

Slitina jako řada dominových kostek

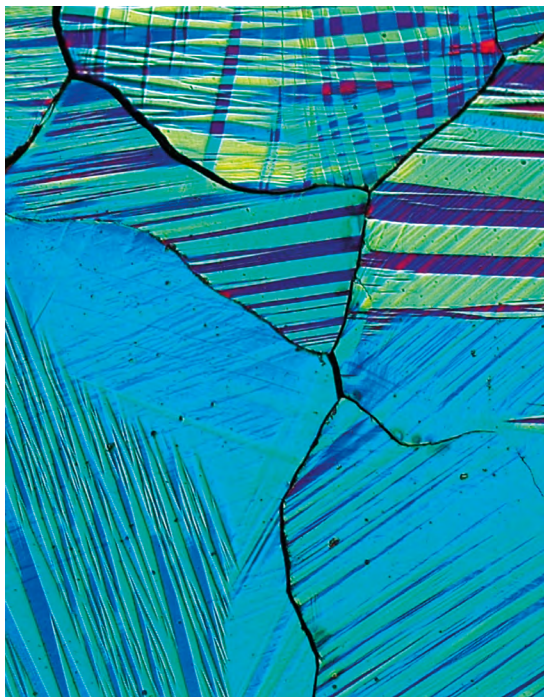
Experimenty kombinující laserové paprsky s ultrazvukem pomohly pochopit jev suprapohyblivosti

Jana Žďárská

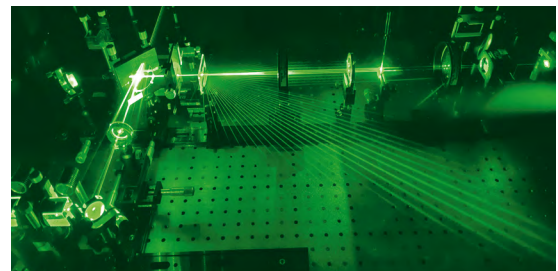
Fyzikální ústav AV ČR, Na Slovance 2, 182 00 Praha 8; zdarskaj@fzu.cz

Mezinárodní tým Hanuš Seiner z Ústavu termomechaniky AV ČR zjistil, že v některých směrech je slitina niklu, manganu a galia schopna přenášet elastické vlny rychleji než ocel, v jiných směrech se však pulzy šíří pomaleji než ve vzduchu. Tato vlastnost poukazuje na neobvyklou strukturu slitiny na atomární úrovni, díky níž vzniká také unikátní a technologicky významný jev suprapohyblivosti. Výslednou studii otiskl prestižní časopis *Advanced Materials*.

Ústav termomechaniky se zabývá studiem vlastností kapalin a pevných látek, především jejich mechanikou a interakcí s okolím a procesy, které v nich probíhají při tepelném nebo mechanickém zatěžování. Vědečtí pracovníci se zde zabývají i studiem komplexní dynamiky mechanických systémů a studují též elektromechanické přeměny energie a jejich řízení pomocí výkonných elektronických zařízení. Dalším z důležitých úkolů je vývoj aplikací termického plazmatu.



Obr. 1 Orientovatelná mikrostruktura slitiny Ni-Mn-Ga, snímek optickou mikroskopií s polarizačním kontrastem. Foto: Oleg Heczko, FzÚ AV ČR



Obr. 2 Aparatura spektroskopie s ultrapřechodovou mřížkou při měření. Foto: David Mareš, ÚT AV ČR

