

Tření pod kontrolou atomů: Antonio Cammarata o kvantové fyzice, robotice a budoucnosti materiálového inženýrství

4.8.2026 - | Fakulta elektrotechnická ČVUT v Praze

Každý den dochází k obrovským energetickým ztrátám, aniž bychom si je běžně uvědomovali. Nejde přitom o důsledky dramatických poruch nebo technologických selhání, ale o zcela běžný fyzikální jev - tření.

V motorech, průmyslových strojích, elektronických zařízeních i výrobních systémech spolu povrchy neustále přicházejí do kontaktu. Při těchto interakcích se část užitečné energie nevyhnutelně přeměňuje na teplo a dochází také k postupnému opotřebení materiálů. Odhaduje se, že téměř třetina celosvětově spotřebované energie souvisí se ztrátami způsobenými třením a degradací materiálů. Omezení těchto ztrát by proto mohlo výrazně přispět ke zvýšení energetické účinnosti, udržitelnosti i prodloužení životnosti celé řady technologií.

Pro Antonio Cammaratu, docenta Fakulty elektrotechnické ČVUT v Praze a výzkumníka zapojeného v projektu ROBOPROX, však tření nepředstavuje pouze problém materiálového inženýrství. Je to především otázka pochopení toho, jak se hmota chová v různých měřítcích, od kvantových interakcí mezi jednotlivými atomy až po reálné mechanické systémy. „Fascinuje mě, jak pohyby atomů a vlastnosti elektronové struktury určují chování materiálů, které běžně používáme,“ vysvětluje.

V rámci výzkumné oblasti RA5 projektu ROBOPROX, která se zaměřuje na automatizaci nanoskopického povrchového inženýrství pod vedením profesora Tomáše Polcara, se Antonio pohybuje na pomezí kvantové fyziky, materiálového výzkumu, automatizace a umělé inteligence. Cílem jeho týmu je pochopit mechanismy tření, dokázat je předpovídat a v budoucnu je také cíleně ovládat, od atomární úrovně až po praktické technické aplikace. Vědci usilují o vytvoření jednotného přístupu, který umožní navrhovat materiály a jejich vlastnosti na základě základních fyzikálních principů, nikoli pouze metodou postupného testování a hledání vhodného řešení.

Fyzik, který našel svůj směr ve výzkumu povrchů

Antoniová vědecká cesta začala ve fyzice, nikoli však přímo v oblasti tribologie, vědy zabývající se třením, opotřebením a interakcemi mezi povrchy. Po dokončení doktorského studia fyziky na Univerzitě v Palermu (*Università degli Studi di Palermo*) působil jako postdoktorand na Drexelově univerzitě, kde se věnoval výzkumu perovskitů s uspořádáním náboje, hybridní nevlastní feroelektriny a nelineárních optických materiálů. Šlo o systémy, jejichž vlastnosti jsou výrazně ovlivněny elektronovou strukturou, tedy uspořádáním a chováním elektronů uvnitř materiálu. V roce 2014 se připojil ke skupině Advanced Materials Group na ČVUT a jeho výzkumný zájem se postupně přesunul k atomistickému modelování tření, disipace energie a dvourozměrných materiálů.

Tento posun vycházel z hlubší vědecké otázky: Jak se jednotlivé interakce mezi atomy skládají dohromady a vytvářejí vlastnosti materiálů pozorovatelné v makroskopickém světě, například mechanický odpor, opotřebením nebo energetické ztráty? „Můj zájem vyšel z fascinace tím, jak propojené pohyby na atomární úrovni a elektronické vlastnosti určují chování materiálů v makroskopickém měřítku,“ říká.

Dnes se jeho výzkum soustředí na zdánlivě jednoduchou, ale zásadní otázku: Jak nejmenší stavební

prvky hmoty určují vlastnosti technologií, které každý den používáme?

V samotném srdci problematiky tření stojí složitá souhra atomárních pohybů, elektronové struktury a mechanismů rozptylu energie, kterým dosud vědci zcela nerozumějí. Klíčová přitom není pouze schopnost předpovědět chování existujících materiálů, ale také možnost jejich cíleného návrhu. Výpočetní modely dnes neslouží pouze k vysvětlení vlastností již známých materiálů – umožňují také navrhovat nové materiály s vlastnostmi vytvořenými „na míru“. Může jít například o povrchy s extrémně nízkým třením nebo o materiály využitelné v energetice, například ve fotovoltaických technologiích, systémech pro výrobu vodíku či zařízeních pro ukládání energie.

