

MEHANIZMI ZADRŽEVANJA IN TRANSPORTA TRITIJA, KI SO POMEMBNI ZA FUZIJSKI REAKTOR

Sinergije med izotopi vodika, nevtroni in helijem

Sabina Markelj

Institut »Jožef Stefan«, Jamova cesta 39, 1000 Ljubljana

ZNANSTVENI ČLANEK

POVZETEK

Pri iskanju novih virov energije je jedrska fuzija devterija in tritija ena od najbolj obetavnih možnosti za človeštvo. Vendar pa je termonuklearna fuzija postavila velik izziv za teorijo, eksperimente in tehnologijo zaradi zahtevnega okolja, ki bo potekalo v prihodnjem reaktorju za jedrsko fuzijo: obsevanje z nevtroni energije 14 MeV, kopičenje helija in implantacija vodikovih izotopov (VI), ki potekajo istočasno in medsebojno vplivajo drug na drugega. Eden od glavnih pogojev je samozadostnost tritija. Zato je potrebno makroskopsko razumevanje vpletenih pojavov, da bi lahko predvideli transport in zadrževanje goriva v bodočih napravah. Podajamo pregled dosedanjega znanja o zadrževanju VI v volframu, materialu, ki je bil izbran zaradi dobre toplotne prevodnosti, visokega tališča, nizkega razpršitvenega koeficienta in nizkega zadrževanja VI. Pokazali bomo, kako laboratorijske študije, ki obravnavajo sinergijo med nastankom poškodb v kristalni rešetki ter prisotnostjo VI in helija, pomagajo pri razumevanju pojavov in v kolikšni meri jih je mogoče uporabiti za ekstrapolacijo na bodoči fuzijski reaktor.

Ključne besede: termonuklearna fuzija, poškodbe, vodikovi izotopi, helij

Tritium Retention and Transport Mechanisms Relevant to Future Fusion Reactors: Synergies between Hydrogen Isotopes, Neutrons and Helium

ABSTRACT

In the search for new energy sources, nuclear fusion of deuterium and tritium is one of the most promising options for humankind. However, thermonuclear fusion has set an enormous challenge to theory, experiment and technology due to the harsh environment that will take place in a future nuclear fusion reactor: 14 MeV neutron irradiation, helium accumulation and hydrogen isotope (HI) implantation, taking place at the same time and mutually influencing each other. Tritium self-sufficiency is one of the major prerequisites. For this reason, a macroscopic understanding of the phenomena involved is needed in order to predict transport and retention of fuel in future devices. An overview is given on the knowledge gained so far for tungsten, the material chosen because of its good thermal conductivity, high melting point, low sputtering yield and low HI retention. We will show how laboratory studies addressing the synergism between displacement damage creation, presence of HIs and helium, help in understanding the phenomena and to what extent they can be used to extrapolate to a future fusion reactor.

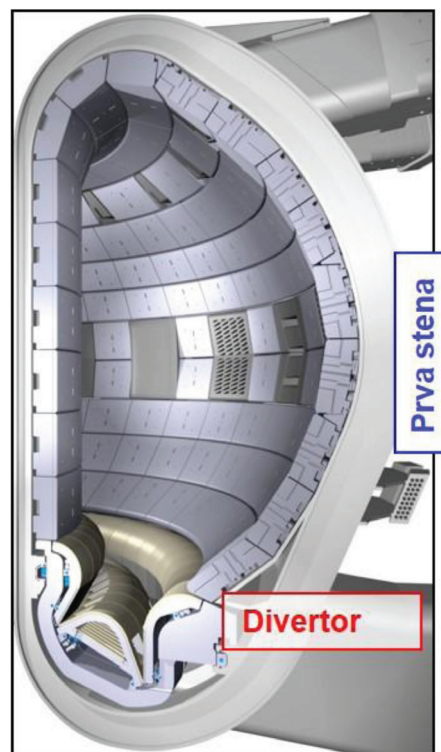
Keywords: thermonuclear fusion, displacement damage, hydrogen isotopes, helium

1 UVOD

Interakcija vodika z materiali je zaradi velikega števila potencialnih uporab, vključno z vodikovimi gorivnimi celicami in skladiščenjem vodika, obdelave s plazmo in termonuklearno fuzijo, ključnega pomena za številna področja raziskav. Študij interakcije vodika

s površinami je obsežno in aktivno raziskovalno področje zaradi temeljne narave predmeta – vodikovi atomi in molekule so najmanjši adsorbirajoči delci – in nujne potrebe po rešitvah v sektorju obnovljivih virov energije. V okviru raziskovanja termonuklearne fuzije in gorivnih celic je eden največjih izzivov raziskovanje materialov in razumevanje interakcije vodika z materiali [1]. Razvoj pametnih materialov zahteva bodisi nizko zadrževanje vodika za uporabo v fuziji bodisi visoko zadrževanje vodika za skladiščenje v gorivnih celicah. Zaradi tega so potrebni potencialni preboji za napredovanje področja trajnostne energije, da bi dosegli cilj družbe z ničelnim ogljičnim odtisom.

