

Tensegrity ve vědě, technice a umění

Vladimír Vondrejs

Úvod

Slovo tensegrity bylo zavedeno R. Buckminsterem Fullerem. Vzniklo spojením zkratk **tensional integrity**. Tensegrity popisují strukturní princip, kde tvar a struktura jsou garantovány uzavřenou sítí napětí (sítí kabelů) a tlaků (např. pevnými tyčemi), které tvoří místní ostrůvky.

Tensegrity mohou vytvořit viditelně diferencované tahově-tlakové vzájemné působení, podobné jako pneumatické struktury (např. jako fotbalový míč nebo automobilové pneumatiky).

Fullerovy první výzkumy v oblasti synergické geometrie byly důležité pro pochopení a využití tensegritů, které se nazývají geodesické dómy (obr.1). Sochař Kenneth Snelson ukázal, že tlakové prvky mohou nabídnout zpevnění, i když jsou separovány, nedotýkají se navzájem a jsou drženy v pozicích jen tahem kabelů .

Prof. Donald Ingber byl první, kdo navrhl, že tensegrity jsou základem architektury živých bytostí a hrají roli v nitro- a mezibuněčné komunikaci zvané mechanotransdukce.

Klíčové slovo **tensegrity** v ISI Web of Science v posledních letech obsahuje více než 100 citací oproti 34 v minulém desetiletí a zdá se tudíž, že idea tensegritů jde nahoru, i když je třeba říci, že má i odpůrce.

R. Buckminster Fuller: Geodesický dóm

Je k nevíře, že známý architekt, inženýr, matematik, objevitel, básník a kosmolog R.B.Fuller byl roku 1927 odhodlán skočit do mrazivých vln Michiganského jezera, když jeho dítě zemřelo, on sám zbankrotoval a byl zdiskreditován a ztratil zaměstnání. Naštěstí se na poslední chvíli rozhodl nespáchat sebevraždu. Dalších 54 let se úspěšně pokoušel dokázat, že jeho ideje mohou pomoci lidské společnosti.

Již v roce 1959, Newsweek zveřejnil jeho předpověď, že chudoba může být odstraněna do konce tisíciletí. Skoro o 20 let později National Academy of Sciences potvrdila jeho předpověď. Fullerovi bylo uznáno 25 US patentů, napsal 28 knih, 57krát objel zeměkouli a oslovil miliony svými veřejnými přednáškami a kursy. Ovlivnil architekturu, urbanistiku, „design“, matematiku, fyziku, průmysl, technologii, filozofii, náboženství, mineralogii, umění a literaturu. Proslavil se rozvojem synergetiky a vynálezem geodesického dómu. S.E.Morison

řekl o jeho knize „Synergetics-Exploitation in the Geometry of Thinking“ (Coliner Books Macmillan Publishing Company): „Synergetika je Fullerova nejdůležitější a nejčtenější kniha. Předpovídám, že se stane jednou z klasických základů vědy podobně jako Darwinova kniha O původu druhů“. A.C.Clark zobecnil tyto myšlenky, když řekl: „Tato kniha je jeho bible, destilovaná moudrost života stráveného kontemplací o vesmíru z úhlů a směrů, které dříve nebyly uvažovány. Bude to zdroj nekončících inspirací a podnětů těm, kteří jsou zaslíbeni urgentnímu cíli naší doby – snaze zachránit Zemi před pohromou“.

Základní koncepce architektury má kořeny v egyptských, řeckých a římských idejích, ve kterých se bojuje proti tlakům gravitace mohutnými bloky kamenů. Teprve dnes zjišťujeme, že tah může hrát signifikantní roli při udržování celistvosti různých staveb. Brooklyn Bridge (délka 3460 stop), Golden Gate (8981 stop) a Akashi Kaikyo (12828 stop) jsou nejslavnějšími příklady mostů, ve kterých nerezové kabely dohromady s pilíři nesou tělo stavby.