Rovnice, kterou zatím nikdo nenapsal

Jedním z nejambicióznějších cílů moderní tribologie je překonat přístup založený na metodě pokus-omyl a dokázat předpovědět chování materiálu ještě předtím, než vůbec vznikne. Pro Antonia představuje tento cíl jednu z největších vědeckých výzev současné oblasti: „Největší výzvou je odvodit vztah pro koeficient tření přímo z kvantověmechanické teorie. To by umožnilo předpovídat třecí vlastnosti materiálu bez nutnosti provádět experimentální a výpočetní testování metodou pokusů a omylů.“

Takový průlom by zásadně změnil způsob, jakým se vyvíjejí povlaky, maziva a funkční materiály. Namísto rozsáhlého experimentálního testování by bylo možné využívat fyzikálně založená pravidla návrhu, která by už v počáteční fázi dokázala vytipovat nejperspektivnější kandidáty. Základem tohoto přístupu jsou teoretické modely propojující tření s atomárními vibracemi a elektronovým chováním materiálů. „Tření není pouze otázkou mechanické drsnosti povrchu,“ vysvětluje Antonio. „Lze ho ovlivňovat prostřednictvím základních atomárních pohybů a elektronické odezvy materiálu.“ Tento pohled mění tradiční představy o tření a otevírá nové možnosti pro návrh povrchů s přesně řízenými vlastnostmi, například nízkým třením nebo vyšší odolností proti opotřebení.

Ambiciózní cíle však narážejí na významnou praktickou překážku. Antonio ji otevřeně pojmenovává: „Největším problémem je měřítko, tedy propojit přesné kvantověmechanické výpočty na atomární úrovni s časovými a prostorovými měřítky, ve kterých skutečně pracují inženýři. A zároveň to zvládnout způsobem, který bude automatizovatelný a reprodukovatelný.“ Vedle této otázky zůstávají otevřené i další zásadní výzvy, a to získávání zpětné vazby v reálném čase během nanoskopických experimentů, reprodukovatelnost kontaktů na nanometrové úrovni a převod atomistických předpovědí do praktických povlaků a maziv, které obstojí v průmyslovém provozu.

Když roboti převezmou řízení laboratoře

Porozumění tření na nanoskopické úrovni představuje nejen teoretickou, ale také experimentální výzvu. Jedním z klíčových cílů výzkumné oblasti RA5 je proto automatizace nanoskopického tribologického testování. Propojením robotiky, pokročilých senzorických systémů a metod strojového učení tým vytváří experimentální platformy, které dokážou provádět měření s nebývalou rychlostí, přesností, konzistencí a mírou autonomie.

Cílem je vytvořit laboratoře nové generace, v nichž inteligentní systémy pomohou vědcům prozkoumávat obrovské množství možných experimentálních podmínek, odhalovat skryté souvislosti a výrazně urychlovat proces objevování nových materiálů. Tento přístup zároveň odráží širší proměnu současné vědy. Automatizace a umělá inteligence se stále více stávají nezbytnými nástroji pro řešení problémů, které jsou svou složitostí za hranicemi možností tradičních experimentálních metod.

Když pár atomů dokáže změnit vlastnosti materiálu

Další významnou oblastí Antoniova výzkumu je návrh a řízení vlastností dvourozměrných materiálů a van der Waalsových heterostruktur. Od objevu grafenu vědci zjistili, že materiály tvořené pouze několika atomovými vrstvami mohou vykazovat mimořádné vlastnosti. Kombinováním různých atomárních vrstev, jejich mechanickým deformováním, zaváděním příměsí nebo působením elektrických polí lze tyto materiály pozoruhodným způsobem ladit a přizpůsobovat. „Jejich vlastnosti lze upravovat skládáním jednotlivých vrstev, dopováním, mechanickým napětím nebo elektrickými poli. Mohou vykazovat extrémně nízké tření, neobvyklé elektronické vlastnosti i výrazné interakce mezi světlem a hmotou.“

Tyto materiály přitahují velkou pozornost v široké škále oblastí, od elektroniky a senzorových technologií až po energetická zařízení a ochranné povlaky. Možná ještě významnější je však vznik tzv. multifunkčních povrchů: *„Materiály, jako jsou van der Waalsovy heterostrukтуры, grafen nebo deriváty diamantu, ukazují, že jediný povrch může spojovat tribologické, elektronické i chemické funkce.“* Budoucí materiály tak nemusí plnit pouze jednu konkrétní úlohu. Jeden povrch by v budoucnu mohl současně snižovat opotřebení, získávat energii, detekovat plyny, podporovat chemické reakce nebo reagovat se světlem.

Od motoru až po operační sál

Praktické využití těchto poznatků je velmi široké. Povrchy s cíleně navrženými vlastnostmi v oblasti tření a odolnosti proti opotřebení mohou významně ovlivnit automobilový a letecký průmysl, mikroelektromechanické systémy (MEMS), montáž nanokomponent, pevné disky, přesnou výrobu i energetické technologie.