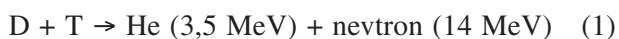
Interakcija vodika z materiali ima ključno vlogo pri raziskovanju fuzije, saj je treba v reaktorju vzdrževati in nadzirati tritij (radioaktivni vodikov izotop) pod določenimi mejami za varno in varčno delovanje. Za doseganje termonuklearne fuzije moramo gorivo – težka vodikova izotopa devterija (D) in tritija (T)



Slika 1: Shematski prikaz preseka tokamaka ITER, največje fuzijske naprave, ki ga gradijo v francoskem mestu Cadarache. V ITER-ju bo prva stena izdelana iz volframa, spodnji del, imenovan divertor, kjer bodo največje obremenitve z močjo in tokom, bo prav tako iz volframa.

segreti na več kot sto milijonov kelvinov. To dosežemo z magnetnim omejevanjem goriva v plazemskem stanju v vakuumski komori v obliki torusa, ki se imenuje tokamak. Presek tokamaka ITER, največje fuzijske naprave, ki ga trenutno gradijo v Cadarachu v Franciji, je prikazan na **sliki 1**. Po novi direktivi, določeni leta 2023, bo prva stena ITER-ja izdelana iz volframa (prej je bil predviden berilij), spodnji del, imenovan divertor, kjer bodo največje obremenitve s tokovi delcev in močmi, pa bo prav tako iz volframa. Trenutni koncepti razvoja fuzije vključujejo proizvodnjo energije v zaprtem tritijevem gorivnem ciklu z materiali, ki lahko prenesejo intenzivne toplotne obremenitve do 10 MW/m^2 in velike tokove delcev do 10^{24} m^{-2} , medtem ko delujejo pri visokih temperaturi (800–1000 K) [2].

V bodoči fuzijski elektrarni bodo energijo prenašali visokoenergijski nevtroni, ki nastanejo s fuzijsko reakcijo devterij-tritij:



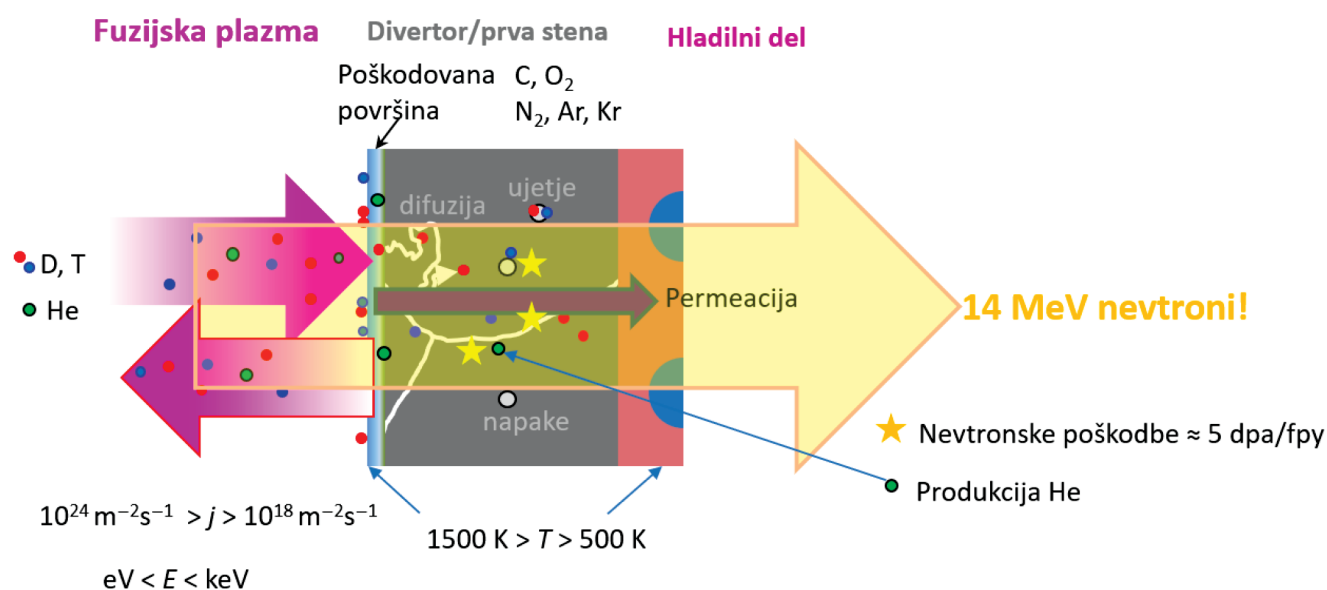
Zaradi obstreljevanja z nevtroni energije 14 MeV naj bi za pričakovane obratovalne delovne cikle reaktorja nastale poškodbe v kristalni rešetki skozi celoten del materiala v količini več premikov na atom (ang. *displacement per atom*, dpa) na leto [3], kar prinaša dodatne izzive pri izbiri materialov. Desetletja raziskav so bile namenjena preučevanju zadrževanja vodikovih izotopov (VI), z namenom iskanja materiala, ki je najbolj primeren za izpostavitve plazmi (ang. *plasma facing components*, PFC). Izpostavljeno je bilo, da so volfram (W) in zlitine na osnovi volframa najprimernejše zaradi nizkega zadrževanja VI v volframu, nizkega razprševanja in dobre toplotne

prevodnosti. Vendar pa so se pri zgodnjih študijah osredotočali predvsem na interakcijo plazme v bližini površine in niso upoštevale vpliva nevtronov [4, 5]. Raziskave interakcije plazme s steno ter zadrževanja vodikovih izotopov v materialih v Evropi potekajo v okviru konzorcija EUROfusion, pod okriljem delovnega programa Interakcije plazme s steno [6, 7].

2 PROCESI MED VODIKOM IN MATERIALOM, KI VSEBUJE POŠKODBE

V reaktorskem okolju material ne bo izpostavljen samo plazmi devterija in tritija, temveč bodo v materialu hkrati nastajale poškodbe zaradi obstreljevanja z nevtroni in s helijem, ki bo nastal pri jedrskih reakcijah, in vsi ti lahko medsebojno vplivajo na pojave v materialu. Za zanesljivo napovedovanje transporta in zadrževanja vodikovih izotopov v materialih, izpostavljenih plazmi, je potrebno mikroskopsko razumevanje vseh procesov, kjer so vključeni vsi trije: poškodbe, VI in helij. Razumeti moramo osnovne procese, kot so transport v materialu s poškodbami v kristalni mreži, vpliv intersticijskih atomov nečistoč (VI in helij) na evolucijo napak in vlogo površine pri absorpciji in sproščanju VI.

