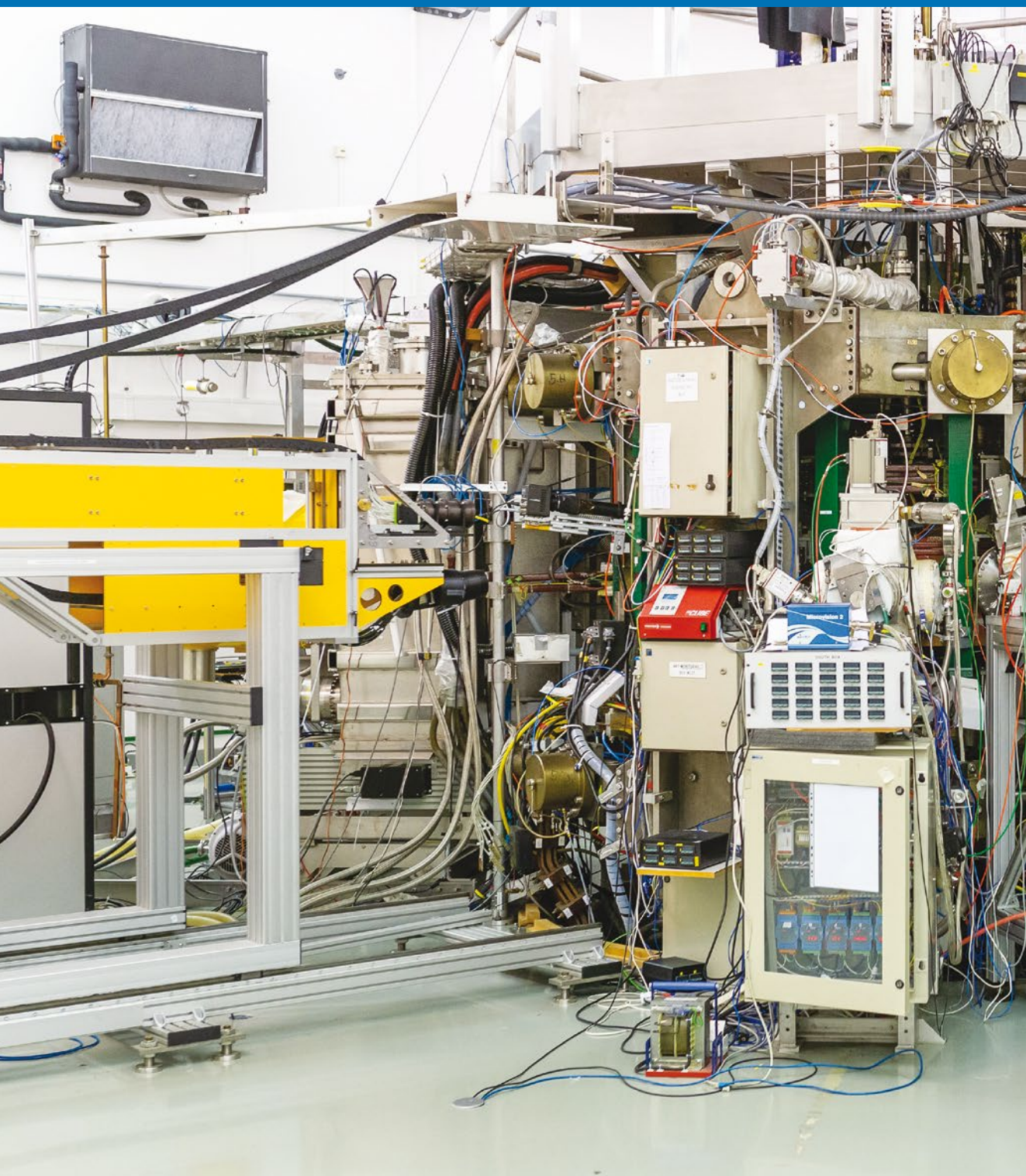




Akademie věd
České republiky

Špičkový výzkum ve veřejném zájmu



PROGRAM: SYSTÉMY PRO JADERNOU ENERGETIKU



TOKAMAK COMPASS
V ÚSTAVU FYZIKY
PLAZMATU AV ČR

Fúzní elektrárna? To se lehkou řekne...

ONDŘEJ VRTIŠKA

Sen o zkrocení jaderné fúze, prakticky neomezeného zdroje čisté energie, sní lidstvo už od poloviny 20. století. Přenést proces pohánějící hvězdy k nám na Zemi je ale nesnadný úkol. Přesněji řečeno: obtížné je provozovat ho kontrolovaně a dlouhodobě. Ale zatímco sny se pouze zdají, výzkumu jaderné fúze a jejímu využití se věnují nejlepší mozky planety. Krůček po krůčku se vědcům daří překonávat překážky na cestě k cíli. Odborníci z České republiky mezi nimi zaujímají respektované postavení.

Od využití jaderné fúze nás dělí třicet let – a vždy to tak bude, praví oblíbený bonmot. Někdy ho lze zaslechnout i v obecnější a snad ještě sarkastičtější podobě: Jaderná fúze je energetickým zdrojem budoucnosti. A navždy jím zůstane.

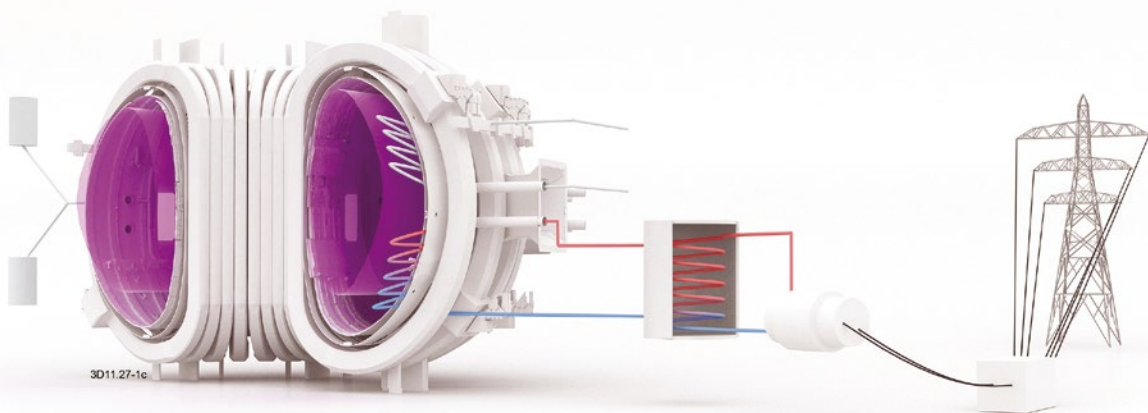
Jsou to zlá slůvka, ale mají reálný základ. Na počátku výzkumu jaderné fúze mnozí fyzikové překypovali optimismem. Řešení se však od té doby průběžně odsouvá, protože se ukazuje, že překážek a problémů je více, než si kdo dokázal představit. To však neznamená, že bonmot bude platit navždy. Na pozadí se odehrávají velké věci. Některých si všímá i laická veřejnost – budování mezinárodního experimentálního reaktoru ITER je dobrým příkladem –, o jiných ví jen úzký okruh znalců.

