

Wolframový prach jako významný odpad z jaderného fúzního reaktoru

Jaroslav Stoklasa jaroslav.stoklasa@cvrez.cz; Lucie Karásková Nenadálová, lucie.nenadalova@cvrez.cz, Centrum výzkumu Řež s.r.o.

Souhrn

Během běžného provozu tokamaku (JET, ITER, EU DEMO) se velmi odolný wolframový pancíř na vnitřním povrchu reaktoru opotřebovává. Jsou zkoumány zdroje wolframového prachu a posuzuje se mechanismus jeho vzniku. V důsledku probíhajících procesů se uvolňují částice wolframu různých velikostí. Uvolněný wolfram je obvykle tritiováný. Obvykle se z reaktoru odstraňuje ve formě prachu a nakládá se s ním jako s odpadním materiálem. Tento cenný materiál by měl být oddělen od radioaktivního tritia a recyklován. Ke koncentraci wolframu při současném odstranění tritia je možné použít buď technologii MSO (oxidace v roztavené soli), nebo alternativně indukční ohřev a tavení, případně jejich vhodnou kombinaci. Jsou popsány experimentální zkoušky extrakce wolframového prachu pomocí obou technologií. Záměrem je představit možnost recyklace částic wolframového prachu pomocí těchto metod, které se zdají být velmi slibné pro zpracování a využití tohoto cenného odpadu.

Klíčová slova: Wolfram; Odpady, Molten Salt Oxidation (MSO), Indukční ohřev (IH), Velikost částic

1. Úvod

Existuje několik otevřených otázek, které je třeba zodpovědět v průběhu fáze koncepčního návrhu EU DEMO. Je pravděpodobné, že budou použity určité konstrukční materiály. Nové, a doufejme, že vhodnější funkční materiály jsou ve vývoji. Pro konstrukci částí zařízení již byly definovány materiály, zejména wolfram a ocel. Množství a parametry odpadního prachu vznikajícího uvnitř tokamaku z těchto dvou materiálů však lze pouze odhadovat.

Opotřebení vnitřního povrchu tokamaku je způsobeno různými faktory. Ty jsou například důsledkem kinetické energie náhodných neutrálních částic a jejich interakce s konstrukčními a funkčními materiály, neutronového záření, vysokého tepelného a elektromagnetického zatížení, které vyvolává značné tepelné a mechanické namáhání, a také kombinací nebo interakcí všech těchto jevů. Všechny tyto procesy a jevy mění lokální entropii systému. Kromě toho bylo pozorováno uvolňování částic různých velikostí, od jednotlivých atomů přes shluky atomů až po zrna a větší kompaktní celky.

Hlavním cílem této práce bylo vyhledat v literatuře významné údaje o vzniku prachového odpadu, vybrat je a sloučit do informací, které jsou relevantní pro naše experimenty.

U většiny prací zabývajících se pevnými odpady ale nebyl brán v úvahu celý základní řetězec mezi výrobou materiálu zařízení až do likvidace odpadu. Naší snahou bylo tuto mezeru vyplnit podrobnějším zaměřením se na v současnosti nejdůležitější pevný materiál namáhaný provozem fúzního zařízení a který je významným zdrojem odpadu, což je wolfram.

Základní téma článku je zaměřeno na využití technologií MSO (oxidace roztavenou solí) a IH (indukční ohřev) k přepracování prachového wolframového odpadu z procesu fúze. Výzkum je směřován k řešení dvou problémů. První fází je oddělení radioaktivního tritia od wolframu. Druhou fází je přepracování wolframového zbytku na druhotnou surovinu. Přitom nelze opominout potenciálně vysokou variabilitu vlastností W prachu, jak je zmíněno v různé literatuře.

U technologií MSO i indukčního ohřevu a tavení za vyšších teplot existuje mnoho neznámých. Také variabilita prachového wolframového odpadu způsobuje značné komplikace pro definování parametrů obou technologií. Z těchto důvodů nejsou alternativní technologie (například užívací LASER) zvažovány v literárním přehledu.

1.1. Původ vad různých wolframových materiálů

Při běžném provozu jaderného fúzního reaktoru dochází k opotřebení vysoce odolného wolframového (W) pancíře, které má za následek uvolňování wolframových částic různých velikostí. Jsou testovány některé vybrané podmínky a situace, které mohou ovlivnit vznik defektů, poruch a následně volného prachu W.

Většinu citovaných prací, ale i další nám známé práce v oblasti fúze, kde se produkuje prach, charakterizuje obvykle zájem o popis jednoho problému nebo jednoho zařízení. Odpadní prach bývá popsán jako důsledek činnosti tokamaku nebo jeho části. Výběrem námi citovaných prací jsou dány obecně do souvislosti různé zdroje a původ prachu, změny materiálu v odpad a transformaci odpadu, který je následně hromaděn.

Materiály používané jako komponenty obklopující plazma v budoucích fúzních reaktorech budou vystaveny komplexnímu zatížení a různým formám interakce s druhy s nízkým Z, jako jsou izotopy vodíku a helia [1]. Komponenty divertoru budou patřit k nejintenzivněji zatěžovaným, protože budou muset přenášet jmenovité tepelné zatížení až 10-20 MW/m². Zatímco povrch obrácený k plazmatu je ozařován vysoce energetickými částicemi deuteria, tritia a helia, které pocházejí z hořícího plazmatu, opačná strana bude vystavena chladicímu médiu o zvýšené teplotě. Pokud není situace komplexně řešena, hrozí poškození nebo dokonce zničení materiálu.

Variabilita W prachu souvisí zejména s procesy kolem vzniku prachu. Jeho vlastnosti se mění podle původu a míst vzniku. Prach, jeho fyzikální vlastnosti a velikost se mění také během celé cesty ve fúzním zařízení. Zdroj a kvalitu prachu ovlivňují vysoké teploty a jiné proměnlivé parametry při jeho vzniku (magnetické a elektrické pole, neutrony, tlaky a složení plynů a další). Důležité jsou také způsoby a metody odběru vzorků prachu. Rozdíly poskytují odběry vzorku z chladných dílů zařízení například při údržbě nebo opravě zařízení. Jiné kvality jsou vzorky prachu, které prošli celým zařízením nebo jenom některou jeho sekcí, pokud byly zachycené v chladné a pevné podobě například při kontinuálním čištění plynů.

Wolfram uvolněný z povrchu součástí obrácených k plazmatu je obvykle tritiován. Z reaktoru se odstraňuje jako prach a považuje se za odpadní materiál. Tento cenný materiál [2] by měl být od radioaktivního tritia oddělen a recyklován.

Bylo studováno chování slitin W a W v plynu He při teplotě 720 °C [1]. Čisté W materiály prošly pouze malou povrchovou modifikací. U slitin W došlo k oxidaci, přednostně legujících prvků. Byla hodnocena morfologie povrchu W kvalifikovaného pro ITER po expozici heliem. Zatímco neexponovaný povrch byl prakticky bez rysů, po expozici se na povrchu objevily malé rozptýlené „shluky“ nebo „uzlíky“. Jejich velikost se pohybovala od ~200 nm do ~2 μm; většina byla menší než 1 μm. Zkoumání pomocí EDS (energetická disperzní spektroskopie) na řezu TEM (transmisní elektronová mikroskopie) ukázalo, že shluky byly složeny pouze z wolframu.

K překonání vnitřní křehkosti wolframu se vyvíjí kompozitní materiál wolframu vyztužený wolframovými vlákny (Wf/W) [3][4]. Tento kompozit se vypořádá s křehkostí W vnějším zpevněním zavedením mechanismů rozptylu energie [5][6]. Tyto mechanismy nejsou závislé na vnitřních vlastnostech materiálu, jako je tažnost.