Poenostavljena shema transporta VI skozi prvo steno fuzijskega reaktorja je prikazana na **sliki 2**. Tako VI kot helij lahko v notranjosti materiala poslabšajo uporabnost materiala pri velikih toplotnih obremenitvah delcev in izpostavitvi delcev ter posledično vplivajo na delovanje fuzijske naprave. V primeru obstreljevanja s težkimi ioni ali nevtroni se poškodba nanaša na premik atomov v kristalni rešetki iz njihovega osnovnega položaja in naknadno ustvarjanje



Slika 2: Shematski prikaz interakcije plazme z materialom na prvi steni fuzijskega reaktorja ter difuzija in ujetje vodikovih izotopov v napakah v kristalni mreži, nastalih zaradi obstreljevanja z nevtroni energije 14 MeV, ki nastanejo pri fuzijski reakciji. Navedeni so tudi pričakovani tokovi in energije delcev ter temperaturni obseg.

poškodb v rešetki, kot so vrzeli, samointeristijski atomi, skupki vrzeli, praznine in dislokacijske linije/zanke. Te napake v rešetki, predvsem vrzeli in skupki vrzeli, delujejo kot mesta za ujemanje VI z visoko vezavno energijo v primerjavi z energijo difuzije med interistijskimi mesti.

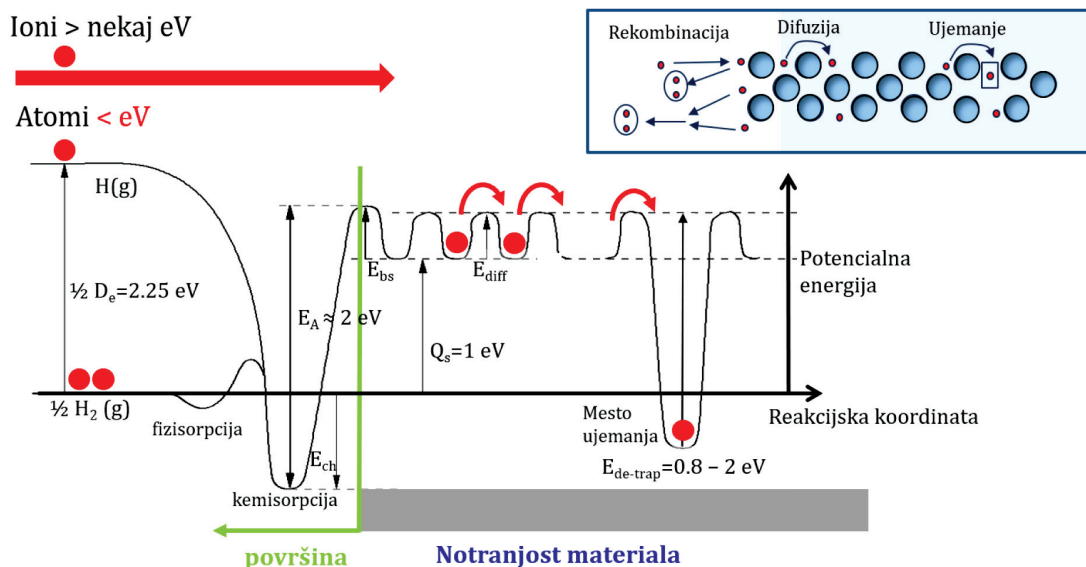
Interakcijski potencial med vodikom in volframom je shematsko prikazan na **sliki 3**. Ioni z energijo nekaj eV so direktno implantirani v material in difundirajo skozi material po interistijskih mestih. Ko pridejo do napake v rešetki, ta deluje kot past in zato se VI tam ujamejo. Ioni ali atomi z energijo okrog eV ali nižje se najprej adsorbirajo na površino in morajo za prehod v notranjost materiala premagati energijsko bariero, ki je v primeru volframa enaka 2 eV. Ko imamo poškodbe v kristalni rešetki, je transport vodikovih izotopov v volframu zaradi ujemanja v pasti zelo upočasnen v primerjavi s samo difuzijo VI med interistijskimi mesti. Ko izpostavimo ionom ali atomom VI ustavimo, atomi, ki niso globoko vezani, uidejo iz materiala pri sobni temperaturi, medtem ko atomi, ujeti v napakah, ostanejo ujeti in nam lahko nekaj povedo o koncentraciji poškodb v materialu. Glavno vlogo pri zadrževanju in transportu VI skozi volfram imata temperatura ter tok delcev VI. Pri nizkih temperaturah se atomi ujamejo v pasti in so popolnoma zapolnjene, kar vodi do visokega zadrževanja VI. Pri visokih temperaturah VI lahko uidejo iz pasti, kar vodi do manjšega zadrževanja VI v materialu, vendar pa smo v tem režimu zelo odvisni od tokov delcev, saj pride do ravnovesja pri višji zasedenosti pasti, ko so tokovi zelo visoki [8].

Zaradi narave nastajanja napak pri obsevanju z nevtroni se je izkazalo, da je obstreljevanje z visokoenergijskimi ioni (kot na primer ioni volframa energije

MeV) dober nadomestek za nevtrone [9, 10], brez transmutacije materiala, nastanka helija in, kar je najpomembnejše, aktivacije materiala. Nevtroni namreč najprej trčijo v atom volframa (primarni trk na atom), ki ga s pomembnim prenosom energije izrine s svojega mesta. Izbiti atom volframa povzroči nadaljnje premike v materialu v kaskadah in je zato odgovoren za večino poškodb, nastalih pri trku nevtrona. Kar se tiče zadrževanja VI v volframu s poškodbami, so ugotovili, da bo nevtronsko obsevanje povečalo zadrževanje VI in upočasnilo transport [11, 12] ter bo torej prevladovalo nad pojavi na površini. V zadnjih nekaj letih so zadrževanje VI v volframu s poškodovano kristalno rešetko temeljito raziskali in pokazali, da se zadrževanje goriva tako v nevtronsko obsevanem volframu [11] kot v volframu, poškodovanem z volframovimi ioni (tako imenovani samopoškodovani volfram), močno poveča () v primerjavi z nepoškodovanim volframom (npr. [9, 13]). To povečanje je za približno tri rede velikosti in pridemo do koncentracij VI med 1 in 2 at. %. Poleg tega so prikazali, da pri obsegu poškodb približno 0,1–0,2 dpa pride do saturacije poškodb in s tem tudi zadrževanja VI v volframu [14, 15].