A právě toto skryté dění nám dává naději, že se fúzních elektráren dočkáme. „Existuje krásný graf, který srovnává výzkum fúze se slavným Moorovým zákonem. A to srovnání zhruba sedí,“ říká Slavomír Entler z oddělení Tokamaku

Ústavu fyziky plazmatu AV ČR. Moorův zákon sice nemá sílu zákona přírodního, jde o čistě empirický postřeh, už desítky let však platí. V souladu s ním roste závratnou rychlostí hustota tranzistorů v integrovaném obvodu – a tím i výkonost počítačů. Naše chytré telefony toho umí nesrovnatelně více (a rychleji) než sálové počítače šedesátých let 20. století.

„Teprve v roce 1968 se v experimentálních reaktorech typu tokamak podařilo dosáhnout teploty 10 milionů stupňů. Z dnešního pohledu to není nic moc, dostali jsme se už na 200 milionů, což je více, než potřebujeme. Ano, čas letí, ale vývoj nestagne,“ pokračuje Slavomír Entler.

Proč tedy fúzní elektrárny stále nestojí? Jaderná fúze se od výpočetní techniky v důležitém aspektu liší: Počítače fungovaly i v době, kdy hustota tranzistorů nebyla nijak závratná. Byly jen pomalejší a na některé dnes běžné úkoly nestačily. Aby fungovala fúzní elektrárna, musí být splněna řada náročných podmínek. Nesplníte jedinou z nich a spláčete nad výdělkem.



FÚZÍ ELEKTRÁRNY –
POTENCIÁLNÍ ZDROJ ČISTÉ
ENERGIE PRO
BUDOUCNOST

Zatímco vývoj počítačů představuje kontinuum, které každý z nás prožívá na vlastní kůži, na jaderné fúzi se pracuje z velké části mimo zraky veřejnosti. Dlouho nevidíte zdánlivě žádný výsledek, až se nakonec vše složí do vyladěného celku a výzkum se rázem posune o velký kus vpřed.

Takových skoků už ve výzkumu fúze nastalo několik, dalším na řadě bude spuštění zmíněného reaktoru ITER. „Dnes jde o technologický, nikoli fyzikální problém. Když to zjednoduším: už neřešíme, jak kontrolovaně uvolňovat fúzní energii, ale jak vyrobit součástku tak, aby vydržela podmínky v tokamaku,“ vysvětluje Slavomír Entler.

Jednotlivých technických detailů, které je třeba vyřešit, je nepřeberné množství. Každý z nich vyžaduje systematický výzkum, testování, hledání kompromisů a prošlapávání slepých uliček. Mnohdy je třeba přijít se zcela novými postupy či materiály, které pak ale mohou posloužit i mimo oblast jaderné fúze. „Reaktor není kus železa, ale komplex nově vyvinutých a pak mnohokrát testovaných dílů, které nemají nic společného se současnou průmyslovou produkcí,“ říká Slavomír Entler.

Podrobněji si přiblížíme dva projekty, jimž se věnují čeští odborníci v rámci programu Systémy pro jadernou bezpečnost, který je součástí Strategie AV21: vývoj keramicko-kovových Hallových senzorů magnetického pole a gradovaných materiálů pro první stěnu tokamaku.

Tančí magnetické pole správně?

Magnetické pole je jednou z klíčových komponent tokamaku, protože

jako neviditelná nádoba udržuje termojadernou plazmu v bezpečné vzdálenosti od stěn, které by jeho bezprostřední působení dlouho nevydržely. A tato magnetická nádoba je všechno možné, jen ne jednoduchá. Pole generují jak cívky obklopující komoru tokamaku, tak elektrický proud protékající plazmatem.

„Plazma je velmi živé médium se spoustou turbulencí a nestabilit, které mají vliv na elektrický proud a jeho distribuci, a tedy i na magnetické pole. Plazma magnetickou nádobu různě deformuje a posouvá, je to velmi dynamický proces,“ vysvětluje Entlerův kolega Ivan Ďuran. Proto je potřeba chování magnetického pole neustále monitorovat. „Pokud zjistíme, že se řítíme do problému, můžeme v magnetických cívkách upravit proud a vrátit plazma do relativně stabilního stavu,“ říká Ivan Ďuran.

V dosavadních tokamacích k tomuto sledování stačily induktivní cívky. Nyní však přestávají vyhovovat. Kamenem

úrazu je, že cívky neměří přímo intenzitu magnetického pole, ale její derivaci, tedy změny, jimiž prochází. V dnešních tokamacích to nevádí, protože výboje v nich trvají krátce – typicky desítky sekund až minuty. Ale v tokamaku ITER budou výboje trvat i několik desítek minut a v budoucím prototypu skutečně funkční fúzní elektrárny, nazvané DEMO,

Je třeba přijít se zcela novými postupy a materiály.



JEDNOTKA OBSAHUJÍCÍ DVA NA SEBE KOLMÉ
HALLOVYSENZORY, TERMOČLÁNEK
A KALIBRAČNÍ KAPSLI

řádově hodiny. Drobné chyby, které při měření cívkami vznikají a na krátkých časových škálách nevadí, by v tomto případě narostly do nebezpečných rozměrů. Operátoři by mohli z naměřených dat například získat dojem, že se sloupec plazmatu pomalu posouvá jedním směrem, takže by se ho pokusili ukáznit – ale protože by pracovali s falešným signálem, svým zásahem by napáchali víc škody než užítku.

Řešení od pana Halla

Bude tedy nutné měřit přímo intenzitu magnetického pole, nikoli jeho změny. „To byla hlavní motivace, proč jsme se před nějakými dvaceti lety začali zabývat Hallovými senzory,“ říká Ivan Ďuran.

Jak už jejich název napovídá, tyto senzory využívají tzv. Hallův jev. Nejde o žhavou novinku, americký fyzik Edwin Herbert Hall ho objevil už v roce 1879. Princip je poměrně jednoduchý: na vodič nebo polovodič (představte si spíše plochý plíšek než tenký drátek), jímž podélně protéká elektrický proud, nechte působit magnetické pole, jehož siločáry směřují kolmo ke směru proudu. Výsledek? Magnetické pole vychyluje protékající elektrony, takže se napříč vodičem rozloží nerovnoměrně: na jedné straně jich je nadbytek, na druhé nedostatek. Tím mezi oběma stranami vzniká (Hallovo) napětí, které lze měřit. Je přímo úměrné velikosti magnetického pole. Využití v tokamaku se tedy nabízí. Má to ale háček...

Dlouhou historii za sebou nemá jen znalost Hallova jevu, ale i jeho praktické využití. Hallovy senzory se používají v mnoha oblastech, například jako

bezdotyková čidla přiblížení pro průmyslové roboty. Slouží i v automobilech od motoru po měření hladiny paliva, v bezkontaktních spínačích, v otáčkoměrech všeho druhu... „Hallových senzorů se vyrábějí miliardy, trh s nimi je obrovský. Za tři koruny koupíte kus,“ říká Slavomír Entler. V čem je tedy zmíněný háček? „I kdybyste se roztrhali, nekoupíte Hallův senzor, který bude fungovat při více než 150 °C a v prostředí s radiací.“ A to je pro tokamak problém. Provozní teplota senzorů v ITER se sice bude pohybovat v rozmezí od 95 do 105 °C, ale při odplyňování vakuové komory reaktoru se může vyšplhat až na 220 °C. A pro budoucí fúzní elektrárny bude třeba připravit senzory zvládající až 500 °C.