Vysokorychlostní nárazy prachu do stěny představují mechanismus poškození stěny a destrukci prachem. Normální nárazové krátery W na W jsou studované [7] při cílových teplotách od -100 °C do +400 °C a nárazových rychlostech v rozmezí 630-3100 m/s.

Uvolňování prachu W z kompaktních povrchů může být iniciováno mechanickými a tepelnými procesy. V práci [8] byly pomocí výpočtové analýzy lomové mechaniky zkoumány vlastnosti praskání povrchu wolframového pancíře při tepelném rázovém zatížení v režimu lokalizovaného na hraně (ELM). Na základě výsledků bylo stanoveno prahové zatížení pro vznik trhlin v rozmezí 0,3 až 0,6 GW·m⁻². Předpokládaná prahová základní teplota se pohybuje mezi 200 a 400 °C.

Studie [9] shrnuje experimentální výsledky vystavení čistému tepelnému zatížení, relevantnímu pro fúzi, různých z různých wolframových výrobků v zařízeních s elektronovým svazkem, JUDITH 1 a 2. Výsledky ukazují, že mechanická pevnost materiálu má významný vliv na vznik a vývoj poškození. Zejména rekrytalizace a tání/tuhnutí způsobí, že materiál bude náchylnější k tepelným šokům a únavě, což urychlí vývoj jakéhokoli poškození.

Vlivem materiálových vlastností surového prášku na výslednou kvalitu dílu W se zabývá článek [10]. Jsou popsány experimenty s tepelnými šoky na sypkých vzorcích W, vyrobených aditivním výrobním procesem, s využitím zařízení JUDITH 2 s elektronovým svazkem. Materiál W, konsolidovaný pomocí laserové fúze v práškovém loži (LPBF), může přežít vysoce intenzivní tepelné rázové zatížení.

Poškození deformovaného dvojité kovaného čistého wolframu bylo studováno v experimentálních simulacích přechodných dějů podobných ITER s příslušnými parametry tepelného zatížení povrchu [11]. Diskutuje se vývoj morfologie povrchu exponovaných terčů, jakož i praskání a bobtnání na povrchu. Na povrchu čistého wolframu a slitin wolframu a tantalu vznikají v důsledku ozáření povrchu tepelným zatížením nad prahem tavení sítě mikro a makro trhlin. Transmisní elektronová mikroskopie byla použita k určení, které defekty se během expozice objevují jako první, a k porovnání různých účinků strojů JUDITH 1 a 2 [12]. Nevznikly žádné malouhlové hranice zrn, pouze čárové dislokace.

Chemicky napařovaný wolfram (CVD-W) je slibným materiálem pro plazmě čelící materiály [13]. Vzorky vykazují dobrou odolnost vůči tvorbě puchýřů a při daných fluencích bylo pozorováno pouze několik puchýřů o průměru mikronu. Předpokládá se, že mikrostruktura sloupcovitých zrn a textura vzorků CVD-W pomáhá potlačovat puchýře vyvolané plazmatem, a tím snižuje retenci D. To může významně ovlivnit tvorbu W prachu.

Vliv orientace zrn a povrchové teploty na růst heliových bublin na wolframovém povrchu vystaveném nízkotlakému heliovému plazmatu byl zkoumán prostřednictvím detailního SEM snímkování před a po wolframu se vyvíjí kompozitní materiál vyztužený wolframovými vlákny expozici plazmatu [14]. Z analýzy nano-otvorů vytvořených na povrchu vyplývá, že hustota a velikost povrchových bublin se zvyšují s vyššími teplotami a v závislosti na orientaci zrn.

Role dislokace vyvolané tepelným napětím a migrace hranic zrn včetně přechodů orientace zrn na povrchu wolframu za cyklických tepelných šoků do teplot 1573 K studuje v [15]. Hloubka těchto orientovaných přechodů orientace zrn může dosáhnout několika desítek mikrometrů, zatímco výsledná drsnost povrchu zůstává kolem 1 μm .

1.2. Vliv vodíku na poškození wolframu

Odhad toku izotopů vodíku působících na součásti stěn fúzního reaktoru je důležitý pro výběr materiálu a pro zajištění bezpečného a hospodárního provozu reaktoru [16]. Ve všech zkoumaných kombinovaných materiálových systémech je vliv rozhraní, tedy změny materiálu, na propustnost toku zanedbatelný ve srovnání s mnohem větším vlivem mikrostruktury vrstvy, která propustnost silně ovlivňuje. Propustnost vrstvy W je o několik řádů vyšší než propustnost sypkého W. Podobně lze předpokládat, že má vliv na pohyb uvolňovaných pevných částic.

Byl studován vliv hranic zrn (GB) na transport deuteria (D) a vznik defektů v nanokrystalických vrstvách wolframu (W), nanesených na substrátu W [17]. Transport a retence D byly hodnoceny na základě měření hloubkových profilů D po různých dobách expozice pomocí analýzy jaderných reakcí (NRA) s využitím svazku iontů ^3He . Koncentrace D v poškozené oblasti byla nejvyšší ve vzorku s nejmenší velikostí zrn. To ukazuje, že v nanokrystalickém wolframu ozářeném při teplotě 300 K hranice zrn (GB) nezlepšují odolnost vůči záření. Články [10][18] popisují podobný účinek na wolfram a zachyt vodíku vyvolaný působením směsi deuteria a tritia.

1.3. Tvorba a akumulace prachu

Primárním zdrojem prachu jsou místa uvnitř zařízení, která jsou vystavena tak, že dojde k narušení povrchu materiálu [19][20]. Kvantitativní a kvalitativní parametry prachu jsou ovlivňovány různými mechanismy a procesy, o nichž je pojednáno. Byly studovány povrchové vady a strukturální změny přehřáté (823 K) wolframové desky po vystavení plazmovému toku [21]. Zahřátí základny wolframové desky nad teplotu přechodu tvárnost-křehkost umožnilo kontrolovat teplotní gradient na jejím povrchu při působení pulzního plazmatu, ale neeliminovalo praskání povrchu. Tím se však výrazně minimalizovalo množství prachu uvolňovaného z povrchu

wolframové desky vlivem plazmového toku a nebyl pozorován téměř žádný prach. Na povrchu předehřáté wolframové desky byly po expozici plazmovým tokem zjištěny trhliny o šířce maximálně 1 μm a byly pozorovány také krátery a puchýře.

Experimenty s tvorbou a obnovou defektů vyvolaných neutronovým zářením byly na wolframu prováděny ve velké míře [22][23]. Proto jsou aktivační energie potřebné pro tvorbu intersticiálů, vakancí, klastrů a migraci pravděpodobně nejstudovanějšími a nejpřesnějšími dostupnými údaji o ozáření wolframu. Na druhou stranu makroskopické účinky a mechanické vlastnosti nebyly nikdy podrobně zkoumány [24]. V důsledku toho stále není k dispozici velké množství technických údajů pro širší rozsah teplot a dávek, jako jsou údaje o lomové mechanice, únavě nebo creepu a o bobtnání dutin vyvolaném zářením. Bylo prokázáno, že vysoký tepelný tok a tepelné rázy wolframu a wolframových materiálů jsou způsobeny velmi složitou interakcí mezi řadou parametrů, které zahrnují mimo jiné podmínky zatížení, tepelné a mechanické vlastnosti a mikrostrukturu.