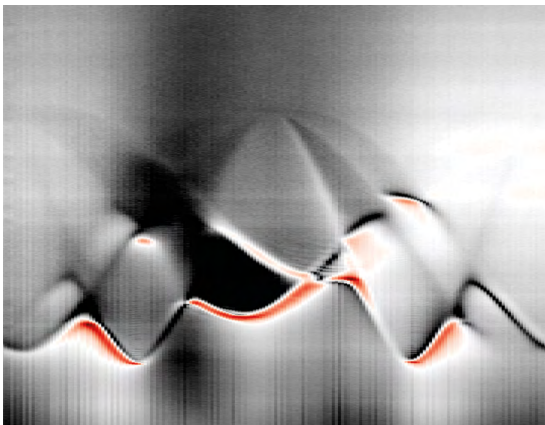
Hanuš Seiner z Oddělení ultrazvukových metod se zaměřuje především na výzkum mechanických vlastností pokročilých kovových materiálů pomocí vhodného propojení laserové optiky a fyzikální akustiky. „Mechanické vlastnosti jsou obecně velmi široký pojem – může to být třeba odolnost proti lomu, proti ztrátě pevnosti při vysokých teplotách nebo proti otěru. To jsou technologické vlastnosti, které do základního fyzikálního výzkumu moc nepatří,“ vysvětluje Hanuš Seiner. „My se zabýváme především elastickým chováním materiálů, tedy vratnou deformací krystalové mřížky pod vnější mechanickou nebo magnetickou silou. A to je naopak výsostně fyzikální vlastnost, která nám hodně říká o tuhosti, směrovosti a stabilitě vazeb mezi jednotlivými atomy. Pokročilé slitiny jsou navíc často mikrostrukturované, takže mají v sobě jemné struktury různých krystalických fází nebo defektů. V takovém případě měření elastické odezvy vypovídá hodně o tom, jak jsou jednotlivé prvky mikrostruktury na sebe navázány, případně zda se mikrostruktura pod vnější silou nějak mění, například přeuspořádává.“

Nově vyvinuté originální metodiky týmu Hanuš Seiner umožňují změřit všechny parametry elastického chování zkoumané látky, aniž by se jí bylo třeba

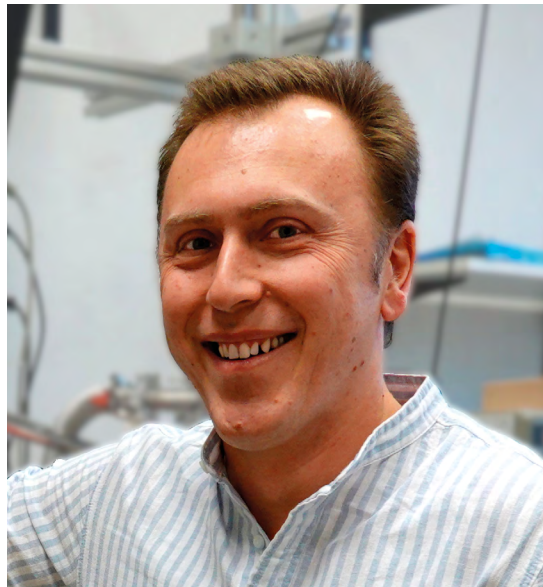
mechanicky dotknout. Elastické vlny jsou vyvolávány i detekovány pomocí laserových paprsků. Výsledky přinášejí zásadní nové poznatky o mechanických vlastnostech různých materiálů a najdou uplatnění ve fyzice a v materiálovém inženýrství. „Stabilita krystalové mřížky a její změny například s teplotou jsou naprosto klíčovou informací při vývoji nových slitin. Slitiny se klasicky připravují kombinací žíhání za vysokých teplot a zakalení do studených lázní, často v několika krocích za sebou. Během takového tepelného zpracování se mění charakter krystalové mřížky nebo mikrostruktur, ale to nelze přímo sledovat optickou nebo elektronovou mikroskopií či rentgenovým zářením – tedy v některých případech by to šlo, ale bylo by to extrémně technicky náročné a drahé. Potřebnou informaci o procesech, které ve slitinách proběhnou, získáváme právě měřením změn elastických vlastností,“ připomíná Hanuš Seiner.