Navíc jsou stávající polovodičové senzory málo odolné vůči ionizujícímu záření. „Na jaře jsem byl ve Fukušimě a sledoval roboty, které tam používají. Není v nich žádná elektronika, vše se ovládá po drátech. V provozu jsou nanejvýš kamery, které vydrží pracovat pár dnů a pak musí být vyměněny. Polovodičová elektronika, která by dlouhodobě vydržela silné ionizující záření, neexistuje,“ říká Slavomír Entler.

Co takhle zkusit bismut?

Jev, jenž byl po něm posléze pojmenován, E. H. Hall objevil při pokusech se zlatými fóliemi. Tedy s kovovým vodičem, pro který je typická velká koncentrace vodivostních elektronů. Dnešní Hallovy senzory jsou však vyrobeny z polovodičů, které mají těchto elektronů mnohem méně. Hallův jev je v nich díky tomu mnohem lépe měřitelný. „Jakmile se objevily polovodiče, nastal boom praktického využití Hallových senzorů, protože jejich Hallovo napětí bylo o několik řádů větší. Kovy upadly do zapomnění,“ říká Ivan Ďuran a dodává: „My jsme je oprášili,



ING. JIŘÍ
MATĚJČEK,
PH.D.

Vystudoval na Fakultě jaderné a fyzikálně inženýrské ČVUT v Praze, doktorát získal na State University of New York (Stony Brook, USA). V oddělení materiálového inženýrství Ústavu fyziky plazmatu AV ČR se zabývá vývojem materiálů pro jadernou fúzi, charakterizací žárových nástřiků, jejich mechanickými vlastnostmi a zbytkovým nputím. V roce 2006 získal Prémii Otto Wichterleho – cenu pro mladé vědecké pracovníky Akademie věd ČR.



protože jsme si uvědomili, že by pro fúzi a možná i v jiných aplikacích mohly být zajímavé. Jsou teplotně i radiačně mnohem odolnější.“

Nejprve se zkoušely měděné senzory, ale v nich generované Hallovo napětí bylo příliš nízké. Potom Ivan Ďuran na základě analýz a konzultací s experty z jiných oborů vyzkoušel bismut. Byl to originální nápad – Hallův jev se v tomto kovu měřil už dříve, protože ve fyzice pevných látek se takové měření používá ke studiu vlastností materiálů, ale postavit bismutový Hallův senzor do té doby nikoho nenapadlo.

Bismut se ukázal jako správná volba. „Není to úplně typický kov, někdo ho řadí mezi polokovy. V kovech má každý atom jeden nebo několik volných elektronů ve vodivostním pásu. Proto v nich je volných nosičů náboje moc. V polovodičích v podstatě není žádný, ale v závislosti na teplotě tam občas nějaký vyskočí. A bismut je někde na půl cesty. Ve vodivostním pásu má elektronů relativně málo, takže se trochu podobá polovodičům,“ vysvětluje Ivan Ďuran.

Citlivost kovů na magnetické pole je o šest řádů (tedy milionkrát) nižší než polovodičů, citlivost bismutu je nižší pouze asi stokrát. Zatímco typické kovové

senzory vyžadují měření s přesností nano- až pikovoltů, což je mimo laboratoř mimořádně obtížné, bismutové senzory generují napětí v řádu milivoltů a ty stačí měřit s přesností na mikrovolyty. Bismut je

radiačně velmi odolný a jeho teplota tání je 271,5 °C, pro ITER tedy dostatečná.

Ale jak už jsme u technologií potřebných pro provoz fúzních reaktorů zvyklí, opět před námi vyvstává problém. Citlivost bismutových senzorů totiž se zvyšující se teplotou klesá. Je tedy potřeba teplotu měřit, aby se naměřené hodnoty magnetického pole daly přepočítat, a získat nezkrácené informace. U senzoru

Bismut je teplotně i radiačně odolnější než polovodiče.



ING.

MONIKA

VILÉMOVÁ,

P.H.D.



Vystudovala na Fakultě jaderné a fyzikálně inženýrské ČVUT v Praze, kde na katedře materiálů získala i doktorát. V rámci doktorského studia absolvovala stáž na State University of New York (Stony Brook, USA). V oddělení materiálového inženýrství Ústavu fyziky plazmatu AV ČR se zabývá wolframem, přípravou jeho slitin a studiem jejich vlastností. Věnuje se také přípravě a charakterizaci žárových nástřiků.



EXPERIMENTÁLNÍ
TOKAMAK COMPASS
V ÚSTAVU FYZIKY
PLAZMATU AV ČR

Nikdo jiný dosud takový materiál nepotřeboval.

jsou proto termočlánek a kalibrační kapsle obsahující indium, které taje přesně při 156,5985 °C. Roztavení india lze zaznamenat a se znalostí tohoto údaje se dá termočlánek pravidelně kalibrovat.

Nemůže být kalibrace ohrožena? „Museli jsme modelovat transmutaci india, abychom měli jistotu, že i po deseti letech provozu bude v kapsli skutečně čisté indium s tabulkovou hodnotou teploty tání. Naštěstí to dopadlo dobře, ale až tak daleko je třeba vše domýšlet,“ upozorňuje Ivan Ďuran.

Transmutace prvků je mimochodem jeden z důvodů, proč pro senzory nelze využít zlato, na němž Hall „svůj“ jev objevil, přestože má jinak řadu výhodných vlastností.

„Ukázalo se, že kvůli vysoké citlivosti na neutronový tok by se během předpokládané životnosti senzorů na reaktoru DEMO třetina zlata přeměnila na rtuť. Sensory by nám při provozu doslova odtékly,“ vysvětluje Slavomír Entler.

A tak je to u fúze se vším. Náročné pracovní prostředí vyžaduje neustálé

zvažování výhod a nevýhod materiálů, hledání kompromisů, které odstraní fatální nedostatky, aniž by příliš snížily přesnost či spolehlivost jednotlivých komponent. Závislost bismutu na teplotě je nepříjemná, pro DEMO bude ovšem omezující zejména relativně nízká teplota tání, ale proti tomu stojí poměrně slušná citlivost a vysoká odolnost vůči ionizujícímu záření. Výhody jsou tak zásadní, že bismutové senzory vyvinuté pro ITER možná poslouží i v budoucích plně funkčních fúzních elektrárnách – alespoň v místech, kde to teplota umožní. Například v divertoru ve spodní části tokamaku, kde se odstraňují odpadní produkty fúzní reakce a odvádí se nejvíce tepla. Divertor bude chlazen na 150 °C, takže bismutové senzory by v něm měly fungovat.

Kyslíku vstup zakázán

Další problém, který bylo nutné vyřešit, souvisí s velkou ochotou bismutu oxidovat, zvláště při vyšších teplotách. Proto se musí povrch senzoru překrýt vrstvou nějakého materiálu, jenž přístupu kyslíku zabrání. Po dlouhé době zkoušení se

nejvíce osvědčil korund (Al_2O_3). Ale i přes něj kyslík pomalu proniká, takže fyzikové hledali, čím by se dal ještě překrýt.