Limity pro prach a zásoby tritia jsou nedílnou součástí bezpečnostního případu ITER a jsou stanoveny na 1 kg pro tritium, 1000 kg pro snadno mobilizovatelný prach a 11 kg (beryllium)/76 kg (wolfram) pro prach na horkých površích [25]. Pro spolehlivý odhad zásob prachu by se inspekce měla zaměřit na oblasti uvnitř kontejnmentu, u nichž je větší pravděpodobnost, že obsahují velké koncentrace prachu. Obvykle se tvrdí, že gravitační pohyb povede spíše k hromadění prachových částic na podlaze vakuové nádoby.

Experimentální stanovení odtrhové síly pro wolframový prach ulpívající na wolframovém povrchu je popsáno v [26]. Experimentální odtrhová síla je téměř o dva řády menší než síla předpovězená z modelů kontaktní mechaniky, ale je v silném souladu s Van der Waalsovým vzorcem pro sférický mikronový prach různých velikostí. Teoretické vysvětlení se týká efektů drsnosti povrchu v nanometrovém měřítku pro tuhé materiály, jako je wolfram.

Tvar a rozdělení velikosti odpadního prachu je ovlivněno celým cyklem otěru a opotřebení materiálů. Mění se fyzikálně-chemické vlastnosti, fázové složení, množství a poměr izotopů, typy a intenzita záření a mineralogické složení. Důležité jsou všechny procesy a způsoby, kterými může prach vznikat. Z tohoto důvodu se velikost částic pohybuje od shluků atomů až po milimetry [27].

1.4. Shrnutí následků procesů při vzniku odpadního W prachu

Působení běžných procesů ve fúzním reaktoru na kompaktní primární wolframový materiál má za následek vznik odpadu s wolframem. Podle místa působení jednotlivých procesů dojde u dříve kompaktního povrchu od jeho narušení do různé hloubky až k uvolnění částic z něj. Obvykle proběhne lokální kombinace různých fyzikálních, chemických nebo radiologických jevů, které mají vliv na kompaktnost a celistvost jinak velmi odolného materiálu.

Mezi významné fyzikální a fyzikálně – chemické jevy patří tepelná a teplotní roztažnost, následky změn teplot (krystalizace, fázové přeměny komponent, vznik dutin), difuze (zejména dutin nebo plynů), povrchové chemické reakce (vodík a kov), adsorpce a desorpce. Mezi radiologické jevy patří přeměna izotopů působením neutronů [28] a dalšího záření.

Důsledkem jsou zrna různých rozměrů, tvarů a velikosti. Zrna mají rozmanitou vnitřní pórovitost i kvalitu povrchu v mikro rozměrech. Povrch zrn nebývá kompaktní a má velkou variabilitu v nedokonalostech. To vše ovlivňuje chování materiálů při další úpravě a přepracování. Lze se domnívat, že některé vlastnosti materiálů jsou importovány už z prvotní výroby konstrukčního materiálu ještě před zabudováním do reaktoru. Jiné vlastnosti nebo parametry odpadních materiálů souvisí s dlouhodobým namáháním dílčími procesy v konkrétním prostoru nebo části fúzního zařízení. Pestrost vzhledu (zatím potenciálních) odpadních prachů ukazují mnohé publikace na dokumentovaných obrázcích, například [3][12][17][28]. Lze předpokládat, že značná část odpadních prachů bude mít velmi podobný vzhled, rozmanité vlastnosti a chování, když v budoucnosti bude produkována zařízeními ITER nebo EU DEMO.

2. Experimentální metody pro přepracování wolframového odpadního prachu

V rámci projektu EUROfusion se v rámci vývoje a návrhu EU DEMO testují různé alternativy přepracování wolframového odpadního prachu. S ohledem na výše zmíněnou literaturu byly pro základní testy použity W prachy různých zrnitostí.

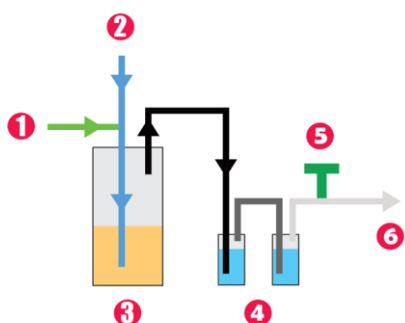
Kompaktní vzorky wolframového prachu s různým granulometrickým složením byly připraveny lisováním do tvaru malého válce. Zkušební pelety byly připraveny z wolframových částic o velikosti zrn 20 μm , 0,4-0,8 mm a 1-2 mm. Byl použit laboratorní hydraulický lis BSML 21 s lisovací silou 250 kN.

Ve Výzkumném centru Řež (CVR) se provádějí zkoušky pomocí technologie Oxidace v roztavené soli nebo alternativně Indukčním ohřevem a tavením, případně jejich kombinací [29]. Během na míru šitých spékacích procesů dojde ke zhutnění surových kompakťů na stupeň, který je dostatečný pro následné termomechanické zpracování. Spékání wolframu se může provádět při teplotách mezi 2000 a 3000 $^{\circ}\text{C}$ za proudícího vodíku nebo ve vakuu při podobných teplotách, a to buď přímým spékáním (samooodporový ohřev), nebo nepřímým spékáním (systémy ohřevu odporovými prvky). Zkoušky se provádějí ve vakuové komoře při zvýšených teplotách. Vzorky budou dále zkoumány za účelem stanovení difúzního objemu vodíku. Na základě výsledků bude možné rozhodnout o možné recyklaci wolframových prachových částic vzniklých v rámci navrhovaného projektu EU DEMO.

2.1. MSO (oxidace roztavenou solí)

Oxidace v roztavené soli je technologie, která využívá bezplamennou oxidaci v roztavené soli [29]. Jedná se o alternativu ke konvenčnímu zpracování, tj. rozkladu nebezpečných a radioaktivních odpadů. Odpad směřuje pod povrch roztavené soli spolu s oxidačním činidlem (O_2 , vzduch), pokud prach W obsahuje organický odpad nebo jinou spalitelnou složku. Aby byl provoz procesu optimální, musí probíhat na rozhraní tří fází. Princip, na němž je technologie založena, spočívá v přepracování vhodných materiálů rozdělením materiálů na jejich kapalnou a plynnou fázi. Při předem definované zvýšené teplotě jsou pevné a kapalně materiály zachyceny v alkalické roztavené soli a odděleny od plynných produktů. V soli se zachycují těžké kovy a radionuklidy, které lze následně přepracovat.

Schéma laboratorního zařízení MSO je na obrázku 1, kde vstup č. 1 je určen pro dávkování wolframového odpadu, vstup č. 2 je určen pro vzduch. Plyny rozpustné ve vodě se zachycují v promývačkách č. 4 a vývěva č. 5 usnadňuje proudění plynů a par z reaktoru č. 3. Voda z promývaček se analyzuje. Obsah deuteriové vody byl analyzován metodou infračervené spektrometrie s Fourierovou transformací a zeslabeným úplným odrazem (ATR-FTIR). Obsah tritiové vody byl analyzován metodou kapalinového scintilačního počítání (LSC).



Obrázek 1. Schéma a fotografie laboratorní aparatury MSO, 1 - hnací plyn (vzduch), 2 - dávkovač pelet, 3 - reaktorová nádoba, 4 - vodní bublinky, 5 - vývěva, 6 - ventilace.

Testují se různé zrnitostní frakce wolframového prachu a jejich směsi, od velmi jemných frakcí (pod 20 μm) přes středně velké (0,4-0,8 mm) až po zrnitost 1-2 mm. Tyto vzorky wolframu se používají buď přímo neupravené, nebo upravené tak, aby obsahovaly buď deuteriovou vodu, nebo tritiovou vodu v definovaném množství. Vzorky se do reaktoru dávkuje průběžně nebo v dávkách po gramech.

Podrobnosti kolem testů s deuteriovým a tritiovým wolframem, týkající se vodíku, nejsou obsahem tohoto článku. Je nutné však zdůraznit, že v roztavené soli na konci MSO procesu nezůstává s wolframem žádný vodík.