V současné době se týmu českých fyziků z Ústavu termomechaniky a Fyzikálního ústavu AV ČR ve spolupráci s Lappeenrantskou technickou univerzitou ve Finsku podařilo do detailu rozklíčovat elastické chování slitiny Ni-Mn-Ga. Aby toho dosáhli, museli zdokonalit metodu spektroskopie s přechodovou mřížkou, která umožňuje zaznamenávat mechanickou odezvu povrchů krystalů. Metoda využívá dvojici laserových paprsků, které se na povrchu krystalu protnou a na čas kratší než jednu nanosekundu tam vytvoří interferenční obrazec sloužící jako zdroj ultrazvukových vln. „Na světě je jen několik laboratoří, jež s touto technologií umějí pracovat. My jsme věnovali téměř deset let jejímu dalšímu vývoji a zdokonalením. Vznikla tak varianta spektroskopie s ultrapřechodovou mřížkou, schopná analyzovat i ty nejkratší mechanické děje, které v materiálu laserový interferenční obrazec vyvolá,“ vysvětluje Hanuš Seiner.

Ni-Mn-Ga patří do rodiny slitin s tvarovou pamětí, tedy kovových materiálů, jejichž tvar lze řízeně měnit změnou vnějších podmínek. S laserově-ultrazvukovou charakterizací takových slitin má tým Hanuše Seinerova dlouholeté zkušenosti. Věnoval se intenzivně i té nejznámější z nich – slitině *nitinol* tvořené niklem a titanem –, která dnes nachází uplatnění v ortodonci, v obroučkách brýlí, ve výztuhách podprsenek, nebo třeba v hydraulických systémech nadzvukových stíhaček. „Nitinol je znám už od šedesátých let minulého století a pro řadu těchto aplikací se používá už několik desetiletí,“ vysvětluje Hanuš Seiner, „ale to neznamená,



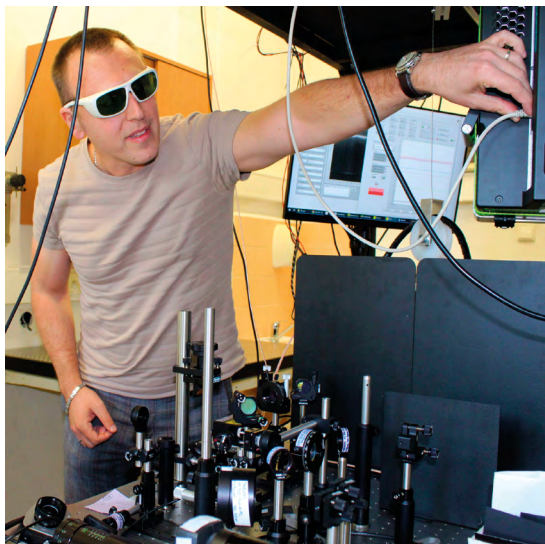
Obr. 3 Mapa akustického chování povrchu krystalu slitiny Ni-Mn-Ga, měření spektroskopii s ultrapřechodovou mřížkou. Experiment: Pavla Stoklasová, ÚT AV ČR



Prof. Ing. Hanuš Seiner, Ph.D., DSc., narozen v roce 1981, absolvoval Fakultu jadernou a fyzikálně inženýrskou ČVUT v Praze, kde studium dokončil obhajobou doktorátu v roce 2008. V roce 2021 získal titul doktor věd (DSc.) v oboru Teoretická a aplikovaná mechanika a v roce 2022 byl jmenován profesorem v oboru Materiálové a fyzikální inženýrství. Od roku 2003 pracuje na Ústavu termomechaniky Akademie věd ČR, kde je v současnosti vedoucím Oddělení ultrazvukových metod a Sekce mechaniky pevných látek. V roce 2016 obdržel Prémii Otto Wichterleho pro mladé vědce a v roce 2017 prestižní Fulbrightovo stipendium, které mu umožnilo strávit roční stáž na University of Minnesota v USA. V roce 2024 získal Cenu předsedy Grantové agentury ČR za nejlepší projekt základního výzkumu v oblasti technických věd. Zabývá se především laserově-ultrazvukovou charakterizací nově vyvíjených slitin a mechanikou mikrostruktur v kovech. Tým pod jeho vedením vyvíjí a provozuje světově unikátní aparatury bezkontaktní rezonanční ultrazvukové spektroskopie a spektroskopie s přechodovou mřížkou. Je autorem více než 100 časopiseckých publikací a byl a je řešitelem řady domácích i bilaterálních grantů. Kromě výzkumné činnosti také přednáší a vede studenty na Fakultě jaderné a fyzikálně inženýrské ČVUT v Praze.

