

FOTOPOLIMER ALAPÚ EKTOPARAZITA ELTÁVOLÍTÓ ESZKÖZ MECHANIKAI MODELLEZÉSE

Gombos Ákos¹, Kossa Attila^{2*}

¹Labsolver Innovációs és Technológiai Kft.

²Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar, Műszaki Mechanikai Tanszék



DOI: 10.17489/biohun/2024/1/601

Absztrakt

A vadon élő állatok természetes élőhelyei jelentősen csökkentek az emberi tevékenységek következtében, ezért a kullancsok és az általuk terjesztett kórokozók egyre gyakrabban fordulnak elő a lakott területeken is. Az európai uniós irányelvek miatt a kullancsok vegyszeres irtása tiltott, így az időben történő közvetlen eltávolításuk a legbiztonságosabb védekezés. Jelen cikk egy új fotopolimer alapú ektoparazita eltávolító eszközt működését vizsgálja, ami a kullancsok kíméletes eltávolítását teszi lehetővé. Az újonnan kifejlesztett szerkezet esetén részletes mechanikai elemzést közlünk arra vonatkozólag, hogy az eljárás milyen mértékű térfogatváltozást okozhat a kullancsokon. A fotopolimer folyadék-szilárd átalakulása során keletkező zsugorodás hatását vizsgáljuk a kullancs térfogatára nézve, mely jelenség kulcsfontosságú a fertőzés elkerülése szempontjából. Háromdimenziós mechanikai modellt javasolunk, aminél a zsugorodás hatására keletkező deformációkat végeeselemes számításokkal határozzuk meg a geometria nemlinearitás figyelembe vételével. Számos különböző geometriai konfiguráció vizsgálata alapján arra a következtetésre jutottunk, hogy az új eljárás során a kullancs testét nem éri összeszorító nyomás, hanem épp ellenkezőleg, a térfogata a gyanta megszilárdulása során növekszik. Ezek alapján az újonnan fejlesztett kullancseltávolító szerkezet biztonságosnak tekinthető.

Kulcsszavak: fotopolimer, kullancs, végeeselem módszer, mechanikai modell

MECHANICAL MODELLING OF A PHOTOPOLYMER-BASED ECTOPARASITE REMOVAL DEVICE

Abstract

The natural habitats of wild animals have significantly diminished due to human activities, leading to an increased presence of ticks and the pathogens they transmit in inhabited areas. Because chemical eradication of ticks is prohibited by European Union directives, timely removal remains the safest defense. This article introduces a novel photopolymer-based ectoparasite removal device, enabling gentle tick extraction. Detailed mechanical analysis of the newly developed structure

***Levelező szerző elérhetősége:** Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar, Műszaki Mechanikai Tanszék, 1111 Budapest, Műegyetem rkp. 5.

E-mail: kossa@mm.bme.hu **Tel.:** +36 1 463-1368

Citáció: Gombos Á, Kossa A. Fotopolimer alapú ektoparazita eltávolító eszköz mechanikai modellezése. *Biomech Hung.* 2024;17(1):24-33.

Beérkezés ideje: 2024.02.06. **Elfogadás ideje:** 2024.05.24.

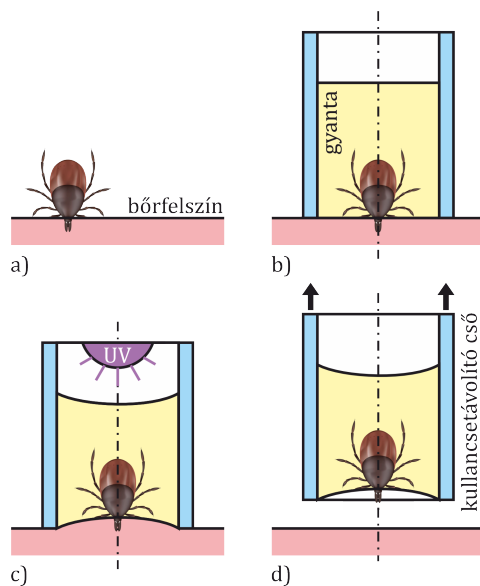
is provided to assess the extent of volumetric changes induced during the procedure. The effect of shrinkage occurring during the photopolymer's liquid-to-solid transition on tick volume is examined. Proposing a three-dimensional mechanical model, we determine deformations resulting from shrinkage using finite element analyses, considering geometric nonlinearity. Through examination of various geometrical configurations, we conclude that the novel procedure does not subject the tick's body to compressive forces; instead, its volume increases during resin solidification. Accordingly, the newly developed tick removal device can be considered safe.