3 INTERAKCIJA VODIKA Z NAPAKAMI V KRISTALNI REŠETKI (SINERGIJA VODIKOVIH IZOTOPOV IN NEVTRONOV)

Do nedavnega so vse študije zadrževanja goriva v poškodovanem volframu opravili zaporedoma: najprej so bile ustvarjene poškodbe z obstreljevanjem materiala z visokoenergijskimi težkimi ioni (najpogosteje se uporabljajo ioni volframa), ki ne vsebuje vodika, in šele nato so material izpostavili ionom VI ali plazmi. Takšna razlika v pogojih, pri katerih nastane poškodba



Slika 3: Interakcijski potencial med vodikovimi izotopi in volframom, ki vsebuje poškodbe.

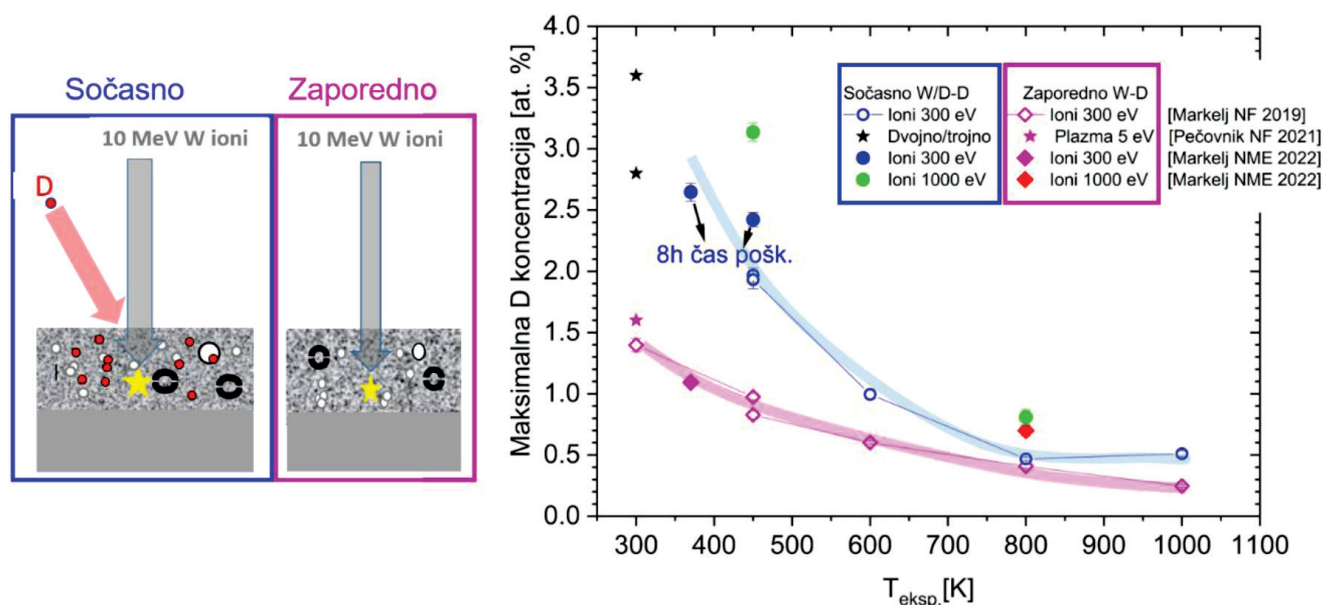
oz. pri kakšni temperaturi in s prisotnostjo VI ali brez, je pomembna pri proučevanju zadrževanja goriva. V realnih napravah za termonuklearno fuzijo bo sočasno potekalo ustvarjanje poškodb v kristalni rešetki kot tudi obstreljevanje z VI ter s helijem.

Šele pred kratkim smo v laboratoriju Odseka za fiziko nizkih in srednjih energij na Institutu »Jožef Stefan« izvedli prve študije, kjer smo obstreljevali volfram z ioni volframa in ga hkrati izpostavljali atomom devterija energije 0,3 eV [16] ali ionom devterija energije 300 eV [17, 18]. Za preučevanje vpliva nevtronskega obsevanja materialov na zadrževanje goriva smo kot nadomestek uporabili ione volframa energije 10,8 MeV, ki smo jih proizvedli s pomočjo 2 MV ionskega pospeševalnika. Pri tej energiji ioni ustvarijo podobne poškodbe, kot jih ustvarijo nevtroni do globine 1,3 μm . Da bi lahko predvideli učinke vpliva poškodb na transport in zadrževanje vodika v fuzijskem reaktorju, se osredotočamo na vpliv pogojev, pri katerih nastanejo poškodbe, torej pri kateri temperaturi in s prisotnostjo VI ali brez.

V tem prispevku se bomo osredotočili na eksperiment, kjer smo sočasno obstreljevali z ioni volframa in devterija, ker je bolj relevantno za predvidevanje zadrževanja tritija. Da bi ugotovili učinek prisotnosti devterija, smo v ta namen razvili edinstveno eksperimentalno napravo, v kateri smo lahko sočasno obstreljevali volfram z ioni volframa energije 10,8 MeV ter ioni devterija energije 300 eV pri povišani temperaturi do 1000 K [17, 18], tako imenovano sočasno obstreljevanje. Za določitev

učinka prisotnosti devterija med kreacijo poškodb, smo rezultate sočasnega obstreljevanja primerjali z obstreljevanjem zgolj z ioni volframa brez prisotnosti ionov devterija pri visokih temperaturah do 1000 K, tako imenovano zaporedni eksperiment. V obeh primerih je bil zadnji korak izpostavitve ionom devterija energije 300 eV pri 450 K, z namenom, da bi zasedli nastale napake v rešetki z atomi devterija in jih s tem naredili vidne za našo analitsko metodo.