Pro naše reaktorové zkoušky se používají uhličitany alkalických kovů (Na, K, Li) nebo jejich směsi. Tyto soli se taví při různých sledovaných teplotách a vzorky wolframového prachu se do těchto solí dávkuje různými způsoby.

Příkladem parametrů zkoušky je použití Li_2CO_3 udržovaného při teplotě 800 $^{\circ}\text{C}$, zrnitostní frakce wolframového prachu dávkovaného kontinuálně nebo v dávkách v řádu jednotek gramů. Bylo použito 180 g uhličitánových alkalických solí. Teplota bylo udržována po dobu 30 min a následně došlo rychlému ochlazení.

Předběžné testy ukázaly, že veškerý kovový wolfram, který byl dávkován, mohl být během procesu MSO přeměněn na oxidy a hydráty oxidů. Přesto bylo sledováno procházení zrn wolframu roztavenou solí.

Při oddělování zachycených wolframových produktů od uhličitánové soli byly nejprve odděleny alkalické uhličitany. To bylo provedeno tak, aby nedošlo ke ztrátě pevného W ani wolframových solí. Tento postup se střídá s promýváním vodou a promýváním vhodnými kyselinami (HCl , H_2SO_4 , HNO_3). Rozpuštěné produkty byly odpařeny a vysráženy. Pevný produkt s wolframem byl shromážděn. Odstraněné rozpustné soli byly zkontrolovány na obsah wolframu. Oddělená pevná fáze wolframu byla několikrát promyta demineralizovanou vodou a v konečné fázi vysušena.

Byla provedena analýza XRD (Rentgenová difrakce) vzorků, které prošly procesem MSO. K měření byl použit práškový difraktometr PANalytical X'Pert Pro.

K ověření distribuce velikosti částic ve vzorku byl použit rastrovací elektronový mikroskop SEM Lyra 3 od společnosti Tescan a energiově disperzní rentgenový spektrometr (EDX) od společnosti Oxford Instruments. Pro zkoušky byl použit wolfram s deklarovanou velikostí částic v rozmezí 0,5 - 2 μm . Jedná se o nejmenší frakci wolframu, která prošla procesem MSO a všemi promývacími kroky. Základní měření byla zaznamenána [30]. Vzorek byl připraven podle certifikované metodiky SUJB [31]. Pro měření byly použity následující parametry: Depthmode, urychlovací napětí 25 kV, proud 1-5 nA při stopě paprsku <50 nm, pracovní vzdálenost 9 mm. Při měření byl použit detektor zpětně rozptýlených elektronů (BSE).

2.2. Indukční ohřev

Indukční tavení ve studeném kelímku je inovativní proces, který lze použít k tavení reaktivních materiálů při vysokých teplotách [32]. Místo keramického kelímku se používá vodou chlazený segmentový kelímek, aby se zabránilo jakýmkoli reakcím mezi náplní a kelímkem. Magnetické pole generované externí cívkou proniká šterbinami kelímku a indukuje proudy, které Jouleovým ohřevem roztaví náboj.

Indukční ohřev lze provádět přímou nebo nepřímou metodou [33]. Při přímém indukčním ohřevu vznikají Jouleovy ztráty přímo v ohřívaném objektu. Nepřímý indukční ohřev zahrnuje ohřev prvku, který lze indukčně ohřívát, a přenos tohoto tepla vedením na obrobek. Různé metody indukčního ohřevu se používají k dosažení vysokých teplot v mnoha typech materiálů, například v metalurgii nebo při přípravě polovodičů [34]. Používá se také při studiu interakcí materiálů s radioaktivním roztaveným korielem [35] a při studiu chování vysoce žáruvzdorných materiálů, kde může být využita k popisu fázových jevů při vysokých teplotách [36].

Spékání wolframových prášků může probíhat při relativně nízkých teplotách (1000-1200 $^{\circ}\text{C}$) ve vhodné atmosféře. Studie [37] popisuje spékání bez legujících přísad za použití uzavřeného reakčního prostoru a vody nasycené vodíkem a vodní párou.

Výhodou indukčního ohřevu je možnost dosažení velmi vysokých teplot (nad 2000 °C), při kterých se může ve vhodné atmosféře uvolnit veškerý vodík, například z tritiovaného odpadu.

Byly provedeny testy přímého a nepřímého ohřevu ve studeném kelímku s práškovým wolframem.

Byly připraveny různé typy vzorků: s přidavkem demineralizované vody, s přidavkem tritiové vody a bez přidavku vody. Kromě toho byly testovány také vzorky připravené v ENEA Frascati. Tyto vzorky byly připraveny použitím wolframového prachu, do kterého byl za vysokého tlaku a teploty přidán vodík (s konečnou koncentrací 15 ppm vodíku). Vzorek v uhlíkovém kelímku byl zahříván nepřímo pomocí IH v inertní atmosféře argonu. Při teplotě cca 1300 °C došlo k odstranění vodíku.

Kelímek byl zahříván elektromagnetickou indukcí a vzorek byl zahříván přímo. Aby se zabránilo oxidaci wolframu, probíhala operace v inertní atmosféře argonu. Vzorek byl vyroben stlačením směsi o velikosti zrn 20 µm až 2 mm. Byl slinován při teplotě 1730 °C přímým indukčním ohřevem, kolem vzorku byla vrstva ZrO₂, která tvořila bezpečnostní kelímek a bránila oxidaci okolním atmosférickým vzduchem.

3. Výsledky testů

3.1. Výsledky MSO

Práškový wolfram prošel procesem MSO a byl použit při zkouškách dávkování prášku v zařízení CVR. Značná část vzorku byla v procesu oxidována a rozpuštěna v uhličitánové tavenině.

Vstupy a výstupy z experimentální práce s wolframovými frakcemi v roztavených solích ukazuje Tabulka 1. Pevný produkt byl získán po rozpuštění ochlazené uhličitánové soli z reaktoru MSO a oddělení rozpuštěných látek dekantací a promýváním.

Na dně reaktoru se nahromadilo 30 až 80 % pevného wolframu v závislosti na nastavení procesu. Naměřeno bylo maximálně 97.1 %.

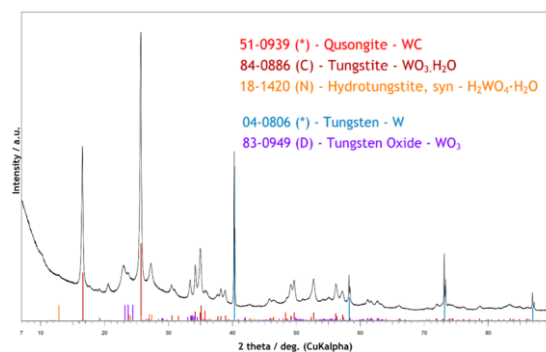
Tabulka 1. Vstupy a výstupy pevných složek experimentální práce s wolframovou frakcí v roztavených uhličitánových alkalických solích

Frakce W	≤ 20 µm	0,4-0,8 mm	1-2 mm	≤ 20 µm	0,4-0,8 mm	1-2 mm	≤ 20 µm	0,4-0,8 mm	1-2 mm
	Na₂CO₃; t 950 °C			Li₂CO₃; t 800 °C			K₂CO₃; t 980		
Vstup W (g)	20,697	20,104	20,384	19,60	20,00	20,00	20,047	20,505	20,251
Metal W (g)	0,631	8,852	10,199	3,101	19,322	19,432	1,328	9,395	12,963
WO ₃ ·xH ₂ O (g)	13,724	2,553	5,428	18,277	0,755	5,358	15,191	4,339	0,412