Fullerovy dómy ukazují o krok dál. Je jich přes 300 000 rozeseťo od tropických oblastí až po arktické zóny. Zatímco arktické stanice vydrží větry až 180 mil za hodinu, jiné dómy daly obydlí rodinám v Africe. Stojí pouhých 350 \$ a dnes i méně než 200 \$. Fuller se pravděpodobně nejvíce proslavil dvacetipatrovým dómem pro US pavilon v Montrealu, fytotronem v Luisianě a projektem největšího dómu (průměr 3 km, výška 1,6 km), který by měl pokrýt Manhattan. Tento dóm by mohl zastřešit budovy od East River do Hudsonu u 42. ulice. Vážil by 4000 tun. Letka velkých Sikosky helikopter by umístila všechny segmenty na místa za tři měsíce za 200 milionů €. Cena za vytápění a „aircondition“ by byla dramaticky snížena tímto zastřešením a poplatky za odklizení sněhu za 10 let by podle Fullera zaplatily náklady. Kdo ví, možná že dnes, po zničení „Twins“, může být projekt znovu zajímavý ještě z jiného důvodu. Největší, dosud realizovaný dóm, je Georgia Dome, který je považován za současný div světa, kryje fotbalový stadion o průměru 840 stop. B. Fuller zemřel v červnu 1983 a zanechal mnoho nápadů a následovníků, kteří jsou jeho dílem inspirováni a pokračují jeho směrem.

Geodesické dómy jsou kulovité útvary typu polyedrů s množstvím trojúhelníkových stěn. Když stěn přibývá, jejich úhly mizí a polyedr se blíží kouli. Při vytváření dómu, hrany se obvykle dělají na povrchu sférického ikosaedru. Každá stěna je pravidelně rozdělena na hranách. Body podrozdělení jsou propojeny trojsměrnou sítí velkých kruhových oblastí. Okolo originálních ikosaedrálních vrcholů je vždy 5 trojúhelníků, zatímco okolo bodů dělení je trojúhelníků 6. Velká kružnice na kulovitém povrchu, vznikající protětím povrchu s rovinou procházející středem útvaru se nazývá geodesická. To je slovo, od kterého je

odvozeno označení geodesického dómu. Je třeba poznamenat, že nejkratší spojka mezi dvěma body na povrchu je geodesická čára, která prochází těmito body. Fullerovy dómy jsou stavěny z tyčí. Každá tyč je spojkou dvou bodů na povrchu koule. Krajiní body jsou vzdálenější od středu více než střed tyče. Plastový film je obvykle napnut na kostře z tyčí. Polyethylenové typy filmů vydrží asi 2-5 let na slunci. Závisí to na podnebí v místě, kde je dóm postaven. Další materiály se zkoušejí. Panelové zastřešení je stabilnější, ale těžší. Za účelem zvýšené izolace a odolnosti k tlakům byly vyvinuty dvojité dómy.

Hlavní výhody využití dómů jsou tyto:

- ❖ Dómy uzavírají obrovský objem prostoru s menší potřebou materiálu než ostatní stavby.
- ❖ Dómy jsou stabilní díky geodesické síti.
- ❖ Dómy mají modulární charakter, dají se snadno přestavovat, transportovat a rychle stavět. Pěkná demonstrace této vlastnosti nastala v Honolulu (1957). Dóm byl postaven tak rychle, že 22 hodin po dopravení dílů byl již prostor sálu pohodlně osazen posluchači koncertu.
- ❖ Dóm nabízí možnost pokrýt obrovskou plochu. Více než 6 km² je současný limit daný technologickými možnostmi.
- ❖ Sférická struktura zakrývá největší objem nejmenší plochou. Když se poloměr zvětší 2x, povrch vzroste 4x a objem 8x.
- ❖ Sférický dóm je odolnější k větru než jiné tvary staveb stejné velikosti.
- ❖ Tepelná energie méně uniká z velkých než malých dómů.
- ❖ U dvojvrstevných dómů se s radiální vzdáleností vrstev ještě více snižují tepelné ztráty.
- ❖ Očekává se, že malé otvory na vrcholu a velké u paty dómu mohou vyvolat chlazení díky Bernoilli efektu.
- ❖ Se zvětšujícím se počtem hran se zvyšuje odolnost vůči náporu z různých stran.
- ❖ Dómy mají tendenci symetricky expandovat či kontrahovat, i když se působí jen na dvě sousední tyče konstrukce.
- ❖ Dómy průhledné na sluneční straně a odrážející na straně stínové, zachytí více sluneční energie a mohou sloužit jako energetické pastě.

Všechny tyto vlastnosti dómů jsou důležité pro jejich možné použití. Mohou být využity jako ekonomické ochrany skladovacích prostorů, archeologické a agronomické konstrukce a také jako stany. Mohou sloužit jako struktury chránící agrokultury před šířením (všude, kde je to potřebné, např. nebezpečné, urbanistické a zátopové oblasti). Mohly by být využity jako zastřešení měst kvůli kontrole prostředí a z energetických důvodů. Mohou být

případně použity jako elektromagnetický štít, ochrana proti létajícím živočichům a j. objektům a jako superboxy pro osidlování planet, koncerty, veletržní pavilony, superslunečnický, rámy pro sušení rostlin a j. objektů. Mělo by být zmíněno, že tensegrity, které jsou pneumatické struktury se dobře uplatnily během zemětřesení.