„Nakoupili jsme desítky různých materiálů počínaje vodním sklem a konče různými šamotovými pastami. Když už se zdálo, že jsme našli vhodného kandidáta, nezvládl test teplotními cykly,“ vzpomíná Slavomír Entler. Sensory totiž budou umístěny v těsné blízkosti radiačního štítu, který bude chlazen heliem na teplotu kapalného dusíku (zhruba $-200\text{ }^\circ\text{C}$). A je třeba počítat i s tím, že dojde k nehodě a chladicí médium pronikne k sensorům. Během testů tedy patřičně chráněné sensory absolvovaly skokové ochlazení z $200\text{ }^\circ\text{C}$ na $-200\text{ }^\circ\text{C}$. Většina materiálů tak drastické zacházení nevydrží a praskne.

Jako v mnoha jiných případech by se vědcům vyvíjejícím sensory hodil e-shop, v němž by si mohli naklikat požadované vlastnosti hledaného materiálu. Jenomže takový obchod samozřejmě neexistuje. Požadavky jsou velmi specifické, nikdo jiný dosud takový materiál nepotřeboval.

Nakonec se sice podařilo vhodný kryt najít, ale tím starosti neskončily. „Najdete pastu, která splňuje vše, co od ní čekáte – a rok poté výrobce změní technologický postup výroby a její vlastnosti se třeba mírně, ale v pro nás důležitých aspektech změní,“ uvádí příklad Ivan Ďuran.

První prototypy bismutových sensorů vznikly v Ústavu fyziky plazmatu AV ČR v roce 2014, nyní je jejich vývoj ukončen a je rozhodnuto, že budou instalovány v reaktoru ITER. Vnější plášť vakuové nádoby se osadí šedesáti jednotkami. Každá jednotka, silná asi jeden centimetr, bude mít dva na sebe kolmé sensory a bude obsahovat i již zmíněný termočlánek a kalibrační kapsli pro měření teploty a další obslužné součástky. Sama citlivá bismutová vrstva na senzoru je silná pouhou tisícinu milimetru.

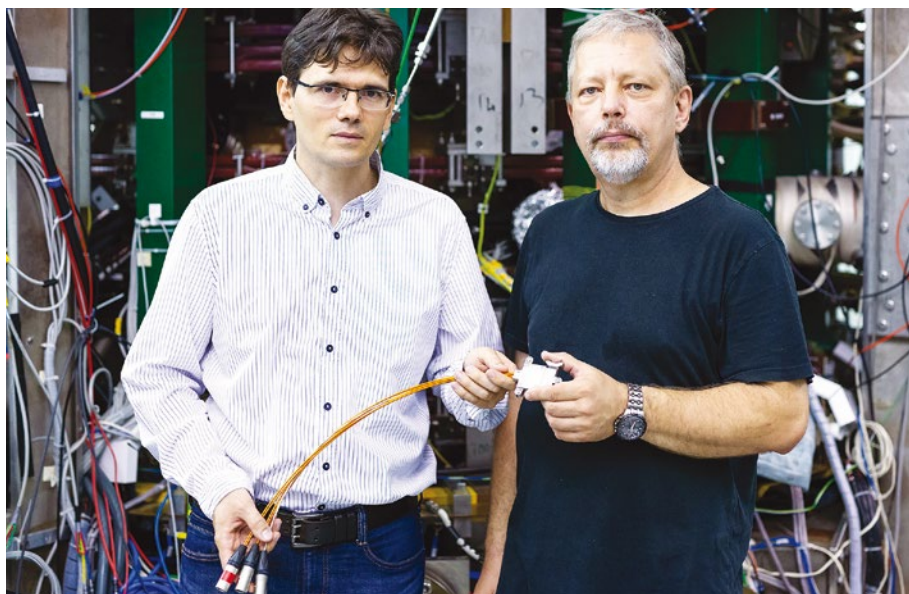
Miliardtiny voltu

Ale ani bismut plně neuspokojí nároky reaktoru DEMO a fúzních elektráren v reálném provozu. Pro ně budou



ING.
SLAVOMÍR
ENTLER,
P.H.D.

Vystudoval Energeticko-fyzikální fakultu Moskevského energetického institutu, doktorát získal v oboru Energetické stroje a zařízení na Fakultě strojní ČVUT v Praze. O jaderné fúzi a termojaderných zařízeních přednáší na Fakultě strojní a na Fakultě jaderné a fyzikálně inženýrské ČVUT. V oddělení tokamaku Ústavu fyziky plazmatu AV ČR se zabývá diagnostikou plazmatu, vývojem technologií pro fúzní zařízení a integrací fúzních reaktorů do energetiky.



IVAN ĎURAN
A SLAVOMÍR ENTLER
VYVINULI SENZORY
MAGNETICKÉHO POLE
PRO REAKTOR ITER.

JADERNÁ FÚZE: CO, JAK, PROČ

Zatímco v klasických jaderných elektrárnách se štěpí atomová jádra těžkých prvků, ve fúzních elektrárnách se budou slučovat atomová jádra lehkých prvků. Cílem je využívat k výrobě energie proces, který pohání hvězdy včetně Slunce. I zde platí, že rozbít je snazší než spojit. Energii termojaderné fúze dosud lidstvo zvládlo uvolnit pouze explozivně – ve vodíkové pumě. V první generaci fúzních elektráren se budou slučovat těžké izotopy vodíku – deuterium ^2H a tritium ^3H (vznikající přímo v reaktoru z lithia ^6Li) – za vzniku helia ^4He a volných neutronů, které budou odnášet uvolněné teplo do stěn reaktoru, odkud je odvede chladicí systém k výrobě elektrické energie. V další generaci by mělo stačit pouze deuterium (získávané z vody, jejíž je sice minoritní, ale přirozenou součástí).

Reaktory budou bezpečné – termojaderná fúzní reakce může probíhat pouze za obrovských teplot (asi 160 milionů °C) a za splnění dalších podmínek, takže se nemůže vymknout kontrole. Při jakékoli nestabilitě se sama zastaví. Naopak je extrémně náročně udržet reakci v běhu tak dlouho, aby fúzní elektrárna generovala více energie, než kolik sama spotřebuje. **V každém okamžiku budou v reaktoru řádově jen gramy paliva a nebude vznikat radioaktivní odpad** – s výjimkou konstrukčních prvků reaktoru, které budou aktivovány dopadajícím proudem vysokoenergetických neutronů. Materiály však budou nejpozději za sto let relativně bezpečné. Proti vyhořelému palivu dnešních jaderných elektráren jde o okamžik.

Zatímco tepelná elektrárna o výkonu 2 GW spotřebuje denně 40 000 tun uhlí a jaderná 125 kg oxidu uranu, fúzní elektrárna by si vystačila s 2 kg vodíkových izotopů. Obnovitelné zdroje energie jsou kvůli nízkému energetickému toku náročné na prostor: zatímco jaderná nebo fúzní elektrárna o výkonu 2 GW zabere plochu asi 1,5 km², větrná farma o stejném výkonu potřebuje přibližně 32 km² a solární elektrárna 96 km². Fúzní elektrárny by proto do budoucna mohly být efektivní, čistou a bezpečnou součástí energetického mixu.

zapotřebí senzory odolávající teplotě až 500 °C, také by bylo výhodné zbavit se závislosti měření na teplotě.