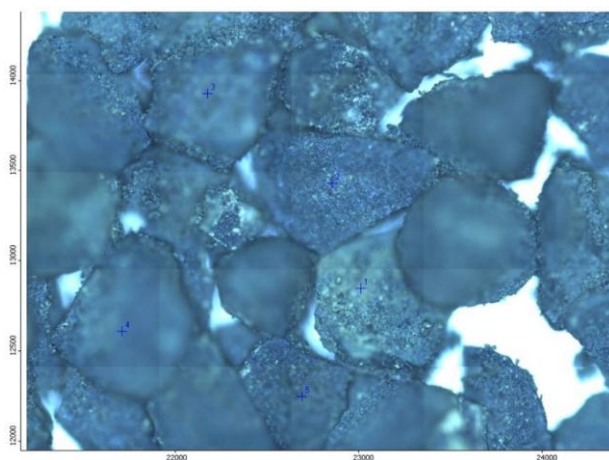
Stupeň oxidace wolframu je úměrný granulaci: přímo úměrný velikosti plochy zrna a nepřímo úměrný průměru zrna, plyne to z Tabulky 1. Při vhodném dávkování a oxidačních podmínkách však lze rozpustit 100 % pevného wolframu. Pro další práci je výhodné zachytit pevný wolfram, který lze znovu zpracovat například indukčním ohřevem.

Analýza XRD kovových zrn W ošetřených MSO je uvedena na obrázku 2.

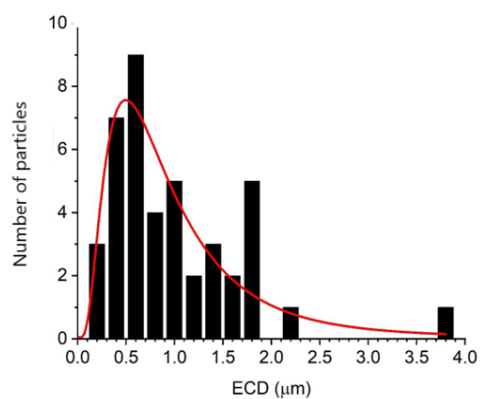
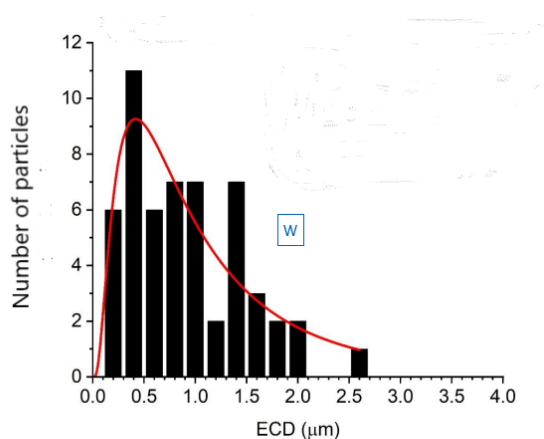
Pevné produkty byly užity pro další měření. Souhrn základních měření na rastrovacím elektronovém mikroskopu Lyra 3 je uveden v tabulce 2. Na obrázku 3 jsou zobrazena wolframová zrna o velikosti 0,4 až 0,8 mm ze vzorku, který prošel procesem MSO. Jedná se o pevný zbytek, který zůstane po odstranění ve vodě rozpustných solí. Na obrázcích 4 a 5 jsou znázorněny příklady seskupování jemných wolframových částic. Rozprostřené částice mají tendenci vytvářet také komplikovanější shluky určité stability, jak je vidět na obrázku 6.



Obrázek 2. Analýza XRD kovových zrn W o velikosti 20 μm z reaktoru MSO. Roztavenou solí byl Li_2CO_3 při teplotě 800 $^\circ\text{C}$.



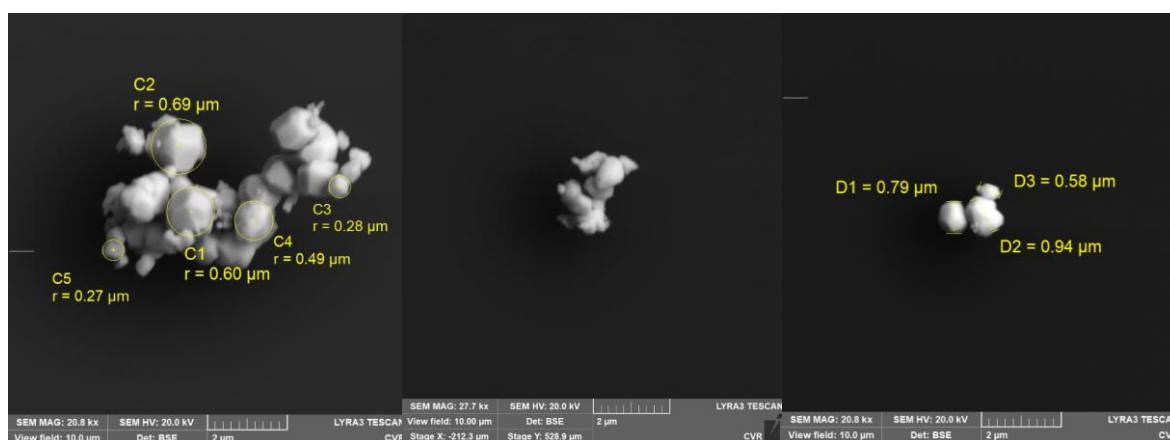
Obrázek 3. Fotografie finálního vzorku W o velikosti zrn 0,4-0,8 mm s roztaveným Li_2CO_3 pomocí Ramanovy spektroskopie.



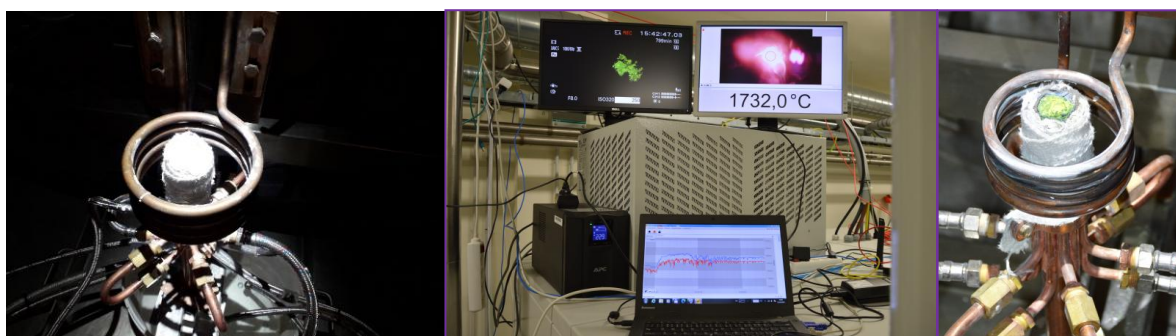
Obrázek 4 a 5. Rozložení velikosti wolframových částic v analytické oblasti 1 (vlevo) a v analytické oblasti 2 (vpravo).

Tabulka 2. Souhrn základních měření nejmenší frakce wolframu.

	Oblast 1	Oblast 2
Doba analýzy (min)	39	38
Počet detekovaných a analyzovaných částic	54	42
Plocha pole (μm^2)	1600	1600
Celková analyzovaná plocha (μm^2)	4070 0	5850 0
Celková plocha analyzovaných částic (μm^2)	41,7	42,3
Procento detekovaných a analyzovaných částic na plochu	0,1	0,07



Obrázek 6. Shluk wolframových částic zobrazený v režimu BSE; fotografie je doplněna měření poloměrů jednotlivých částic tvořících obrazový shluk.