Může být uzavřeno, že Fullerovy dómy mají potenciál ubytovat lidi jednoduchým, laciným, pohotovým a efektivním způsobem, a to je ve shodě s Fullerovou ideou „Více za méně pro všechny“.

V zájmu přesnosti je ovšem třeba zmínit, že Fuller nebyl prvním architektem, který uvažoval o geodesických domech. Mnoho let před ním, v roce 1922 tuto strukturu objevil Walter Bauersfeld z Zeiss Optical Works v Jeně (Německo). Protože Bauersfeld použil tento princip pouze pro stavbu střechy planetaria, zatímco Fuller dostal řadu patentů za dómy, popularizoval technologii dómu a měl celostní pohled na geometrii, výstavbu, význam a použití dómu, obecně je akceptován jako jednička v této oblasti a dómy se nejmenují Bauersfeldovy ale Fullerovy.

Zdá se být častým jevem, že nové věci musí být objeveny několikrát před tím, než jsou obecně akceptovány. Dovolte, abych zmínil Mendelovy objevy základních zákonů genetiky v 19. století. Ty měly podobný osud.

„Buckyball“

Platonská tělesa často sloužila jako strukturní vzorce chemických sloučenin a uhlovodíky byly až dosud syntetizovány jako čtyřstěny, krychle nebo dvanáctistěnové struktury. Buckminsterfullereny neboli zkráceně „buckyballs“, objevené na počátku r. 1983 jsou novou formou uhlíku. Jméno je k počtění návrháře geodesického dómu v Montrealu (1967), který má zcela stejnou strukturu, jako useknutá ikosaedrická klec s 12 pětiúhelníky a 20 šestiúhelníkovými stěnami a 60 atomy uhlíku ve vrcholech. Stejný obrazec dává evropský fotbalový míč. Před tímto objevem bylo pouze šest známých krystalických forem uhlíku. Klouzavá, měkká, šedá tuha a tvrdý krystalický kámen diamant jsou ty hlavní. V „buckyballu“ všechny vazby směřují k dalším atomům uhlíku. Když je komprimován na 70 % svého normálního objemu, stane se „buckyball“ dvakrát tak tvrdý než diamant. Fullereny mohou sloužit jako vodiče, izolační materiály, polovodiče a supervodiče. Plně hydrogenovaný fulleren má klouzavější povrch než teflon. Čistý fulleren je izolátor. Po přidání několika atomů včetně draslíku se stává superkonduktorem. Fluorovaný „buckyball“ tvoří povrchy

s nejmenším třením. Protážené tuby, odvozené od fullerenu, vytvářejí nejlepší vlákna, která jsou pevnější než grafitová vlákna. Navíc bylo demonstrováno, že fullereny mohou být při nízkých teplotách přeměněny na diamanty.

Není překvapivé, že Královská švédská akademie rozhodla ocenit roku 1996 Nobelovou cenou za chemii tyto autory:

- profesor Robert F. Curl, Jr. (Rice University, Houston, U.S.A.),
- Sir Harold W. Croto (Univ. Sussex, Brighton, U.K.) a
- profesor R.E.Smalley (Rice University).

Je třeba dodat, že fullereny nejsou čistými artefakty, které byly vyrobeny v laboratoři. Později se ukázalo, že se vyskytují i v přírodě.

Snelsonovy věže a exoskelety

Kenneth Snelson navštívil Dymaxion, seminář pořádaný Fullerem v Black Mountain College r. 1948. Hluboce inspirovaný sochař po návratu na podzim téhož roku vytvořil první prototyp tensegritové konstrukce, kterou budu nazývat Snelsonův typ tensegritu. Snelsonovy sochy ukazují mnohem jasněji než Fullerovy dómy, že tlakové prvky mohou držet pohromadě tahem kabelů, aniž by se dotýkaly navzájem. Brzy po tom, co se Snelson svěřil Fullerovi se svým objevem, inkorporoval Fuller Snelsonův typ do svého konceptu synergistiky a začal razit termín tensegrit. Bohužel, zatímco přestal Fuller zdůrazňovat Snelsonův přínos k synergetice a toto opomenutí vykopalo hluboký trvalý příkop mezi dřívějšími přáteli. Snelsonovy věže a exoskelety vyrobené z tyčí a kabelů jsou monumenty tensegritové ideje v mnoha městech a muzeích celého světa.

