnou izolaci v námořních pohonných systémech — všude tam, kde vznikají teploty přesahující zatížitelnost konvenčních materiálů, se používají žáruvzdorné materiály. Požadavky přitom výrazně přesahují statické vyzdívky pecí: rozhodujícími kritérii výběru jsou odolnost proti tepelnému šoku, nízká hmotnost a odolnost proti vibracím a zrychlení.

•

Raketové střely a návratová tělesa: ablativní tepelně ochranné materiály na bázi uhlíkových vláken a keramických kompozitů

- Výfukové systémy obrněných vozidel: žáruvzdorné vyzdívky musí odolat teplotám nad 900 °C při současném zatížení vibracemi
- Lodní pohony: spalovací komory plynových turbín a spalínové trasy fregat a korvet vyžadují vysokoteplotně odolné izolační materiály
- Raketové motory: vyzdívky hrdla trysky z grafitu, wolframu nebo keramických kompozitů s keramickou maticí (CMC)

Poznámka: Aspekt dvojího užití u materiálů tepelné ochrany — Mnoho vysokoteplotních materiálů pro tepelnou ochranu podléhá nařízení EU o zboží dvojího užití (EU) 2021/821. Keramické vláknové kompozity, určité kvality grafitu a vysoce výkonné keramiky jsou uvedeny v příloze I. Dodavatelé proto musí znát své povinnosti v oblasti kontroly vývozu a zavést interní compliance procesy.

Energetické systémy a pohonná technika

Moderní zbraňové systémy a platformy jsou odkázány na výkonné energetické systémy. Plynové turbíny v bojových tancích, lodní pohony a pomocné pohonné jednotky v letadlech vytvářejí extrémní teploty, které vyžadují žáruvzdorné vyzdívky, materiály spalovacích komor a tepelné bariéry. Vývoj směrem k energetickým zbraním (Directed Energy Weapons, DEW) a hypersonickým technologiím nároky na tepelný management dále zostrňuje.

- Plynové turbíny (MTU, Rolls-Royce): tepelné bariérové povlaky (TBC) na bázi oxidu zirkoničitého stabilizovaného yttriem chrání lopatky turbín při teplotách nad 1 300 °C
- Directed Energy Weapons: chladicí systémy a tepelné stínění vysokoenergetických laserů vyžadují materiály s extrémně nízkou tepelnou vodivostí
- Hypersonická technologie: materiály špiček a náběžných hran musí odolat teplotám nad 2 000 °C při současném aerodynamickém zatížení
- Zásobování polních táborů energií: mobilní spalovací systémy a využití odpadního tepla se žáruvzdornou vyzdívkou

Poznámka: Technologický náskok díky výzkumu materiálů — Zvládnutí vysokoteplotních procesů představuje strategický technologický náskok. Země s vlastní schopností vyrábět ultravysokoteplotní keramiky (UHTC), jako je karbid hafnia a diborid zirkonia, mají rozhodující výhodu při vývoji hypersonických zbraní a návratových těles.

Zkoušení a zajištění kvality

Žáruvzdorné materiály v kontextu zbrojní výroby podléhají přísnějším požadavkům na zkoušení a dokumentaci než v civilním průmyslu. Zajištění kvality zahrnuje nejen materiálově technické zkoušky (pevnost v tlaku, pórovitost, tepelná vodivost), ale také zcela souvislou sledovatelnost surovin, uvolnění šarže zadavatelem a dodržování vojenských specifikací.

- First Article Inspection (FAI): kontrola prvního vzorku podle AS9102 pro každý nový žáruvzdorný produkt v kontextu obranného průmyslu
- Sledování šarží: souvislá dokumentace od suroviny až po zabudovaný žáruvzdorný materiál — v souladu s AQAP 2110
- Nedestruktivní zkoušení (NDT): ultrazvuk, rentgen a termografie pro posouzení integrity vyzdívky v zabudovaném stavu
- Simulace prostředí: cyklické tepelné zatížení, vibrační zkoušky a odolnost proti korozi za simulovaných podmínek nasazení

Poznámka: Požadavky AQAP na dodavatele — NATO Allied Quality Assurance Publications (AQAP) definují požadavky na kvalitu u dodavatelů obranného průmyslu. AQAP 2110 (vycházející z ISO 9001) je minimálním

požadavkem. Pro dodavatele, kteří provádějí vlastní zkoušky, platí navíc AQAP 2120. Dodržování kontrolují německé vojenské orgány pro ověřování jakosti (Bundeswehr-Güteprüfstellen, GüPrSt).

Technologie budoucnosti a trendy

Obranný průmysl masivně investuje do technologií budoucnosti, které všechny vyžadují vysokoteplotní procesy. Od Future Combat Air System (FCAS) přes hypersonické střely až po nové koncepty pancéřování — nároky na žáruvzdornou techniku a tepelný management budou dále růst. Specializovaným dodavatelům se tím otevírají dlouhodobé obchodní příležitosti.

- FCAS/NGWS: nová generace materiálů pro pohonné jednotky pro požadavky stealth a vyšší provozní teploty
- Aдитivní výroba: 3D tisk žáruvzdorných dílů pro prototypy a malé série — zkracuje vývojové cykly z let na měsíce
- Keramické kompozity s keramickou maticí (CMC): lehčí než kov, teplotně odolnější — změna paradigmatu v technice pohonných jednotek
- Recyklace vzácných zemin: vysokoteplotní procesy pro zpětné získávání strategických surovin z vyřazených zbraňových systémů

Časté dotazy

Které žáruvzdorné materiály se ve zbrojním průmyslu používají nejčastěji?

Nejčastějšími žáruvzdornými materiály jsou vysocehlinité tvarovky a hmoty ($\text{Al}_2\text{O}_3 > 70\%$) pro tavicí pece, produkty na bázi oxidu hořečnatého pro bazické vyzdívky pecí, karbid křemíku pro ochranu proti opotřebení a materiály na bázi oxidu zirkoničitého pro tepelné bariérové povlaky. Pro extrémní aplikace se používají také grafit, wolfram a ultravysokoteplotní keramiky (UHTC).

Jaké certifikace potřebuje dodavatel žáruvzdorných materiálů pro zbrojní průmysl?

Minimálním požadavkem je ISO 9001 jako základní systém managementu kvality. Pro přímé dodávky zbrojním koncernům nebo Bundeswehru se navíc vyžaduje AQAP 2110 (standard kvality NATO). Podle rozsahu přístupu k informacím může být nutná bezpečnostní prověrka (Ü1 nebo Ü2). Pro vývoz jsou nezbytné znalosti nařízení o zboží dvojího užití a zákona o kontrole válečných zbraní (Kriegswaffenkontrollgesetz, KrWaffKontrG).

Liší se požadavky na žáruvzdorné materiály ve zbrojní výrobě od civilního průmyslu?

Ano, podstatně. Ve zbrojní výrobě platí užší tolerance, souvislá sledovatelnost, uvolnění šarže zadavatelem a dokumentace podle standardů AQAP. Materiály samotné jsou často identické, ale zajištění kvality, hloubka zkoušek a povinnosti prokazování jsou výrazně rozsáhlejší.

Promluvme si o vašem projektu

Odpověď do 24 hodin v pracovních dnech.

+49 89 541 960 209

Či online: www.sbs-rs.de/defense-industrie/ratgeber/hochtemperaturprozesse-ruestungsindustrie

info@sbs-rs.de