Obrázek 7. Pohled na indukční systém před ohřevem (vlevo) a po ohřevu (vpravo), prostřední obrázek ukazuje řídicí systém studeného kelímku.

3.2. Výsledky indukčního ohřevu wolframového prachu

Proběhlo několik typů ohřevu (přímý, nepřímý) vzorků v různé atmosféře. Byly připraveny kompaktní vzorky z různých druhů wolframových prášků.

Pohled na vytvořený studený kelímek a indukční systém před ohřevem a po ohřevu vzorku nabízí obrázek 7. Studený kelímek pro vzorek W byl potažen vrstvou oxidu zirkoničitého. Vzorek je zahříván přímo elektromagnetickou indukcí v inertní atmosféře argonu.

Na obrázku 8 je znázorněn příčný řez slinutým vzorkem wolframu. Během procesu zahřívání došlo k určitému spojování a růstu zrn. Výsledný slinutý materiál je kompaktní a velmi pevný.



Obrázek 8. Řez vzorkem ze slinutého wolframu.

Byl také proveden přímý indukční ohřev ve vzdušné atmosféře. Na povrchu vzorku se začal tvořit povlak oxidů. Po vychlazení byly barvy povrchu stabilní. Podle podmínek v okolní prostředí, zejména proudění vzduchu, časového a teplotního průběhu chladnutí měl modrou nebo žlutou barvu. Při dlouhodobém působení vzdušného kyslíku tvorba oxidu probíhala do hloubky vzorku.

Na obrázku 9 je vidět výsledek tvorby oxidů wolframu v široké škále odstínů barev od zelené přes modrou k okrové. Proměnlivost barev souvisí s průběhem chladnutí vzorku na vzduchu.

4. Diskuse experimentů

4.1. Diskuse k MSO

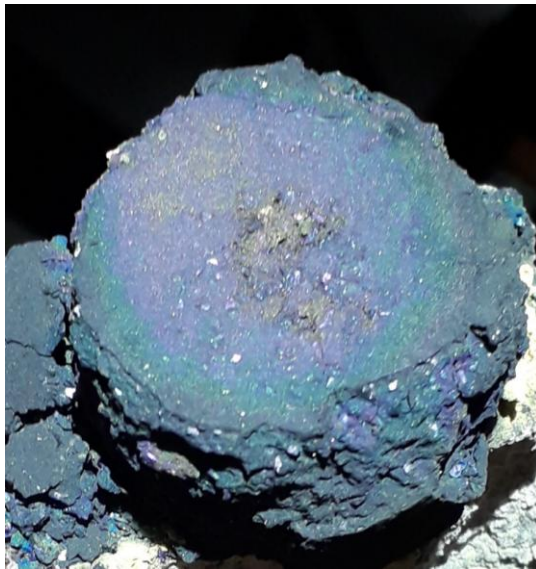
Bylo zjištěno, že průchodem MSO procesem nedochází vždy k plné oxidaci wolframu. Byly sledovány vstupní frakce W a výstupní složky, což byl kovový wolfram a hydratovaný oxid wolframu. Srovnání hmotnosti pevných produktů v procesech MSO ukazuje možnost průchodu wolframových zrn bez rozpuštění. Mají odolnost vůči vysoce agresivním roztaveným solím při vhodné teplotě. Granulace ovlivňuje stupeň oxidace wolframu.

Materiálem, který se gravitačně usazuje a hromadí v dolní části reaktoru, jsou wolframová zrna úplně zbavena obsahu vodíku (tritia). Při vhodné kombinaci parametrů procesu a složení roztavené soli bude možné dosáhnout vyššího výtěžku pevných zrn wolframu. Ovlivněné bude zejména teplotou, viskozitou, smáčivostí a povrchovým napětím roztavené soli. Dále bude záviset na velikosti zrn a zatím nespecifikované kvalitě povrchu zrn. Citovaná i další literatura ukazuje pestrost kvalitativních parametrů a je v této otázce zatím nejednoznačná.

Ovlivněno bude i způsobem dávkování odpadního materiálu do procesu MSO. Jsou zde rovněž patrné rozdíly pro různé roztavené alkalické uhličitánové soli.

4.2. Diskuse k indukčnímu ohřevu

Technologie indukčního ohřevu se jeví velmi nadějná pro zhutňování odpadního wolframového prachu. Je třeba dbát o to, aby nedošlo k oxidaci kovu. Logicky se nabízí provádět ohřev s přebytkem vodíku (tritia) v prostředí vzorku. Je pravděpodobné, že tritium vyskytující se ve vzorku nemusí stačit k zabránění oxidace. K oxidaci nedochází také prací v prostředí inertního plynu nebo ve vakuu, což nabízí možnosti k provedení dalších experimentů vedoucích k optimálnímu nastavení celého procesu.



Obrázek 9 Proměnlivá barevnost oxidů wolframu po přímém indukčním ohřevu na vzduchu. Vylisovaný wolframový prach 20 μm , maximální teplota 1000 $^{\circ}\text{C}$.

5. Závěry

Práce je úvodem do komplexní a zatím jen okrajově řešené problematiky odpadů z fúze. Naším záměrem bylo určit některé parametry dalšího výzkumu zpracování wolframového odpadu vznikajícího během fúze. Během rešeršní práce byly identifikovány některé zdroje W prachu. Místa nebo původ jejich pravděpodobného vzniku byla sledována především s ohledem na budoucí EU DEMO zařízení. Je naznačen také možný mechanismus vzniku tohoto cenného odpadu.

Tato práce popisuje experimentální testy provedené na wolframovém prachu metodami MSO i indukčního ohřevu ve studeném kelímku s wolframovým prachem. Byly vyhodnoceny změny wolframových zrn po obou typech experimentů. Testované vzorky jsou blízké předpokládaným wolframovým odpadním prachům z EU DEMO, které byly popisované v literárním přehledu, s důrazem na velikost a tvar zrn.

Obě technologie mohou velmi účinně oddělit wolfram od tritia. Při užití MSO technologie je zachyceno tritium ve formě tritiové vody. Probublávání ve vodě má velmi vysokou účinnost zachycení. Po ukončení testu není indikováno žádné tritium ve vychlazené uhličitánové soli ani zbytkovém wolframu. Je prokázána vhodnost užití uhličitánů (Na, K, Li).

Pokud se wolfram při použití technologie MSO neoxiduje, dochází k hromadění pevného wolframu na dně reaktoru v závislosti na rozdílu hustoty mezi solí a zrny wolframu. Vhodnými rozpouštěcími postupy tento wolfram lze oddělit od soli, vyčistit a dále zpracovat. Z užitých solí s rozpustnou a zoxidovanou formou wolframu lze vhodnými fyzikálně chemickými postupy také získat čistý wolfram.

Při užití IH technologie je nutné odvádět z procesu buď plynné tritium při práci ve vakuu nebo ve směsi s inertním plynem, podle nastavení parametrů IH technologie. První možností je zacházet s tritiem podobně jako se zachází plyny odcházejícími z experimentálních tokamaků, kde probíhá oddělování tritia od dalších plynů. Druhou možností je unikající tritium vhodně oxidovat, zachycovat ve formě tritiové vody a připravit k přepracování v kapalném stavu.

Spékání prachových zrn wolframu IH vede k jejich agregaci a dalšímu zvětšování velikosti zrn. Vzorek je kompaktní a mnohem pevnější než po lisování.

K ověření účinnosti odstraňování vodíku (tritia) z wolframového prachu bude nutné pracovat s většími koncentracemi vodíku vázaného ve wolframu a při různých teplotách. Výzkum obou technologií bude pokračovat a zaměří se na optimalizaci průběhu procesu. To bude zahrnovat fungování i za předpokladu zatím nedefinované proměnlivosti odpadů ale také možnost propojení obou technologií v budoucím potenciálním provozu.