Navíc, osobní kontakty a přátelství K. Snelsona inspirovalo koncepci živých tensegritů, která byla formulována Dr. Ingbergem z Dept. of Pathology and Surgery, Children's Hospital and Harvard Medical School, Boston MA, U.S.A. Nejjednodušší Snelsonova struktura, obsahující 3 tyče, se stala jednotkou pro výstavbu dvojvrstevných dómů, které mají lepší vlastnosti než originální Fullerovy jednovrstevné dómy.

Tensegrity z ohnutých tyčí a internety

„Needle Tower 2“ z Krollerova muzea v Otterlo, Holandsko, byl první tensegrit, který jsem kdy viděl. Fascinoval mne natolik, že jsem se rozhodl sledovat Snelsonovy nápady a pokusil se rozvinout jeho myšlenky dále, hlavně směrem k mobilním tensegritům, hierarchickým strukturám a lukovitým tensegritům. Pouze dvě tyče stačí na výrobu trojrozměrného tensegritu, jsou-li lukovitě ohnuty, zatímco 3 tyče rovné tvoří minimum pro

třírozměrný útvar. Později jsem se zaměřil na konstrukci tzv. „internetů“, založených na tensegritovém principu, ale s více kabely, než je minimální množství, nutné pro stabilizaci konstruktů. Lukovité tensegrity, nejjednodušší tensegrity tohoto typu, jsou znázorněny na obr. 5. První typ je reprezentován dvěma opačně vypuklými luky, druhý je tvořen luky obrácenými na stejnou stranu. Třetí je kombinovaný typ luk-tyč. Když centrální luk či tyč jsou prodlouženy, počet kolmo umístěných luků se může podstatně zvětšit. „Žebřík do nebe“ a „Magický provaz“ jsou další typy lukovitých struktur. I ten nejprimitivnější tensegrit může nést síť, kterou jsem využil ve svých sochách jako prostorotvorný prvek.

První zajímavou vlastností sítí je iluze pohybu internetu, aniž by se pohyboval. Stačí, aby jej pozorovatel obcházel. „Moiré“ obrazec, generovaný dvěma mimobežnými sítěmi, se objeví při obcházení objektu. Křížové body se pohybují v jiném směru než pozorovatel a to posiluje iluzi pohybu. Znásobení efektu může sloužit i reálný pohyb části objektu. Např. otáčení větrem. Speciální efekt je demonstrován sochou zvanou „Věšák na sny“. Ikosaedrický skelet, na kterém jsou na vrcholech bílé koule, je statorem, na kterém jsou na tenkých pružných tyčích upevněny koule, které se ve větru pohybují. Při stmívání zmizí podpůrné tmavé tyče a pohyblivé koule „rozpohybují“ zbývající koule statoru (efekt relativního pohybu).

Hierarchické tensegrity společně s tensegrity mobily se svým pojetím blíží tomu, co Ingber označil za základ architektury živých bytostí. Živé tensegrity více odpovídají internetům než jednoduchým tensegritům. Luk je rovinný útvar. Pružné tyče však mohou být ohýbány i tak, že vytvářejí prostorový objekt, např. šroubovici podobnou struktuře DNA, nositelky genetické informace. Ta je ovšem dvoušroubovicová. Spojíme-li konce šroubovice kabelem, struktura získá vnitřní napětí typické pro tensegrit. V tomto případě stačí jediná tyč a jediné lano.

Kterýkoliv kabel může být nahrazen rovnou tyčí (tažnou tyčí, rigidním kabelem). Ztrácí se tím ale důležitá vlastnost kabelu, schopnost táhnout za roh. To tyč nedokáže. Také přechodem k ohebným tyčím a polorigidním kabelům se blížíme tzv. živým tensegritům.