ná, že by na chování nitinolu nebylo stále co objevovat a zkoumat. My jsme se slitinou NiTi zabývali dlouhodobě z několika různých hledisek. Především se nám podařilo pochopit a teoreticky vysvětlit, jak se tato slitina chová při tváření, tedy třeba pokud ji chceme připravit ve formě tenkého plechu nebo drátu. Je to úplně nový mechanismus a rozklíčovat ho vyžadovalo kombinovat rozsáhlé experimentální pozorování pomocí elektronové mikroskopie (to dělali kolegové na Fyzikálním ústavu) s teoretickou mechanikou a matematickou teorií mikrostruktur.

Oproti nitinolu má slitina Ni-Mn-Ga velkou výhodu v tom, že u ní lze změny tvaru řídit nejen změnou teploty, ale také magnetickým polem. Efektu tvarové paměti tak lze dosáhnout velice rychle a opakovatelně, protože k aktivní součástce není potřeba přivádět a od ní odvádět teplo, stačí v její blízkosti zapnout elektromagnet. Navíc je takové řízení změny tvaru bezkontaktní. Například čip obsahující mikropumpu z této slitiny by mohl být voperován pacientovi pod kůží. Potom by stačilo přejet nad daným místem slabým magnetem a mikropumpa by vstříkla do těla přesně danou dávku léku. Další možné uplatnění může slitina najít v různých

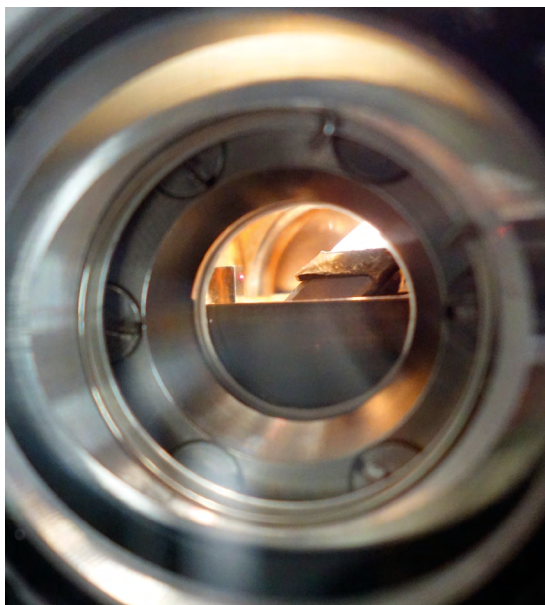


Obr. 4 Hanuš Seiner při práci na aparatuře spektroskopie s ultrapřechodovou mřížkou. Foto: Veronika Svašková, ÚTAV ČR

ných senzorech, aktuátorech nebo tlumičích mechanických nárazů.

Reakce tvarů krystalů Ni-Mn-Ga na magnetická pole byla poprvé popsána na přelomu tisíciletí skupinami z Helsinské technické univerzity ve Finsku a Massachusettského technologického institutu v USA. Umožňuje ji neobvyklý deformační mechanismus na úrovni atomů, který je již řadu let středem zájmů předních světových vědeckých týmů zabývajících se slitinami s tvarovou pamětí. Jedná se o takzvanou suprapohyblivost neboli vysokou pohyblivost deformací v krystalové mřížce. Díky ní dokáže okem viditelnou změnu tvaru krystalu Ni-Mn-Ga způsobit i velmi slabá mechanická síla nebo malá změna magnetického pole.