Znalost přesnějších parametrů odpadu, který bude vznikat v zařízeních ITER a EU DEMO, umožní oběma zařízeními kvantitativně i kvalitativně se přizpůsobit fúznímu odpadu.

Možnost recyklace wolframových prachových částic pomocí těchto jednotlivých metod (IH a MSO) nebo jejich kombinace se jeví jako velmi slibná metoda zpracování tohoto cenného odpadu, aby jej bylo možné znovu použít odděleně jako vysoce kvalitních surovin (tritium nebo wolfram).

Poděkování

Tato práce byla provedena v rámci konsorcia EUROfusion, financovaného Evropskou unií prostřednictvím výzkumného a vzdělávacího programu Euratomu (grantová dohoda č. 101052200 – EUROfusion). Vyjádřené názory a stanoviska jsou však pouze názory autora (autorů) a nemusí nutně odrážet názory Evropské unie nebo Evropské komise. Evropská unie ani Evropská komise za ně nenesou odpovědnost. Realizaci aktivit popsanych v Plán fúze v rámci programu Horizont Evropa prostřednictvím společného programu členů konsorcia EUROfusion podpořilo také Ministerstvo školství, mládeže a tělovýchovy (MŠMT) České republiky, projekt číslo 9D22001. Prezentované výsledky byly získány s využitím infrastruktury CICRR, která je finančně podpořena Ministerstvem školství, mládeže a tělovýchovy – projekt LM2023041.

Reference

- [1] J. Matějček, M. Vilémová, H. Hadraba, F. Di Gabriele, I. Kuběna, E. Kolíbalová, J. Michalička, J. Čech, A. Jäger, Behavior of W-based materials in hot helium gas, Nuclear Materials and Energy 9 (2016) 405-410. <https://doi.org/10.1016/j.nme.2016.03.009>
- [2] E. Lassner, W-D. Schubert: Tungsten - Properties, Chemistry, Technology of the Element, Alloys, and Chemical Compounds, Kluwer Academic/ Plenum Publishers, New York (1999). <https://doi.org/10.1007/978-1-4615-4907-9>
- [3] R. Neu, J. Riesch, A.v. Müller, M. Balden, J.W. Coenen, H. Gietl, T. Höschen, M. Li, S. Wurster, J.-H. You, Tungsten fibre-reinforced composites for advanced plasma facing components, Nuclear Materials and Energy 12 (2017) 1308-1313. <https://doi.org/10.1016/j.nme.2016.10.018>
- [4] Yiran Mao, Jan Coenen b, Sree Sistla, Chao Liu, Alexis Terra, Xiaoyue Tan, Johann Riesch, Till Hoeschen, Yucheng Wu, Christoph Broeckmann, Christian Linsmeier, Design of tungsten fiber-reinforced tungsten composites with porous matrix, Materials Science and Engineering: A 817 (2021) 141361. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2021.141361>
- [5] J. Riesch, J.-Y. Buffiere, T. Höschen, M. Scheel, Ch. Linsmeier, J.-H. You, Crack bridging in as-fabricated and embrittled tungsten single fibre-reinforced tungsten composites shown by a novel in-situ high energy synchrotron tomography bending test, Nuclear Materials and Energy 15 (2018) 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.nme.2018.03.007>
- [6] B. Jasper, S. Schoenen, J. Du, T. Hoeschen, F. Koch, Ch. Linsmeier, R. Neu d, J. Riesch, A. Terra, J.W. Coenen, Behavior of tungsten fiber-reinforced tungsten based on single fiber push-out study, Nuclear Materials and Energy 9 (2016) 416-421. <https://doi.org/10.1016/j.nme.2016.04.010>
- [7] M. DeAngeli, P. Talias, F. Suzuki-Vidal, D. Ripamonti, T. Ringrose, H. Doyle, G. Daminelli, J. Shadbolt, P. Jarvis, M. DeAngeli: Normal high velocity solid dust impacts on tiles of tokamak-relevant temperature, Nuclear Materials and Energy 41 (2024)101735. <https://doi.org/10.1016/j.nme.2024.101735>
- [8] Muyuan Li, Jeong-Ha You, Cracking behavior of tungsten armor under ELM-like thermal shockloads II: A revised prediction for crack appearance map, Nuclear Materials and Energy 9 (2016) 598-603. <https://doi.org/10.1016/j.nme.2016.02.001>
- [9] M. Wirtz, J. Linke, Th. Loewenhoff, G. Pintsuk, I. Uytendhouwen, Transient heat load challenges for plasma-facing materials during long-term operation, Nuclear Materials and Energy 12 (2017) 148-155. <https://doi.org/10.1016/j.nme.2016.12.024>
- [10] A.v. Müller, D. Dorow-Gerspach, M. Balden a, M. Binder, B. Buschmann, B. Curzadd, T. Loewenhoff, R. Neu, G. Schlick, J.H. You, Progress in additive manufacturing of pure tungsten for plasma-facing component applications, Journal of Nuclear Materials 566 (2022) 153760. <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2022.153760>
- [11] V.A. Makhelai, I.E. Garkusha a, J. Linke, S.V. Malykhin, N.N. Aksenov, O.V. Byrka, S.S. Herashchenko, S.V. Surovitskiy, M. Wirtz, Damaging of tungsten and tungsten–tantalum alloy exposed in ITER ELM-like conditions, Nuclear Materials and