Po tem koraku smo izmerili globinski profil devterija v materialu s pomočjo jedrske reakcije $D(^3\text{He},p)^4\text{He}$ do globine 7 μm [19] in tako smo lahko kvantitativno ocenili učinek prisotnosti devterija na nastanek poškodb. V obeh primerih smo izmerili največjo koncentracijo devterija v globini do 1,3 μm , kjer smo kreirali poškodbe, globlje pa koncentracija devterija pade za tri velikostne rede, kar pripada zadrževanju devterija zaradi naravnih napak v polikristaliničnem volframu. Odvisnost največje koncentracije devterija od temperature je prikazana na **sliki 4** za oba primera, sočasna ter zaporedna izpostavitve. Vedno nas zanima največja izmerjena koncentracija devterija na poškodovanem delu, saj nam omogoča ekstrapolacijo zadrževanja tritija na večje globine, kar bo primer za nevtrone, ki bodo ustvarjali poškodbe skozi celotno globino materiala. Poleg tega iz izmerjenega globinskega profila koncentracije devterija skupaj s podatki, dobljenimi iz termalne desorpcije devterija iz vzorcev, dobimo informacijo o koncentraciji napak ter vezavno energijo VI v posameznih napakah. Pri tem si pomagamo z modeliranjem kinetičnih enačb ujetja in difuzije VI v volframu [7, 20].



Slika 4: Najvišje koncentracije devterija, ki smo jih dobili iz globinskih profilov devterija pri različnih eksperimentalnih pogojih, kjer smo izvajali sočasno in zaporedno izpostavljanje z volframovimi in devterijevimi ioni pri različnih temperaturah. Slika prikazuje povečano koncentracijo devterija pri sočasni izpostavitvi in zato tudi večje število napak, ustvarjenih, ko je bil devterij prisoten.

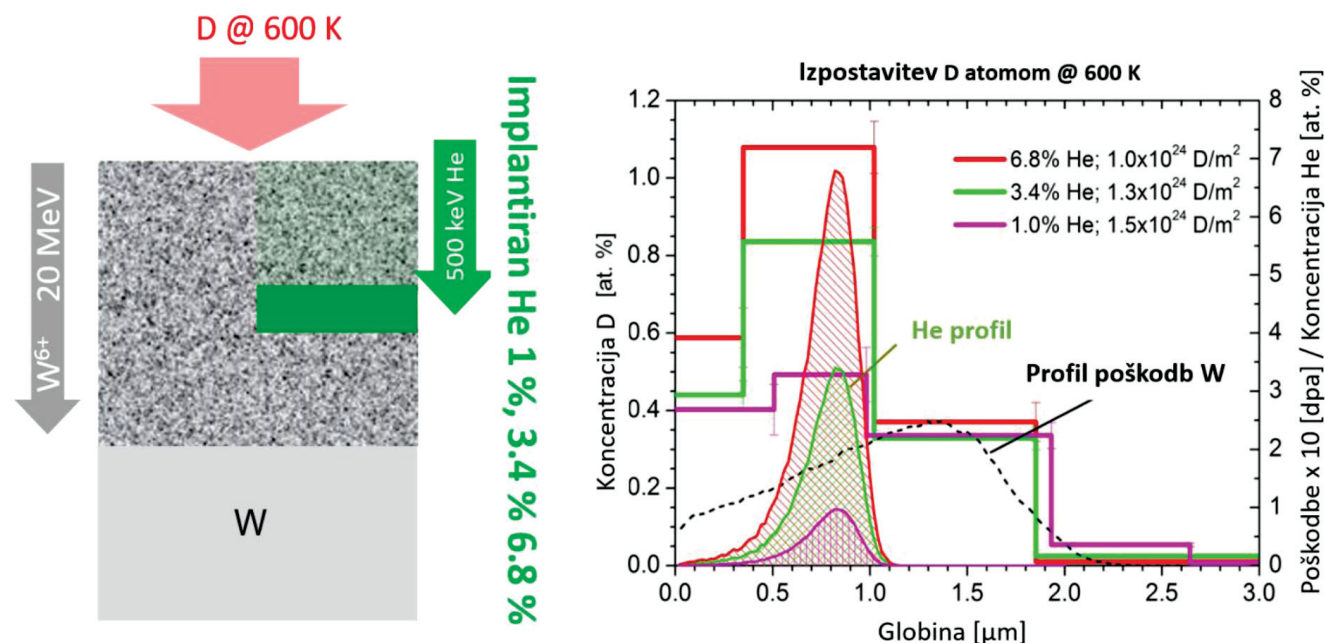
Pri 450 K smo opazili dvakrat višjo koncentracijo devterija za sočasni primer obstreljevanja z volframom in devterijem v primerjavi z zaporednim obstreljevanjem. Pri 600 K in 800 K se razmerje med sočasnim in zaporednim primerom zmanjša na približno 1,6 oziroma 1,2 in se zopet poveča na faktor 2 pri 1000 K. To odvisnost od temperature pripisujemo spremembi koncentracije mobilnih oz. ujetih atomov devterija med sočasnim obstreljevanjem, kar je v skladu s teoretičnimi izračuni [21], ki predvidevajo, da ujet atom devterija v vrzeli preprečuje anihilacijo vrzeli z atomi volframa.