„Podali jsme návrh na patent na anti-monové čidlo. Tento polokov má podobné vlastnosti jako bismut, jeho Hallův jev je sice asi 25× slabší, ale pořád výrazně větší než u kovů. A 500 °C vydrží. Vykazuje však podobnou teplotní závislost jako bismut a očekáváme, že bude o něco méně radiálně odolný, takže ani on není pro reaktory zcela ideální,“ říká Slavomír Entler. Mohl by se však uplatnit v jiných průmyslových odvětvích, v nichž musí odolávat vysokým teplotám, nikoli však intenzivnímu ionizujícímu záření.

„Pro energetické reaktory musíme hledat dál. Bohužel jsme došli k závěru, že nezávislost citlivosti měření na teplotě je spojena s vysokým množstvím nosičů náboje. Z tohoto pohledu zkrátka budou vhodné kovy. Ty však mají velmi slabý Hallův jev. Tím se dostáváme do situace, která představuje mimořádnou výzvu: měřit v průmyslových podmínkách na dlouhou vzdálenost napětí s přesností na nanovolty (miliardtiny voltu). Zní to skoro jako technický nesmysl, ale musíme toho dosáhnout,“ představuje Slavomír Entler další krok na cestě k senzorům magnetického pole pro fúzní elektrárny.

Ve spolupráci s odborníkem na elektroniku Petrem Sládkem a dalšími experty proto nyní vědci z Ústavu fyziky plazmatu Akademie věd ČR hledají způsob, jak dosáhnout zdánlivě nemožného. Jedním z nástrojů, jenž je součástí řešení, je využití proudové rotace. „Náš Hallův senzor je kříž se čtyřmi symetrickými póly. Dvěma senzory napájíte, dvěma měříte výstupní signál. Při využití proudové rotace neustále prohazujete póly pro napájení a měření. Eliminujete tím napěťové nesymetrie senzoru a zvyšujete přesnost měření,“ vysvětluje Slavomír



NA JIHU
FRANCIE SE
STAVÍ ME-
ZINÁRODNÍ
EXPERIMEN-
TÁLNÍ REAK-
TOR ITER.



ING.
IVAN
ĎURAN,
PH.D.

Vystudoval na Fakultě jaderné a fyzikálně inženýrské ČVUT v Praze, doktorát získal na Matematicko-fyzikální fakultě Univerzity Karlovy v Praze. V oddělení tokamaku Ústavu fyziky plazmatu AV ČR se zabývá vývojem a testy diagnostických metod pro charakterizaci vysokoteplotního plazmatu, studiem okrajového plazmatu a turbulence v tokamacích a vývojem Hallovyh sensorů pro měření magnetických polí ve fúzních zařízeních. V roce 2008 získal Prémii Otto Wichterleho – cenu pro mladé vědecké pracovníky Akademie věd ČR.

Entler. A doplňuje, že další používanou metodou je synchronní detekce: „Sensor napájíme referenčním signálem a ve výstupním signálu hledáme jeho otisk. Pokud jej najdeme, můžeme všechno ostatní zahodit. Tím se zbavíme všeho šumu a rušivých napětí a můžeme měřit i velmi nízké Hallovo napětí.“

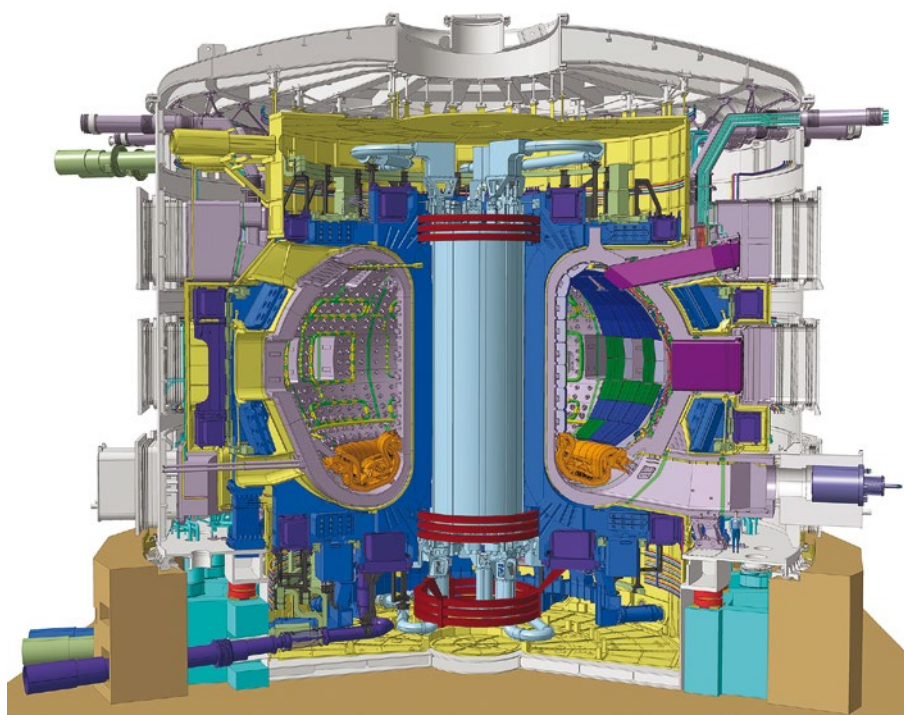
Úkol vsutku obří. A času není mnoho. Jedním z hlavních cílů ITER je testování technologií pro fúzní elektrárny, které jdou svými nároky daleko za úroveň postačující pro samotný ITER. „Počítá se s tím, že se nové senzory umístí do testovací kazety, která bude zasunuta do portu reaktoru a bude se zkoušet, zda budou senzory pro fúzní reaktory použitelné. Takže my tu kazetu musíme dát dohromady maximálně do deseti let, možná dříve, přestože v té době se ještě fúzní elektrárna stavět nebude,“ říká Slavomír Entler a dodává: „Doufáme, že nám sportovně založený kolega, který dělá elektroniku, nespadne ze skály. Za ty roky získal takové znalosti, jaké nikdo jiný v jeho oboru nemá. Kdybychom museli hledat náhradu, ztratíme několik let.“ Ivan Ďuran doplňuje: „Člověk za život stihne vyzkoušet tři čtyři cesty, vše trvá hodně dlouho. Potřebujeme i trochu štěstí.“

Výzkum Hallovyh sensorů pro měření magnetického pole v tokamacích je komplexní, mezioborová záležitost. Ústav fyziky plazmatu AV ČR proto

spolupracuje s odborníky řady jiných institucí. Pomáhají například kolegové z Fyzikálního ústavu AV ČR – zkoumají vlastnosti potenciálně vhodných materiálů, zajišťují deponování tenkých vrstev (podobně jako společnost HVM Plasma) a připojení drátků na deponované nanovrstvy. Ve společném pracovišti Fyzikálního ústavu a Univerzity Karlovy probíhají testy v silných magnetických polích, v Centru výzkumu Řež se ověřuje stabilita v radičním prostředí. Český metrologický institut spolupracuje na kalibraci termočlánků. Firma už zmíněného Petra Sládka se stará o elektroniku, s níž je spojena velká část technických výzev. „Kdyby se vše mělo koncentrovat na jedno pracoviště, vznikl by docela velký ústav,“ komentuje šíři spolupráce Slavomír Entler.

