

Fizyka kontra zmarszczki



Jeśliby jasnowidz chciał dać w prezencie koleżance po fachu kryształową kulę, musiałby ją zapakować. Użycie do tego arkusza papieru wiąże się z łatwym do wyobrażenia sobie problemem – papier się pogniecie, powstaną na nim zmarszczki i fałdki, a całość może nie prezentować się dostatecznie elegancko. Problem ten jest w miarę oczywisty dla matematyka, który może orzec, że geometrie powierzchni kuli oraz arkusza papieru są różne, a nawet dodać, że powodem jest różna krzywizna tych powierzchni, sprawiająca, że nie można nałożyć jednej na drugą bez ściskania i rozciągania.

Okazuje się, że opisane wyżej zagadnienie stanowi nie lada wyzwanie dla fizyków. Oni są bowiem zainteresowani nie tylko tym, że nie da się gładko zapakować kuli w arkusz papieru, ale również chcieliby znać odpowiedź na pytanie, jak się ten papier pomarszczy. Podobne wyzwanie pojawia się również w przypadku odwrotnym, gdy chcemy „spłaszczyć” fragment dwuwymiarowej, zakrzywionej powierzchni.

Przewidywanie, jak marszczą się skończone powłoki, jest złożonym zadaniem z mechaniki nieliniowej. Podstawowa trudność wynika z tego, że w zadaniu tym nie występują siły rozciągające powłokę, co uniemożliwia stosowanie metod matematycznych zwykle stosowanych w mechanice ośrodków ciągłych. Do niedawna zrozumienie dynamiki marszczenia materiałów wymagało założenia lub zgadnięcia jakiegoś układu zmarszczek, który następnie można byłoby ulepszać i udokładniać.

Okazuje się jednak, że można sformułować rozsądny opis powstawania zmarszczek, łącząc elementy teorii i doświadczenia. Pierwszy krok w tym kierunku zrobił Ian Tobasco, matematyk z Uniwersytetu Illinois w Chicago, który zaproponował teorię opartą na bilansie energii związanej ze zjawiskiem marszczenia materiału. Nie było jednak oczywiste, czy ta teoria jest poprawna i dokładna.

Dlatego konieczne okazało się połączenie teorii z symulacjami komputerowymi i wykonanie serii eksperymentów, co, rzecz jasna, wymagało zaangażowania większej liczby naukowców. Badacze umieścili cienkie, płaskie kawałki plastiku na zakrzywionej szklanej powierzchni, tak aby plastik przybrał kształt zakrzywionego szkła. Następnie umieścili zakrzywione kawałki plastiku na mokrej powierzchni i obserwowali, jak napięcie powierzchniowe wody powoduje marszczenie plastiku. Dane z części doświadczalnej zostały wykorzystane do określenia parametrów symulacji komputerowych. Pozwoliło to na określenie reguł opisujących, jak pojawiają się i zachowują zmarszczki.

Okazało się, że zmarszczki tworzą się w rzędach na całej powierzchni próbki, a nie tylko na brzegach, mimo że materiał na brzegach podlega największemu odkształceniu. Układy tych zmarszczek, a w szczególności występowanie domen z regularnymi zmarszczkami, zależały od tzw. szkieletu topologicznego próbki, czyli środków okręgów stykających się z brzegiem próbki w dwóch lub więcej punktach. Jakkolwiek głębokość zmarszczek zależy od początkowej krzywizny spłaszczanej próbki, ich układ wewnątrz pojedynczej domeny jest określony przez znak tej krzywizny (powierzchnia siodła ma krzywiznę ujemną, powierzchnia kuli – dodatnią). Co więcej, układy zmarszczek odpowiadające przeciwnym znakom krzywizny są ze sobą związane, tzn. znając jeden z nich, można przewidzieć ten drugi.

Tworzenie się zmarszczek na różnego rodzaju materiałach, zwłaszcza na tekstyliach, towarzyszy nam na co dzień. Każdy, kto choć raz nadawał schludny wygląd koszulom lub sukienkom za pomocą żelazka, może sobie łatwo wyobrazić wyniki eksperymentów opisanych wyżej. Któż mógłby się jednak spodziewać, że z pozoru mało ekscytująca czynność, jaką jest prasowanie, wiąże się tak ściśle z najnowszymi odkryciami w fizyce?

I. Tobasco, Y. Timounay, D. Todorova, et al. *Exact solutions for the wrinkle patterns of confined elastic shells*. “Nature Physics” (2022).