Za razlago dobljenih eksperimentalnih rezultatov smo razvili nov model [22] in ga vključili v kodo z makroskopskimi kinetičnimi enačbami [20]. Novi model ustvarjanja in stabilizacije poškodb temelji na spontani rekombinaciji parov vrzel-atom in stabilizaciji napak, ki so zasedene z atomi devterija. Z uporabo novega modela smo lahko uspešno poustvarili izmerjene globinske profile devterija in desorpcijo devterija, pri čemer smo opazili višjo koncentracijo poškodb, ko je bil prisoten devterij med obstreljevanjem z ioni volframa, v primerjavi z razmerami, ko ni bilo devterija. Za to smo uporabili parametre, ki vključujejo različne vrste napak v kristalni rešetki, njihove vezavne energije za devterij ter nasičene koncentracije in verjetnosti za stabilizacijo, če imajo med obstreljevanjem z ioni volframa ujet devterij. Prvič smo eksperimentalno pokazali, da prisotnost devterija med samopoškodovanjem poveča koncen-

tracijo napak in posledično zadrževanje devterija. Takšni inovativni primerjalni poskusi so potrebni za potrditev in razvoj teoretičnega opisa in računskega modeliranja za predvidevanje zadrževanja tritija v prihodnjih fuzijskih napravah. Eden prvih takšnih izračunov je bil narejen pred kratkim [23], kjer so bili uporabljeni naši eksperimentalni podatki za volfram.

4 INTERAKCIJA VODIKOVH IZOTOPOV S HELIJEM

Kakor omenjeno že zgoraj, bo v pravih fuzijskih napravah poleg sočasnega ustvarjanja poškodb in obstreljevanja z vodikovimi izotopi prisoten tudi helij (slika 2). Helij bo nastajal: i) neposredno s fuzijsko reakcijo D–T, ii) posredno z razpadom tritija ter iii) pri jedrskih reakcijah med atomi materiala in nevtroni. Pretekle preiskave sinergističnih učinkov med devterijem in helijem med obstreljevanjem so izvedli na različnih jeklih, ki naj bi jih uporabili v prihodnjih reaktorjih tokamak [24]. Njihov glavni poudarek je bil na temperaturnem režimu, kjer so opazili znatno povečanje velikosti mrežnega parametra. Preiskave so pokazale, da je hkratna trikratna izpostavitve D–He–Fe, kjer je železo odgovorno za nastanek poškodb, podobnih nevtronskim, sinergističen učinek za nastanek in rast praznin, saj je bila gostota praznin večja pri obsevanju s trojico ionov, v primerjavi z dvojnimi obsevanjem He–Fe [25, 26].



Slika 5: Levo je prikazana shematska slika postopka obstreljevanja z ioni volframa in nato z ioni helija ter nazadnje še izpostavitve volframovih vzorcev atomom devterija. Vzorci so bili izpostavljeni curku devterija pri 600 K, da bi zasedli vse nastale napake. Desno so prikazani globinski profili devterija, izmerjeni na koncu izpostavitve devteriju. Šrafirano območje prikazuje globinski profil implantiranega helija, črtkana črta pa profil poškodb zaradi obstreljevanja z volframom. Oba smo izračunali s programom SRIM.

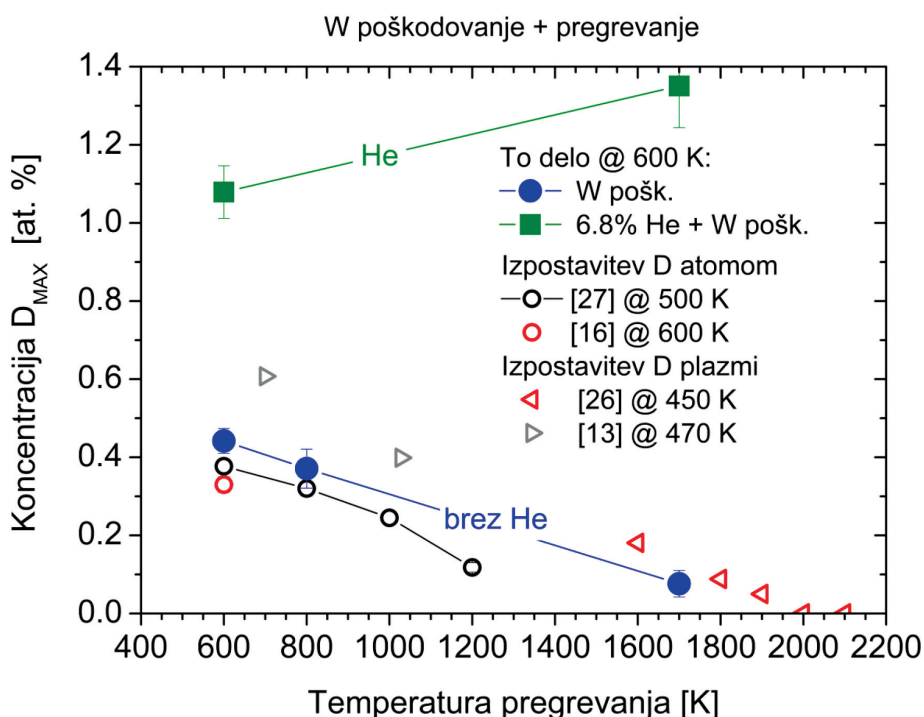
Pregled in poskus modeliranja teh učinkov je opravil Marian s sodel. [24]. Njihovo delo je dalo nekaj kakovostnih rezultatov, vendar so osnovni mehanizmi ostali nejasni. Razumevanje mehanizmov, ki vodijo do sinergističnih učinkov med obsevanjem, je ključnega pomena za skupino materialov, pomembnih za fuzijo. Zaradi podobnosti lastnosti materialov, pomembnih za fuzijo, kot sta železo in volfram, bi razumevanje teh procesov v takšnem materialu zagotovo prispevalo k splošnemu razumevanju tudi v drugih podobnih materialih. Glavno vprašanje, ki ga je treba obravnavati, je, v kolikšni meri vodik in helij vplivata na razvoj napak, kot sta uničenje ali združevanje napak in posledično zadrževanje VI.