Ústav je integrován i do mezinárodních struktur, které se fúzí zabývají: v ITER International Fusion Energy Organization a v evropském konsorciu EUROfusion. „Trochu se potýkáme s tím, že české grantové agentury nevědí, kam nás zařadit. Grantová agentura podporuje základní výzkum, my se však zabýváme aplikacemi. Ale v Technologické agentuře by požadovali, abychom za tři roky vyvinuli produkt, který si od nás někdo koupí. My pracujeme na věcech bezpochyby praktických, ale jejich využití se pohybuje v delším časovém horizontu. Jsme proto vděční Strategii AV21

ITER BUDE
JEDNÍM
Z NEJKOM-
PLEXNĚJŠÍCH
STROJŮ,
KTERÉ
LIDSTVO
VYROBIL.



Akademie věd ČR, která podporuje mezioborové vazby a výzkumné projekty realizované mimo aktuální výzkumné programy," uzavírá Ivan Ďuran.

Vnitřní štít tokamaku

Hallové senzory budou pomáhat udržet magnetickou nádobu v dobré kondici, aby plazma nepřicházelo do kontaktu se stěnou tokamaku. Ta proto může být na svém vnitřním povrchu obložena třeba karbonem?

Nikoli. Plazma vyzařuje obrovské množství energie, vždyť právě kvůli tomu chceme fúzní elektrárny stavět. Mezi plazmatem a stěnou tokamaku bude značný

tepelný tok, který jen tak nějaký materiál nevydrží, byť největšímu náporu bude vystaven divertor, tvořící spodní část tokamaku. Stěnu budou také bombardovat vysokoenergetické neutrony, na které magnetické pole nepůsobí.

„Kromě toho není magnetické udržení plazmatu dokonalé. Probíhají tam různé

turbulence a difúze, takže nějaké částice ke stěně pronikají neustále. Výboj navíc nelze udržet donekonečna, vždy po nějaké době skončí a částice dopadnou na stěny," vysvětluje Jiří Matějčík z Oddělení materiálového inženýrství Ústavu fyziky plazmatu AV ČR.

Plazma bude na stěnu tokamaku působit řadou fyzikálních a chemických mechanismů. Ani pro ni není žádný materiál ideální, každý má svá pro a proti. Nezbývá než hledat kompromisy a pokoušet se vybraný materiál upravit tak, aby se důsledky jeho špatných vlastností co nejvíce omezily.

V experimentálním tokamaku COMPASS, který pracuje v Ústavu fyziky plazmatu, jsou vnitřní stěny obloženy grafitovými dlaždicemi. „Grafit se dobře obrábí a nepodléhá tavení, takže vysoké tepelné toky nepředstavují problém. Navíc je poměrně levný," říká Jiří Matějčík.

Jak už asi tušíte, i grafit má svá „ale“, jež jeho využití ve fúzních elektrárnách komplikují. „Interakcemi s neutrony uhlík ztrácí tepelnou vodivost, což je pro materiál první stěny tokamaku, který musí odvádět teplo následně využitě pro

Grafit
pohlcuje
tritium, stěna
by byla příliš
radioaktivní.

transformaci na elektrickou energii, klíčová vlastnost," vysvětluje Matějčíková kolegyně Monika Vilémová.

„Další nevýhodou grafitu je, že reaguje s izotopy vodíku. Jednak je dost pohlcuje, takže by se v něm akumulovalo tritium a stěna by byla příliš radioaktivní. Reakce s vodíkem by navíc vedla k tzv. chemické erozi: vznikaly by plynné uhlovodíky, které by se ze stěny postupně uvolňovaly," říká Jiří Matějčík. „Chemická eroze by vedla k nízké životnosti dlaždic. Výměna v prostředí s radioaktivními prvky nebude úplně jednoduchá, takže životnost představuje důležitý faktor," doplňuje Monika Vilémová. To jsou hlavní důvody, proč se od grafitu upustilo, i když zpočátku s ním fyzikové počítali i pro ITER.

Budoucnost patří wolframu

Pro první stěnu reaktoru ITER bylo zvoleno berylium, pro divertor wolfram. Je ale jasné, že tím berylium končí – v reaktoru DEMO a budoucích elektrárnách se bude muset využít jiný materiál. Berylium ve formě prachu je toxické, což by působilo potíže při výrobě a odstavení reaktoru. „Smyslem ITER je prokázat fyzikální podstatu fúze a funkčnost základních mechanismů jejího využití. V něm berylium nevádí. Ale u DEMO se už bude brát v úvahu i tento faktor. Kvůli bezpečnosti je spousta vhodných prvků z výzkumu automaticky vyloučena, což dost omezuje prostor, ve kterém se můžeme pohybovat," vysvětluje Monika Vilémová. Padlo arbitrární rozhodnutí, že materiály se musí vybírat tak, aby jejich radioaktivita po sto letech umožnila bezpečnou manipulaci v ochranném oděvu. O tak nízké radiaci si u tradičních jaderných elektráren mohou fyzikové nechat jen zdát.

Zdá se, že budoucnost patří wolframu, alespoň pokud jde o první stěnu

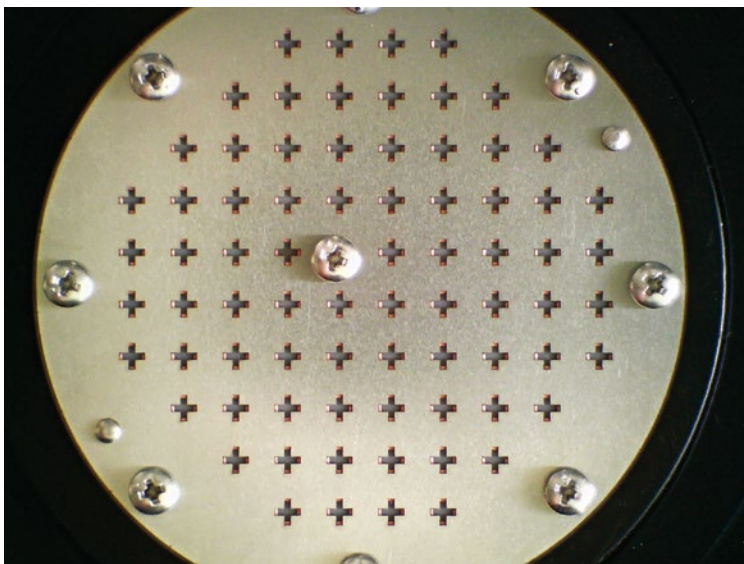
a divertor fúzních reaktorů. Porovnáním jeho dobrých a špatných vlastností vychází nikoli jako dokonalý materiál, ale jako nejmenší zlo. Nic lepšího zkrátka k dispozici zatím není. I některé z dnešních velkých tokamaků (např. ASDEX-U) již mají po modernizaci první stěnu z wolframových dlaždic, aby se na nich daly dělat experimenty relevantní pro budoucí elektrárny.

„Wolfram vydrží vysoké teploty a má dobrou tepelnou vodivost. Jako prvek s vysokým atomovým číslem je schopen vydržet dopad všech možných částic plazmatu, aniž by se příliš erodoval," vyjmenovává Jiří Matějčík výhody tohoto kovu. Ten také na rozdíl od grafitu příliš nepohlcuje vodík a ne reaguje s ním.