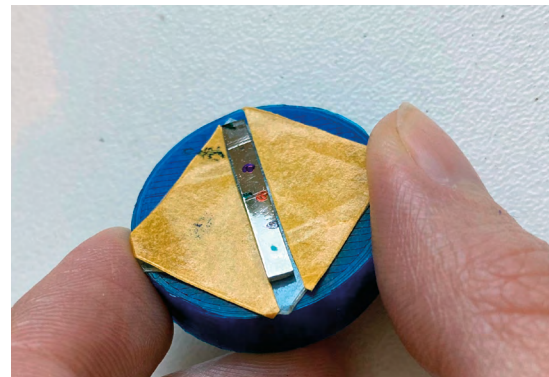
„Suprapohyblivost si můžeme představit třeba pomocí řady dominových kostek. Ty nejprve stojí a potom spadnou na jednu nebo na druhou stranu, podle toho, do které z krajních kostek štouchneme. Poslední spadlou kostku se můžeme pokusit znovu zvednout a překlopit na druhou stranu – a tím vyvolat postupné překlopení



Obr. 5 Vzorek slitiny Ni-Mn-Ga při měření v teplotní komoře. Na povrchu vzorku je vidět červený bod měřícího laseru. Foto: Jan Zidek, ÚTAV ČR

všech kostek. To nám dá ale docela dost práce, protože musíme překonat tíhu kostek ležících přes sebe a odpor kostek proti klouzání po sobě. Ve feroelastických slitinách má mikrostruktura vlastně charakter atomárních desek překlopených na jednu nebo na druhou stranu, čemuž odpovídá protažení krystalu jedním nebo druhým směrem. Ni-Mn-Ga je unikátní tím, že v ní lze překlopení dosáhnout velice snadno, jako kdybychom poslední spadlou kostku domina dokázali překlopit silou stejně malou nebo ještě menší, než která byla potřeba k povalení řady kostek. Naše laserově-ultrazvukové experimenty ukázaly, že je to díky tomu, že jednotlivé atomární vrstvy, tedy myšlené kostky domina, po sobě kloužou až stokrát snadněji, než je tomu u běžných slitin. Deformace, jíž by třeba známá slitina Nitinol dosáhla pod stokilovým závažím, lze proto v Ni-Mn-Ga dosáhnout silou, kterou člověk vyvine mezi palcem a ukazováčkem,“ vysvětluje vlastnosti slitiny Ni-Mn-Ga Hanuš Seiner.

Velmi poddajné vazby mezi jinak poměrně tuhými atomárními vrstvami v krystalové mřížce Ni-Mn-Ga



Obr. 6 Krystal slitiny Ni-Mn-Ga s viditelnými zlomy v bodech suprapohyblivých rozhraní. Foto: Kristýna Repčková, ÚTAV ČR

mají za následek to, že pod silami působícími určitým směrem se mřížka deformuje velice snadno, zatímco vůči jinak orientovaným silám klade silný odpor. To je takzvaná anizotropie elastického chování, která je výrazná například v grafitu nebo v některých biomateriálech. Ve slitinách kovů však takto silná anizotropie doposud pozorována nebyla a právě ona odlišuje Ni-Mn-Ga od ostatních slitin s tvarovou pamětí – proto může v této slitině nastávat jev suprapohyblivosti. „O slitině Ni-Mn-Ga se už přibližně od přelomu tisíciletí ví, že vykazuje unikátní vlastnosti. Ani bych nepoužil slovo ‚skvělé‘, protože to by naznačovalo, že slitina byla vyvíjena pro nějakou konkrétní aplikaci a pro ni se výborně osvědčila. Stejně jako objev supravodivosti nebyl motivován snahou vyvinout co nejlepší vodič, ale byl to výsledek výzkumu základních vlastností kovů za nízkých teplot, tady byla suprapohyblivost objevena při základním výzkumu chování slitin s tvarovou pamětí v magnetických nebo mechanických polích. Dnes, když už jev suprapohyblivosti známe a dokážeme ho na základě laserově-ultrazvukové charakterizace vysvětlit, jsme zase o krok blíže tomu, aby se takto unikátní materiál jednou objevil ve skutečných technologických aplikacích,“ dodává Hanuš Seiner.

Za redakci Československého časopisu pro fyziku přejeme týmu Hanuše Seineru mnoho dalších zajímavých vědeckých výsledků s tolik důležitým přesahem pro celou společnost.