V našem laboratoriju smo preučevali, kako implantiran helij v notranjosti materiala vpliva na zadrževanje devterija. Pokazali smo, da se devterij seli in kopiči v območju implantacije helija med pregrevanjem volframa, ki že vsebuje devterij [27]. Nadaljevali smo s študijo, kjer smo preučevali učinek različnih koncentracij helija na zadrževanje in transport devterija v notranjost volframa. Vpliv samega helija smo razložili od učinka poškodb, ki jih je povzročila implantacija helija, s tem da smo uvedli poškodbe v kristalni rešetki z obstreljevanjem z ioni volframa energije 20 MeV pred obstreljevanjem z ioni helija energije 500 keV. Poleg tega smo samo polovico

vzorca obstreljevali z ioni helija, da smo lahko takoj naredili primerjavo z ali brez helija. Vzorce smo nato izpostavili žarku atomov devterija pri 600 K, med izpostavitvijo pa smo merili globinske profile devterija [28].

Shema implantacije ter globinski profili devterija za različne koncentracije helija so prikazani na **sliki 5**. Največjo koncentracijo devterija smo izmerili tam, kjer je predvidena največja koncentracija helija in se povečuje s koncentracijo helija. Pokazali smo, da se zadrževanje devterija poveča s koncentracijo helija linearno v razmerju $D/He = 0,29$. Zadrževanje in transport devterija smo preučevali tudi na vzorcih volframa, ki so vsebovali helij in so bili dodatno pregreti na 1700 K. Tam smo s presežno elektronsko mikroskopijo opazili mehurčke helija velikosti 1,5 nm. V območju implantiranega helija ni prišlo do zmanjšanja zadrževanja devterija. Na drugi strani pa smo zelo malo zadržanega devterija izmerili okrog implantacijske globine helija, kjer so bile prej ustvarjene poškodbe zaradi obstreljevanja z ioni volframa energije 20 MeV. Pomeni, da so bile tam poškodbe v kristalni rešetki skoraj v celoti odstranjene zaradi pregrevanja, medtem ko se je helij nakopičil in tvoril skupke helija.

Na **sliki 6** je prikazana razlika med poškodbami v kristalni rešetki in helijem ter njun vpliv na razvoj



Slika 6: Največje izmerjene koncentracije devterija, dobljene iz končnih globinskih profilov devterija, so prikazane za del vzorca, ki je bil poškodovan z ioni volframa in obstreljevan s helijem (6.8 % He + W pošk.), ter del, ki je bil samo poškodovan z ioni volframa (W pošk.). Prva podatkovna točka je prikazana pri 600 K, kar je temperatura izpostavitve, druga pri 800 K zaradi postopnega postopka pregrevanja in zadnja pri pregrevanju pri 1700 K. Za primerjavo prikazujemo tudi podatke iz literature o pregrevanju poškodb [16, 30], kjer je bila v obeh primerih izvedena izpostavitve atomom devterija. Prikazani so tudi podatki iz literature [13, 29], kjer je so bili vzorci izpostavljeni devterijevi plazmi pri navedenih temperaturah.

Sinergije med nevtroni in tritijem

Zadrževanje tritija		Permeacija tritija	
Koncentracije poškodb se hitro povečujejo z izpostavitvijo nevtronom (0,1 dpa) in se nadalje povečajo pri sočasni izpostavitvi devteriju in tritiju: obseg nekaj at. %!	☹️	Poveča se koncentracija poškodb in pasti ter zakasni začetek permeacije (nima vpliva, ko je sistem v ravnovesju).	😊
Visoke temperature zmanjšajo koncentracijo poškodb, nizkoenergijske pasti niso zapolnjene.	😊	Višje temperature povečajo permeacijo – potreba po permeacijskih barierah.	☹️
Višji tokovi delcev bodo po vsej verjetnosti vodili do višje stabilizacije poškodb in s tem v višje zadrževanje in polnjenje pasti.	😐	Višji tokovi delcev – skrajšajo začetek permeacije in čas do ravnovesnega stanja.	☹️

Slika 7: Slikovni zaključek o sinergiji med nevtroni ter tritijem na zadrževanje in transport tritija v bodočih fuzijskih napravah

Sinergije med helijem in tritijem

Zadrževanje tritija		Permeacija tritija	
Helij na površini zmanjša absorpcijo tritija!	😊	Odloži začetek permeacije, zmanjša permeacijski tok.	😊
Helij v notranjosti poveča koncentracijo napak – nizke koncentracije predvidene v DEMO.	😐	Upočasni permeacijo.	😊
Helij v notranjosti pri višjih temperaturah – ni zmanjšanja števila napak.	☹️		

Slika 8: Slikovni zaključek o sinergiji med helijem in tritijem na zadrževanje ter transport tritija v bodočih fuzijskih napravah

koncentracije devterija s temperaturo pregrevanja. Na njej primerjamo končne koncentracije devterija, dobljene na delih vzorca, kjer je bil implantiran helij (slika 6, podatki »6,8 % He + W pošk.«) ter na delu, kjer ni bilo implantiranega helija (»W pošk.«) pri različicah vzorcev s 6,8 % helija. Rezultate na strani brez helija »W pošk.«, kjer so bile prisotne le poškodbe, primerjamo tudi z drugimi študijami pregrevanja poškodb v kristalni rešetki, opravljenimi z izpostavljenostjo atomom devterija ali devterijevi plazmi. Vidimo, da se ti rezultati dobro ujemajo s prejšnjimi študijami, pri čemer se koncentracija devterija s temperaturo pregrevanja zmanjšuje. Dobljene koncentracije devterija pri eksperimentih, kjer so bili vzorci izpostavljeni devterijevi plazmi, so višje v primerjavi izpostavitvami atomom devterija. To pripisujemo nižji temperaturi izpostavitve (450–470 K) in večjemu toku ionov devterija pri poskusih s plazmo, kjer se lahko zapolnijo pasti z nižjo vezavno energijo [22], kar ne velja za izpostavitvev atomom devterija pri 600 K. Kljub temu opazamo podobno, skoraj linearno zmanjšanje koncentracije devterija pri visoki temperaturi segrevanja do 1700 K, kot je ugotovil v nedavni študiji Zibrov s sodel. [29]. Na drugi strani, kjer je bil prisoten helij po segrevanju na 1700 K, ni opaziti zmanjšanja koncentracije devterija. Opazili smo celo povečanje za 20 %, kar je posledica kopičenja helija pri visokih temperaturah. Poleg tega helij, niti ko je bil implantiran niti po segrevanju na 1700 K, ni deloval kot difuzijska zapora za transport devterija.