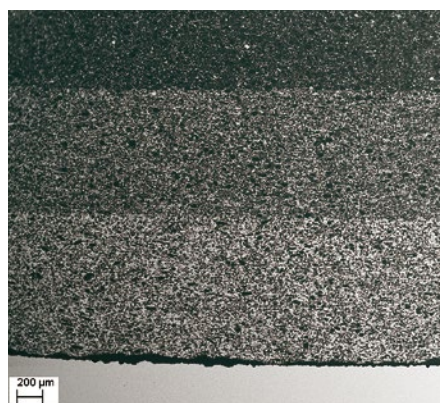
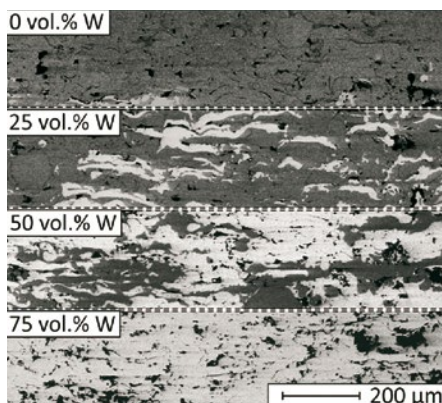
Ani on však není dokonalý. Těžké prvky obecně jsou jen vzácně vyraženy

Nic lepšího než wolfram zatím k dispozici není.

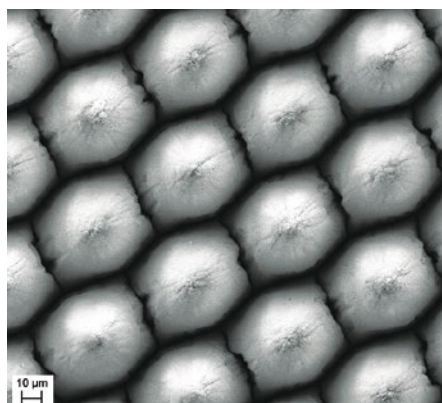
DEPOZIČNÍ
MASKA PRO
VÝROBU
BISMUTOVÝCH
HALLOVÝCH
SENZORŮ



GRADOVANÁ VRSTVA
 OCEL-WOLFRAM
 S ROSTOUCÍM PODÍLEM
 WOLFRAMU
 (OD 0 % DO 75 %)



GRADOVANÁ VRSTVA
 WOLFRAM-OCEL
 PŘIPRAVENÁ METODOU
 SPARK-PLASMA
 SINTERING (SPS)



POVRCH WOLFRAMU
 OPRACOVANÝ LASEREM
 PRO LEPŠÍ PŘILNAVOST
 NÁSTRÍKU

Oxid chromu zabrání kontaktu wolframu s kyslíkem.

z povrchu dopadem jádra vodíku nebo helia, ale když už se tak stane, prudce plazma ochladí, což může komplikovat udržení fúzní reakce. Další nepříjemnou vlastností wolframu je, že při teplotách nad 1200 °C rekrytalizuje a působením neutronů křehne, takže později může podlehnout teplenému (a tím i mechanickému) namáhání a prskat.

Hlavní potíže jsou však spojeny s chováním wolframu v případě havárie. „Velká část nehod, o kterých se uvažuje, souvisí s poškozením chladicího okruhu, při kterém vnikne do reaktoru voda, nebo dojde k poškození integrity reaktoru a dostane se do něj vzduch a vlhkost. A když wolfram za

vysokých teplot přijde do styku s něčím, co obsahuje kyslík, začne velice intenzivně oxidovat,“ říká Monika Vilémová. Oxidovaný wolfram nabývá na objemu a mohlo by se stát, že se reaktor dokonce roztrhne. „Oxid wolframu je navíc těkavý, snadno se šíří vzduchem. Aktivovaný wolfram by pak ve formě oxidu mohl kontaminovat okolí elektrárny,“ upozorňuje Monika Vilémová.

Jedním z cílů výzkumu proto je nevýhodné vlastnosti wolframu co nejvíce potlačit. Ale jak se dá vylepšit chemický prvek? „Například přípravou vhodných slitin, které budou na přítomnost kyslíku za vysokých teplot reagovat vytvořením tenké oxidové vrstvy z jiného prvku. Takovou vrstvou může být například oxid chromu, který vytvoří neprostupnou bariéru a zabrání dalšímu kontaktu wolframu s kyslíkem. Nevznikaly by tak oxidy

odnášející radioaktivní materiál pryč. Ale tento výzkum je zatím v začátcích," říká Monika Vilémová, jež se věnuje studiu mikrostruktury, fázového složení a tepelné stability podobných materiálů. „Tyto slitiny se často připravují z prvků, které se lidově řečeno vzájemně nemají moc rády. Netvoří jednu fázi a nastávají problémy," vysvětluje.

Problém oddělených fází pomáhá omezit relativně nová metoda sinterování, tzv. spark-plasma sintering (SPS). Materiál ve formě prášku se nasype do grafitové formy, v níž na něj souběžně působí mechanický tlak a elektrický proud, který surovinu zahřívá. Největší elektrický odpor vzniká na hranicích mezi zrnky, proto se tam materiál zahřívá nejvíce. Lze tak dosáhnout, že se rychle zahřeje i zchladí, a omezit tak rozpad na více fází a nárůst krystalových zrn. „Spolu s jednou laboratoří v Německu jsme jako první připravili slitiny wolframu a chromu ve formě jediné fáze, které se pro pasivaci povrchu hodí nejvíce," dodává Monika Vilémová.

„Jednou z možností, jak vylepšit mechanické vlastnosti wolframu, je vyrobit kompozit z wolframových vláken a prášku. Pokud v něm vznikne trhлина, narází na vlákno, odkloní se podél něj a ke svému šíření pak potřebuje více energie. V homogenním materiálu by se šířila mnohem snadněji tím směrem, kterým by ji navádělo mechanické napětí," říká Jiří Matějček. Lze si hrát i s velikostí zrna a s přidávkem nanočástic jiné fáze. Při zahřívání pak krystaly tolik nerostou, jejich spojení je pevnější a křehnutí není tak intenzivní.

Pěkně postupně...

Wolfram se tedy jeví jako zatím nejlepší volba pro povrch, který bude čelit nejrůznějším formám působení plazmatu. Nemůže se z něj však postavit celý

TOKAMAKY SOUČASNÉ I BUDOUCÍ

Tokamak je jen jednou z více cest vedoucích ke zkrácení jaderné fúze, technicky je však nejdál. Tento koncept původem z bývalého Sovětského svazu využívá k udržení termojaderného plazmatu silné magnetické pole v nádobě prstencovitého tvaru (tokamak = тороидальная камера с магнитными катушками, toroidální komora s magnetickými cívkami).

Ve světě funguje řada experimentálních tokamaků, nejsou však určeny k výrobě energie – a nejsou toho koneckonců ani schopny. Největší z nich je evropský tokamak JET (Joint European Torus) v anglickém Culhamu. Ústav fyziky plazmatu AV ČR provozuje tokamak COMPASS, získaný v roce 2006 z Velké Británie. V roce 2022 by měla vědcům začít sloužit jeho vylepšená verze COMPASS-UPGRADE.