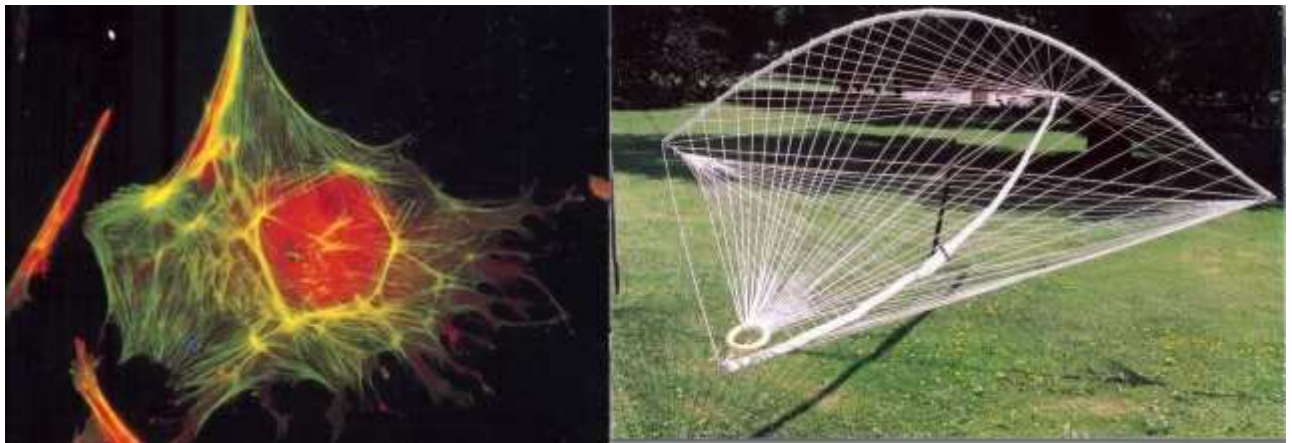
Revidovaný tensegritový model buňky

Od roku 1993, kdy byl tensegritový model buňky respektive mnohobuněčného organismu poprvé popsán, vědecký pohled na buněčnou architekturu a mechanotransdukci se natolik prohloubil, že se D.E. Ingber rozhodl napsat dva nové shrnující články a popsat v nich revidovaný model buňky, který zahrnuje nové poznatky.

V prvním článku se ukazuje, jak může tento stavební systém vytvořit základ pro hierarchickou organizaci živých systémů od molekul po organismus. V druhém se zaměřuje na popis toho, jak tyto sítě ovlivní informaci a její přínos.

Je dobře známé, že eukaryotická buňka není balíček naplněný kapalinou nebo gelem, ve kterém plavou organely. Buňky obsahují složitou síť, cytoskeleton, který se skládá z propojených vláken (filamentů), zvaných mikrotubuly a intermediární filamenta. Tato vlákna odolávají mechanické zátěži a jsou zodpovědné za schopnost odolávat změnám tvaru, fungují jako dráhy pro pohyb organel, orientují pohyb enzymů a substrátů k jejich konečnému místu určení a odpovídají mechanickým silám a změně buněčného tvaru.

Buněčný tensegritový model navrhuje, že celá buňka je tensegritová struktura.



Buněčný tensegritový model

Tažné síly se rodí v mikrofilamentech a intermediárních filamentech. Tyto síly jsou vyváženy mikrotubulovými tyčemi a připojenou extracelulární matrix (ECM). Avšak, v různých strukturních kontextech, individuální filamenta mohou hrát buď tažnou nebo tlačnou duální funkci. Předpětí stabilizující celou buňku je zajištěno obvykle kontraktilním actomyosinovým aparátem. Vedle ECM a osmotického tlaku působícího na buněčnou membránu, síly odpovídající polymerizaci filamentů a cytoskeletové síti těsně pod plazmatickou membránou, přispívají celkovému architektonickému systému.

Biofyzikální studie izolovaných filamentů a mikrotubulů ukázaly, že první jsou lepší v odolnosti na tah, zatímco duté mikrotubuly se uplatňují spíše jako kompresní prvky. Jsou pevné a rovné v roztocích, zatímco izolovaná mikrofilamenta a intermediární filamenta jsou obvykle ohnutá. Toto je v souladu se zákonem, že tah napíná, zatímco tlak ohýbá. Navíc byl tensegritový model podpořen tím, že buňky se chovají, jakoby měly diskrétní síť, ne jakoby vytvářely mechanické viskoelastické kontinuum. Tensegrity se liší od konvenčních

modelů buněk v chování po aplikaci místních tlaků na buněčný povrch. Tlak může způsobit přímou deformaci celé struktury, podle toho jak síť vypadá. Magnetické kroucení ukazuje, že když se kontrolovaný mechanický tlak aplikuje přímo na povrchové receptory (na magnetické mikrokuličky vázané na receptor), tyto receptory vykazují vyšší stupeň mechanického propojení skrze povrch k ostatním transmembránovým molekulám. Roztrhání filamentů inhibuje integrin-závislé odpovědi. Síly přenášení přes integriny na zakotvená mikrofilamenta, zjevně mohou být přeneseny na mikrotubuly ve vzdálených oblastech, takže různé filamentární sítě musí být vzájemně propojeny uvnitř živé buňky. Buněčná odpověď na tlak závisí na kooperativních interakcích mezi všemi cytoskeletálními filamentovými systémy.