Vse te študije so bile opravljene med samo izpostavitvijo vzorca atomom devterija, kar je naša edinstvena sposobnost preučevanja procesov med

izpostavitvijo vzorcev atomom ali ionom devterija brez prekinitve vakuumu.

5 SKLEP

Iz obeh predstavljenih študij lahko že veliko predvidimo glede zadrževanje tritija v bodočih fuzijskih napravah ter kakšne so sinergije med vodikovimi izotopi, kreacijo poškodb zaradi obstreljevanja z nevtroni ter tudi vplivom helija pri tem.

Na **sliki 7** so sklepi glede sinergije med nevtroni in tritijem na podlagi študije, kjer smo preučevali vpliv devterija na nastanek poškodb ter na zadrževanje in transport devterija v volframu. Naj poudarimo, da tu ne vemo, kako bodo transmutacijski elementi vplivali na celotno sliko, kar je bistvena razlika med obstreljevanjem z nevtroni in visokoenergijskimi ioni.

Na **sliki 8** pa so predstavljeni sklepi glede vpliva helija na zadrževanje in transport tritija. Iz te študije bi lahko tudi sklepali, da prisotnost helija v stenah bodoče fuzijske naprave ne bo vplivala na zadrževanje tritija v volframu, ker so predvidene koncentracije helija 600 atomskih delov na milijon (appm), kar je 20-krat nižje od najmanjše koncentracije helija, preučevane v naši študiji. Vendar pa lahko helij na območjih z visokimi toplotnimi tokovi sčasoma prevlada nad učinkom poškodb v kristalni rešetki, ker se poškodbe v materialu zmanjšajo, vsebnost helija pa se bo povečevala.

6 LITERATURA

- [1] B. D. Wirth, K. Nordlund, D. G. Whyte, D. Xu, *MRS Bulletin*, 36 (2011), 216–222
- [2] G. R. Tynan, *Nucl. Mat. Energy*, 12 (2017), 164–168
- [3] J. H. You, *Nucl. Fusion*, 55 (2015), 113026

- [4] R. A. Causey, T. J. Venhaus, *Phys. Scr.*, T94 (2001), 9
- [5] J. Roth, *et al.*, *J. Nucl. Mater.*, 390–391 (2009), 1–9
- [6] S. Brezinsek *et al.*, *Nucl. Fusion*, 57 (2017), 116041
- [7] K. Schmid, *et al.*, *Phys. Scr.*, T170 (2017), 014037
- [8] O. V. Ogorodnikova, *J. Appl. Phys.*, 118 (2015), 074902
- [9] O. V. Ogorodnikova, V. Gann, *J. Nucl. Mater.*, 460 (2015), 60–71
- [10] B. Wielunska, M. Mayer, T. Schwarz-Selinger, A. E. Sand, W. Jacob, *Nucl. Fusion*, 60 (2020), 096002
- [11] Y. Hatano, *et al.*, *Nucl. Fusion*, 53 (2013), 073006
- [12] T. Tanabe, *Phys. Scr.*, T159 (2014), 014044
- [13] O. V. Ogorodnikova, Yu. Gasparyan, V. Efimov, Ł. Ciupiński, J. Grzonka, *J. Nucl. Mater.*, 451 (2014), 379–386
- [14] D. R. Mason, *Phys. Rev. Materials*, 5 (2021), 095403
- [15] T. Schwarz-Selinger, *Mater. Res. Express*, 10 (2023), 102002
- [16] S. Markelj *et al.*, *Nucl. Mat. Energy*, 12 (2017), 169–174
- [17] S. Markelj *et al.*, *Nucl. Fusion*, 59 (2019) 086050
- [18] S. Markelj, M. Pečovnik, T. Schwarz-Selinger, M. Kelemen, *Phys. Scr.*, 97 (2022) 024006
- [19] M. Mayer, E. Gauthier, K. Sugiyama, U. von Toussaint, *NIM B*, 267 (2009), 506–512
- [20] E. A. Hodille *et al.*, *J. Nucl. Mater.*, 467, Part 1 (2015), 424–431
- [21] D. Kato, H. Iwakiri, Y. Watanabe, K. Morishita, T. Muroga, *Nucl. Fusion*, 55 (2015), 083019
- [22] M. Pečovnik, E. A. Hodille, T. Schwarz-Selinger, C. Grisolia, S. Markelj, *Nucl. Fusion*, 60 (2020), 036024
- [23] R. Arredondo, K. Schmid, F. Subba, G. A. Spagnuolo, *Nuclear Materials and Energy*, 28 (2021), 101039
- [24] J. Marian *et al.*, *Nucl. Fusion*, 57 (2017), 092008
- [25] E. Wakai *et al.*, *J. Nucl. Mater.*, 307–311 (2002), 278–282
- [26] E. Wakai *et al.*, *J. Nucl. Mater.*, 318 (2003), 267–273
- [27] S. Markelj, T. Schwarz-Selinger, A. Založnik, *Nucl. Fusion*, 57 (2017), 064002
- [28] S. Markelj, T. Schwarz-Selinger, M. Pečovnik, W. Chrominski, A. Šestan, J. Zavašnik, *Nucl. Fusion*, 60 (2020), 106029
- [29] M. Zibrov, T. Dürbeck, W. Egger, M. Mayer, *Nuclear Materials and Energy*, 23 (2020) 100747
- [30] A. Založnik *et al.*, *Phys. Scr.*, 2016 (2016), 014031