U výzkumného centra Cadarache ve francouzské Provence se od roku 2007 staví mezinárodní reaktor ITER. Na výstavbě se podílejí země EU, USA, Rusko, Čína, Indie, Japonsko a také Jižní Korea. Po několika odkladech by měl ITER začít fungovat v roce 2025 a na plný výkon pak pracovat v roce 2036. Má sloužit k demonstraci technické realizovatelnosti a správného fungování všech hlavních komponent reaktoru. Přestože bude mít fúzní výkon 500 MW (při příkonu 50 MW), nebude ještě určen k výrobě elektrické energie. Jde o druhý nejdražší mezinárodní vědecký projekt světa (po Mezinárodní vesmírné stanici ISS).

Na ITER naváže DEMO – první funkční prototyp fúzní elektrárny ověřující všechny technologie v podmínkách reálného provozu. Mnohé technologie a materiály pro něj teprve vznikají a stejně jako na ITER se na jeho vývoji podílejí i čeští odborníci. Mohl by fungovat kolem roku 2070. A za dalších dvacet třicet let se možná dočkáme (či spíše naši potomci) první generace plnohodnotných fúzních elektráren. Jistě, jde o běh na dlouhou trať, ale chceme-li jako technická civilizace přežít, musíme ho absolvovat. Naštěstí jsme už dávno vzběhli a zdoláváme kilometr za kilometrem...

Poměr wolframu a oceli by se dal měnit i plynule.

tokamak. Bude ho tedy třeba napojit na hlavní konstrukční materiál – ocel, případně na měď sloužící k odvodu tepla do chladicího systému.

Ale zatímco wolfram při vysokých teplotách příliš objem nemění, ocel a měď mají teplotní roztažnost velkou, takže hrozí, že spoj nevydrží. „Místo ostrého rozhraní je proto vhodnější vytvořit plynulý přechod. K tomu slouží funkčně gradované materiály, které snižují koncentraci napětí,“ vysvětluje Jiří Matějček. Wolfram by se zkrátka postupně mísil s ocelí – ve vrstvě silné asi jeden milimetr by jednoho z materiálů postupně ubývalo ve prospěch druhého.

Pro tvorbu gradientu mezi wolframem a ocelí (případně mědí) se hodí metoda, jejíž název napovídá, že k ní mají v Ústavu fyziky plazmatu blízko: plazmové stříkání.

Základem aparatury je plazmový hořák. Je mnohem teplejší než běžný plamen, teplota u jeho ústí se pohybuje v desítkách tisíc stupňů. U některých typů se může jako médium pro tvorbu plazmatu použít například argon, vodík nebo dusík, v tomto případě posloužila voda. Hořák má podobu válcovité komory, do níž se voda přivádí tangenciálně po vnitřním povrchu. Na obou koncích jsou elektrody, mezi nimiž se zažehne elektrický oblouk. Ten vodu na povrchu ohřívá, odpařené molekuly disociují, atomy se ionizují a vzniká plazma tvořené ionty vodíku a kyslíku. Ohřátím se zvětšuje objem a tlak žene plazma z trysky ven. Zbývající voda komoru obtéká a udržuje plazma uprostřed, takže se komora neroztaví.

Do tryskajícího plazmatu se tenkou trubičkou fouká příslušný materiál

v podobě prášku. Velikost zrn se pohybuje v desítkách mikrometrů – představte si například hrubou mouku. „Velikost se přizpůsobuje použitému materiálu, jeho bodu tání, tepelné kapacitě a dalším parametrům,“ vysvětluje Jiří Matějček. Prášek se v plazmatu taví a ve formě kapiček dopadá na zvolený podklad. „Je tam řada parametrů, které lze měnit, proto hodně času věnujeme hledání vhodné kombinace, abychom docílili lepších výsledků.“

Prášek lze například vstříkovat v různé vzdálenosti od ústí hořáku. Čím dále, tím je teplota plazmatu nižší, takže tímto způsobem lze ovlivňovat míru natavení. Wolfram se vstříkuje blíže trysce než ocel. Je potřeba najít takovou vzdálenost, v níž se prášek ještě roztaví, ale už se moc neodpařuje. Podobně se pracuje se vzdáleností, na kterou kapička roztaveného materiálu letí, než dopadne na povrch. Ladí se i výkon hořáku nebo jeho rychlost, s jakou přejíždí nad podkladem.

V dosavadních experimentech fyzikové měnili poměr wolframu a oceli skokově, takže vznikl materiál, v němž podíl wolframu činil postupně 25, 50 a 75 %. „To nám prozatím stačilo, abychom získali přehled, jak se vlastnosti materiálu mění od jednoho složení k druhému. Ale s upravenou aparaturou by se dal měnit i plynule nebo po každém přejezdu,“ říká Jiří Matějček.

Plazmové stříkání v normální atmosféře ale vede k tomu, že wolfram oxiduje a zhoršuje tak vlastnosti výsledného materiálu. Řešení pomohl najít kolega z ústavu, materiálový chemik Vlastimil Brožek. Vznikla speciální komora, která umožnila nástřik v ochranné atmosféře z argonu a vodíku. Tento postup je ale vykoupěn nižší rychlostí nanášení a většími nároky na přesné nastavení všech parametrů.

PLAZMA

V EXPERIMENTÁLNÍM

TOKAMAKU COMPASS

Povrch, na který kapičky dopadají, je dobré zdrsnit kvůli lepšímu mechanickému zakotvení. Třeba otryskáním pískem. Ale lze na to jít i sofistikovaněji, vysvětluje Jiří Matějček: „Ve spolupráci se Západočeskou univerzitou, kde se hodně věnují laserovému zpracování materiálů, jsme vyzkoušeli úpravu povrchu laserovou ablací, která přináší podstatně lepší výsledky.“

Zatím není jasné, který směr gradace se při výrobě materiálu pro první stěnu tokamaku využije. Technologicky nejspokladnější by bylo postupovat od oceli k wolframu. Odpadla by nutnost napojit poslední, na wolfram nejbohatší vrstvu na čistý wolfram. Ale wolframová vrstva vyrobená plazmovým nástřikem má přece jen horší tepelnou vodivost než kompaktní wolfram, protože ji omezují mikroskopické póry mezi kapičkami. Tuto nevýhodu se fyzikové z Ústavu fyziky plazmatu snaží postupným vylepšováním co nejvíce omezit. „V nedávné době jsme ale zkoušeli i druhou variantu. Plazmový nástřik by začal na wolframové dlaždici z nejlepšího dostupného wolframu a přecházelo by se k oceli. Spojení s čistou ocelí by se pak dalo provést standardními technikami za nižších teplot, než jaké vyžaduje spojování wolframu,“ říká Jiří Matějček.

S kolegy zkoušejí i jiné metody pro přípravu kompozitů a gradovaných vrstev. Ve spolupráci s Fakultou strojní ČVUT například experimentují s kombinacemi wolfram-měď a wolfram-nikl spojovanými takzvaným plazmovým navařováním (plasma transferred arc). Tato metoda umožňuje nanášet vrstvy podobně jako plazmové stříkání, ale na rozdíl od něj umí vytvořit kompaktní vrstvu bez pórů a mikroskopických rozhraní. I takto připravené materiály by mohly najít využití ve fúzních reaktorech budoucnosti. ■