Stabilita tvaru jádra a buňky závisí na předpětí cytoskeletu, které je modulováno aktomyosinovou kontraktilitou. Látky měnící osmotické síly a další efekty vedou k olamžité změně stability tvaru.

Tensegritové modely buněk s jádrem složené z tyčí a napjatých kabelů vykazují podobné odpovědi. Cytoskeletální tah se zdá být kritickou determinantou buněčné a jaderné tvarové stability a to nezávisle na transmembránových osmotických silách. Navíc kontinuální přenos tahu a cytoskeletu na jádro a EMC receptory je kritický pro buněčný tvar.

Někteří argumentují, že cytoskelet je jako síť svalů šlach a úponů s kostmi. Ale kde jsou kompresní elementy? Buněčný tvar ve tkáni závisí na schopnosti ECM zakotvit a snést tlak, ale to pouze pomáhá vnitřním kompresním tyčím. Tato situace připomíná stan. Povrchová membrána se napne, když se táhne. Napínání ale může být zajištěno různými způsoby - zvednutí stanových tyčí, tažení membrány ke stanovým kolíkům, nebo přitažením membrány k větvím nad stanem. Poslední akce je komplementární k akci první. Když se poruší mikrotubuly (stanové tyče), jejich funkce je přenesena na kotvy (větvě). Jsou-li porušeny tažné elementy (mikrofilamenta či intermediální filamenta), buněčné trakční síly vynaložené na ECM adheze klesnou. Schopnost individuální mikrotubuly odolávají ohybům při tlaku snadněji, jsou-li zpevněny příčnými spojeními.

Matematická formulace tensegritové teorie vedla k následujícím předpovědím:

1. Ztuhlost modelu (buňky) poroste se zvýšeným předpětím.
2. Při daném předpětí bude ztuhlost vzrůstat lineárně se vzrůstajícím tlakem.

Tyto a další předpovědi se potvrdily.

Jednoduché tensegritové modely buňky byly velmi užitečné, ale realita se jeví mnohem komplexnější. Tento fakt vedl k požadavku na multimodulární tensegritovou strukturu. To znamená, že buňka je složena z mnoha malých tensegritových modulů, které jsou spojeny podobnými zákony jako integrity. Tyto body jsou kritické, protože rozbití

jednoho elementu v jednoduchém tensegritu způsobí totální kolaps, zatímco v multimodulárním systému se jen jeden modul zkroučí, ale celek buňky zůstane relativně nezasazen. Jiná důležitá vlastnost multimodulární struktury je její stabilita během kontinuální výměny jejích částí.

Buněčný tensegritový model bere v úvahu hierarchické vlastnosti mnohobuněčného organismu. Organismus je konstruován jako mnohvrstevný systém. Kostí a svaly, celé orgány, buňky a jádro jsou hlavní vrstvy hierarchie. Architektura každé části je založena na tensegritové struktuře. To je doloženo tím, že každá část je relativně stabilní svým tvarem. Navíc, mitotický aparát, který drží chromozómy ve správných polohách a pomáhá při jejich separaci během mitózy je předpjatá tensegritová klec. Cytoskelet, vnitřní membránová cytoskelet, nukleární matrix a vřeténko mohou fungovat nezávisle, ale když jsou mechanicky propojeny fungují jako integrovaný, hierarchický tensegritový systém. Tensegritové síly udržují stabilitu také prodloužených membránových výběžků, zajišťujících pohyb buněk. Příčné spojení filamentů do velkých snopců zvyšuje ztuhlost těchto komplexních struktur. Takže mikrofilamenta, která normálně fungují v buňce jako kabely, mohou působit ve snopcích jako tlakové tyče.

Geodesické formy tensegritů se v buňce také objevují i na molekulární a nadmolekulární úrovni. Nejimpresivnějším příkladem těchto forem jsou hexagonální uspořádání membránových proteinů, polyedrál ní enzymové komplexy, transportní vesikuly pokryté klatrinem, virové kapsidy, lipidické micely, jednotlivé proteiny, RNA a DNA molekuly.

S tensegrity se tudíž můžete setkat téměř na každém kroku. Jednou jsou to obří artefakty a jindy jsou to mikrostruktury velikosti molekul.