Energy 9 (2016) 116-122. <https://doi.org/10.1016/j.nme.2016.04.001>

- [12] W. Van Renterghem, I. Uytendhouwen, Th. Loewenhoff, M. Wirtz, TEM analysis of recrystallized double forged tungsten after exposure in JUDITH 1 and JUDITH 2, Nuclear Materials and Energy 9 (2016) 484-489. <https://doi.org/10.1016/j.nme.2016.04.003>
- [13] Hao Yin, Long Cheng, Xuexi Zhang, Hong Zhang, Wangguo Guo, Yue Yuan, Binyou Yan, Peng Wang, Guang-Hong Lu: Surface blistering and deuterium retention in chemical vapor deposition tungsten exposed to deuterium plasma, Nuclear Materials and Energy 37 (2023) 101536. <https://doi.org/10.1016/j.nme.2023.101536>
- [14] (14xx1) M. Alfazzaa, F. Pappalardo, A. Campos, G. Cartry, M. Minissale, C. Martin: Grain orientation and temperature dependences of bubbles at tungsten surfaces upon helium plasma exposure, Nuclear Materials and Energy 42 (March 2025) 101883. <https://doi.org/10.1016/j.nme.2025.101883>
- [15] M-C. Ren, Y-F. Nie, H-Q. Wang, Y. Yuan, F. Feng, Y-Y. Lian, H. Yin, L. Cheng, D-Q. Shi, G-H. Lu: Role of thermal stress-driven dislocation and low-angle grain boundary migration in surface plastic deformation and grain orientation evolution of tungsten under thermal shock International Journal of Plasticity 184 (January 2025) 104205. <https://doi.org/10.1016/j.ijplas.2024.104205>
- [16] A. Houben, M. Rasiński, S. Brezinsek, Ch. Linsmeier: Hydrogen isotope permeation through interfaces and permeability of tungsten layers, Nuclear Materials and Energy 37 (2023) 101518 <https://doi.org/10.1016/j.nme.2023.101518>
- [17] S. Markelj, T. Schwarz-Selinger, M. Kelemen, E. Punzón-Quijorna, J. Zavašnik, A. Šestan, D. Dellasega, G. Alberti, M. Passoni: The effect of nanocrystalline microstructure on deuterium transport in displacement damaged tungsten, Nuclear Materials and Energy 37 (2023) 101509. <https://doi.org/10.1016/j.nme.2023.101509>
- [18] V.Kh. Alimov, Y. Torikai, Y. Hatano, T. Schwarz-Selinger, Tritium retention in displacement-damaged tungsten exposed to deuterium-tritium gas mixture at elevated temperatures, Fusion Engineering and Design 162 (2021) 112100. <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2020.112100>
- [19] Y. Corre, M-H. Aumeunier, A. Durif, J. Gaspar, K. Krieger, T. Loewenhoff, M. Richou, S. Ratynskaia, Q. Tichit, Y. Anquetin, R. Dejarnac, M. Diez, L. Dubus, M. Firdaouss, J. Gerardin, A. Grosjean, J.P. Gunn, T. Loarer, P. Maget, C. Martin, K. Paschalidis, E. Tsitrone, M. Wirtz, the WEST team, Testing of ITER-grade Plasma Facing Units in the WEST tokamak: progress in understanding heat loading and damage mechanisms, Nuclear Materials and Energy (2023). <https://doi.org/10.1016/j.nme.2023.101546>
- [20] C. Arnas, A. Campos, M. Diez, S. Peillon, C. Martin, K. Hassouni, A. Michau, E. Bernard, N. Fedorczak, F. Gensdarmes, C. Grisolia, B. Pégourié, E. Tsitrone, Micron-sized dust and nanoparticles produced in the WEST tokamak, Nuclear Materials and Energy 36 (2023) 101471. <https://doi.org/10.1016/j.nme.2023.101471>
- [21] M.K. Dosbolayev, A.B. Tazhen, A.N. Kholmirezayev, Y.A. Ussenov, T.S. Ramazanov: Studies of the formation and distribution of cracks and various defects on the heated tungsten plate surface during pulsed plasma flux impact, Nuclear Materials and Energy 37 (2023) 101540. <https://doi.org/10.1016/j.nme.2023.101540>
- [22] D. Papadakis, K. Mergia, E. Manios, V. Chatzikos, S. Dellis, D. Terentyev, G. Bonny, W. Van Renterghem, C.C. Chang, S. Messoloras, Defect evolution of neutron irradiated ITER grade tungsten after annealing, Fusion Engineering and Design 189 (2023) 113486. <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2023.113486>
- [23] Chao Yin, Giovanni Bonny, Dmitry Terentyev, Anisotropy in the hardness of single crystal tungsten before and after neutron irradiation, Journal of Nuclear Materials 546 (2021) 152759. <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2020.152759>
- [24] Michael Rieth, Russell Doerner, Akira Hasegawa, Yoshio Ueda, Marius Wirtz: Behavior of tungsten under irradiation and plasma interaction, Journal of Nuclear Materials 519 (2019) 334-368. <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2019.03.035>
- [25] M. Shimada, R.A. Pitts, S. Ciattaglia, S. Carpentier, C.H. Choi, G. Dell Orco, T. Hirai, A. Kukushkin, S. Lisgo, J. Palmer, W. Shu, E. Veshchev, In-vessel dust and tritium control strategy in ITER, Journal of Nuclear Materials, 438 Supplement (2013) S996-S1000. <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2013.01.217>
- [26] G. Riva, P. Tolias, S. Ratynskaia, G. Daminelli, R. Donde, M. De Angeli, E. Vassallo, M. Pedroni, Adhesion measurements for tungsten dust deposited on tungsten surfaces, Nuclear Materials and Energy 12 (2017) 593-598. <https://doi.org/10.1016/j.nme.2016.11.009>
- [27] J.C. Flanagan, M. Sertoli, M. Bacharis, G. F. Matthews, P. C. de Vries, A. Widdowson, I. H. Coffey, G. Arnoux, B. Sieglin, S. Brezinsek, J. W. Coenen, S. Marsen, T. Craciunescu, A. Murari, D. Harting, A. Cackett, E. Hodille and JET-EFDA Contributors:, Characterising dust in JET with the new ITER-like wall, Plasma Physics and Controlled Fusion, Volume 57, Number 1 (2015) 014037. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0741-3335/57/1/014037>
- [28] D. Terentyev, M. Vilemova, C. Yin, J. Veverka, A. Dubinko, J. Matejcek: Assessment of mechanical properties of SPS-produced tungsten including effect of neutron irradiation, International Journal of Refractory Metals and Hard Materials 89 (2020) 105207. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2020.105207>
- [29] J. Stoklasa, L. Karásková – Nenadálová, Possibility of processing waste tungsten dust from the nuclear fusion process by a combination of several technologies, Fusion Engineering and Design 191 (2023) 113505. <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2023.113505>
- [30] K. Sihelská, D. Veselá, Tungsten particle analysis/measurement protocol, Verification of particle size distribution in Thermo 1µm sample, CVR (2023).

- [31] J. Lorinčík, et al., Identifikace a lokalizace dlouhodobých radionuklidů v environmentálních vzorcích pomocí SEM-EDX. SÚJB/OS/16315/ 2020, Certifikovaná metodika (2020). <https://www.sujb.cz> (accessed 12 March 2025)
- [32] I. Quintana, Z. Azpilgain, D. Pardo and I. Hurtado, Numerical Modeling of Cold Crucible Induction Melting, The Proceedings of the 2011 COMSOL Conference in Stuttgart (2011). <https://www.comsol.com/paper/numerical-modeling-of-cold-crucible-induction-melting-11250>
- [33] J. Stoklasa, J. Hrbek, L. Karásková Nenadállová, B. Mészáros, M. Paukov, Possibilities of Reprocessing Solid Waste with Tritium from Fusion Using High-Temperature Heating, Fusion Science and Technology (2023). <https://doi.org/10.1080/15361055.2023.2259227>
- [34] A. Mühlbauer: Innovative Induction Melting Technologies, A Historical Review, International Scientific Colloquium, Modelling for Material Processing June 8-9, Riga (2006)
- [35] M. Paukov, B. Mészáros, J. Hrbek, M. Kiselová, Investigation of Materials Interaction with Molten Corium - SI, Jaderná energie 1, 66 (2020) 66-68. https://jadernaenergie.online/wp-content/uploads/2020/09/CVR_casopis_jaderna_energie_S.pdf
- [36] J. Hrbek, B. Mészáros, M. Paukov, M. Kudláč, Methodology for Measurement of Density of Liquid Oxides, ASME J of Nuclear Rad Sci. 7, 2 (2021). <https://doi.org/10.1115/1.4048478>
- [37] I. V. Andreyev, V. Petrovych, L. Georgiyvna, Some Features of Sintering of Tungsten Powders, Science of Sintering 48, 2, 191 (2016). <http://dx.doi.org/10.2298/SOS1602191A>

Tungsten dust as a significant waste from a nuclear fusion reactor

Jaroslav Stoklasa; Lucie Karásková Nenadállová

During normal operation of a tokamak (JET, ITER, EU DEMO), the very durable tungsten armour on the inner surface of the reactor wears. The sources of tungsten dust are investigated along with an assessment of the mechanism of formation. As a consequence of the ongoing processes, tungsten particles of different sizes are released. The tungsten material that is released is usually tritiated. Normally, it is removed from the reactor in the form of dust and treated as waste material. This valuable material should be separated from the radioactive tritium and recycled. To concentrate the tungsten, while simultaneously removing the tritium, it is possible to either use MSO (molten salt oxidation) technology or, alternatively, induction heating and melting, or a suitable combination thereof. This paper describes experimental testing of tungsten dust extraction using both technologies. The goal of the paper is to introduce the possibility that tungsten dust particles may be recycled using these methods, which seem to be very promising for the processing and recovery of this valuable waste.