Dopad těchto inovací bychom však pocítili i v běžném životě. Účinnější motory a převodové systémy znamenají nižší spotřebu paliva a elektřiny, tišší provoz zařízení a menší emise. Elektronika s delší životností i odolnější lékařské implantáty znamenají méně odpadu a vyšší spolehlivost. Snižování tření omezuje energetické ztráty, prodlužuje životnost výrobků a snižuje potřebu maziv i náhradních dílů. Výsledkem je nejen menší uhlíková stopa, ale také nižší spotřeba surovin.

Tření však není pouze jevem, který se vědci snaží omezit. Za pečlivě navržených podmínek jej lze také využít k výrobě elektřiny pomocí triboelektrických nanogenerátorů (TENG), tedy zařízení, která přeměňují mechanický pohyb na elektrickou energii. To otevírá zajímavé možnosti pro senzory s vlastním napájením, nositelnou elektroniku a technologie získávání energie, což dokazuje, že tření se může stát nejen zdrojem energetických ztrát, ale také cenným energetickým zdrojem.

Jeden společný rámec, mnoho možností

Tření je ústředním tématem Antoniovy práce v projektu ROBOPROX, jeho ambice však podle něj sahají mnohem dál. Právě v tom spočívá síla celého přístupu. „Metodologie, kterou vyvíjíme, je záměrně obecná,“ vysvětluje. „Stejný kvantověmechanický a mřížkově dynamický rámec, který nám pomáhá navrhovat povrchy s nízkým třením, lze využít také pro vývoj materiálů pro ukládání energie, fotokatalýzu, detekci plynů, povlaky odolné vůči záření nebo nové elektronické materiály.“

„ROBOPROX nám poskytuje platformu nejen k řešení problémů v oblasti tribologie,“ říká Antonio, „ale také k vytváření zcela nových výzkumných směrů založených na společném atomistickém základu.“ Rozsah těchto možností je mimořádně široký, od palivových článků a opticky aktivních materiálů přes senzory pro detekci molekul až po technologie využitelné při hledání temné hmoty.

Taková platforma je výsledkem společného úsilí a Antonio zdůrazňuje, že nejde o práci jednotlivce. Výzkumná oblast RA5 je interdisciplinární již ze své podstaty a propojuje kvantové modelování, automatizaci, robotiku a materiálové vědy v jednom společném projektu. Antonio zároveň připomíná zásadní roli svých kolegů z Advanced Materials Group i celého konsorcia ROBOPROX.

Budoucnost začíná u atomů

Při pohledu deset let do budoucnosti Antonio doufá, že výpočetní návrh materiálů s nízkým třením, vysokou odolností a více funkcemi se stane běžnou součástí vývoje nových technologií. Spojení metod založených na prvních principech, automatizace, robotiky a umělé inteligence by mohlo vědcům umožnit navrhovat, testovat a optimalizovat materiály rychleji než kdykoli předtím. Dopad takového přístupu by se projevil v celé řadě oblastí, od dopravy a průmyslové výroby přes energetické systémy až po další odvětví, která usilují o vyšší účinnost a udržitelnost.

Pro výzkumníky zapojené do projektu ROBOPROX začíná tato budoucnost na úrovni jednotlivých atomů. Její dopad však může být patrný prakticky všude kolem nás. V tomto pohledu přestává být tření pouze ztrátovým jevem, který se snažíme minimalizovat. Stává se fyzikálním procesem, který lze pochopit, řídit a cíleně navrhovat.

[Článek byl převzat z webu Roboprox.eu.](#)

Doc. Antonio Cammarata

Antonio Cammarata je docentem na Katedře řídicí techniky Fakulty elektrotechnické ČVUT v Praze a výzkumným pracovníkem projektu ROBOPROX RA5: Automatizace nanoskopického povrchového inženýrství. Ve svém výzkumu se zaměřuje na kvantověmechanické modelování materiálů, nanotribologii, pokročilé uhlíkové materiály, povrchové inženýrství a materiály využitelné v energetice.

Jeho práce propojuje základní fyziku s praktickým návrhem nových materiálů a zkoumá, jak procesy probíhající na atomární úrovni ovlivňují tření, disipaci energie, elektronické vlastnosti i celkovou výkonnost materiálů. V rámci projektu ROBOPROX se podílí na vývoji automatizované nanotribologie, návrhu materiálů založeném na prvních principech a výzkumu pokročilých dvourozměrných materiálů. Přispívá tak k vývoji nové generace udržitelných a inteligentních technologií.

<https://fel.cvut.cz/cs/aktualne/novinky/84867-treni-pod-kontrolou-atomu-antonio-cammarata-o-kvanto-ve-fyzice-robotice-a-budoucnosti-materialoveho-inzenyrstvi>