Keywords: photopolymer, tick, finite element method, mechanical model

BEVEZETÉS

A vadon élő állatok természetes élőhelyei az emberi tevékenységek következtében napjainkra jelentősen megfogyatkoztak, így azok közvetlenül a lakott területek mellett, sok esetben a lakott területen kénytelenek megjelenni. A kullancsok természetes gazda állatai (sүн, mókus, vaddisznó, stb.) esetében ez a jelenség különösen jól megfigyelhető. A gazda állatokkal együtt a kullancsok és az általuk terjesztett emberre is veszélyes kórokozói is egyre nagyobb valószínűséggel jelennek meg a közvetlen környezetünkben. A kullancsok vegyszeres irtását tiltó európai uniós irányelvek és jogszabályok miatt a leghatékonyabb védekezési módszer az időben észlelt kullancs egyénileg történő eltávolítása a bőrből, mielőtt az kórokozókat juttatna szervezetünkbe. A jelenleg elérhető megoldások közül az úgynevezett kullancs csipeszek bizonyulnak a leghatékonyabbnak, melyekből számos fajtát megvásárolhatunk gyógyszerárakban és internetes áruházakban. Szinte kivétel nélkül minden eszköz esetében kijelenthető, hogy helytelen használata esetén a fertőződés esélye jelentős, hiszen egy összehúzó kullancs testéből fertőzés juthat az emberi szervezetbe. A csipeszek használata tehát igényel némi tapasztalatot és kézügyességet. Egy új fejlesztésű – fotopolimer alapú ektoparazita eltávolító – szabadalmi eljárás alatt álló eljárás és eszköz¹⁻³ éppen a hagyományos kullancs eltávolítással kapcsolatos kockázatokat kívánja csökkenteni úgy, hogy használata különösebb

tapasztalat vagy szakértelem nélkül is biztonságos legyen. Ennek az eljárásnak az alapja abból a felismerésből fakad, hogy a kullancs csipesz segítségével való eltávolítás során egy nem kívánatos nyomó erőt hozunk létre a kullancs testén. Ahhoz, hogy a kullancs testéből ne kerüljön kórokozó az emberi szervezetbe, a csipeszt a kullancs feji részéhez érdemes pozicionálni, majd ott megfelelő erővel megszorítani. A pontatlan rögzítés, vagy a nem



1. ábra. Az új fotopolimer alapú ektoparazita eltávolító eljárás illusztrálása. a) a bőrben elhelyezkedő kullancs; b) a kullancsetávolító cső illesztése, feltöltése gyantával; c) a fotopolimer kikeményítése UV fényvel; d) a kullancs eltávolítás a megszilárdult gyanta segítségével

megfelelő összeszorító erő hatására a kullancs összenyomódik vagy a teste elszakad. Az összenyomódás következményeként szívókáján kórokozókkal szennyezett nedvek juthatnak vissza az emberi szervezetbe, testének szétszakítása esetén fertőzött testrészek maradhatnak az emberi bőrben, melynek eltávolítása még nagyobb szakértelmet és bonyolultabb eszközt igényel. Az említett új fejlesztésű kullancseltávolító eljárás lényege, hogy a bőrbe ágyazódott kullancsot (vagy egyéb ektoparazitát) első lépésként ultraviola fény hatására megszilárdulni képes képlékeny közeggel vesszük körbe. Ezt követően a közeget UV fényvel megvilágítjuk, melynek hatására az megszilárdul, merev burkot képezve a kullancs körül. A merev burok segítségével a kullancs alaktorzulás nélkül könnyedén eltávolítható a bőr felszínéről anélkül, hogy azon nyomóerő (pl: csipesszel összeszorító) jönne létre. Az eljárást az [1. ábra](#) szemlélteti.

Az összenyomó erő hiányának köszönhetően a fertőzési kockázat minimálisra csökken. A szilárd burokkal való körbevétel másik előnye, hogy a csipesszel ellentétben nem csupán a szájszerv és feji részt rögzítjük, hanem a burok méretétől függően akár a kullancs egész testét. Ezáltal a szervek leszakadási esélye is minimálisra csökken. További előnyként említhető, hogy az eltávolított kullancs a burokkal együtt könnyen tárolható egy esetleges későbbi orvosi vizsgálat céljából. A kullancs alakjának illusztrálása végett a [2. ábrán](#) egy pásztázó elektronmikroszkópos (SEM) felvételt láthatunk.

A fotopolimer alapú ektoparazita eltávolító eszköz tervezése során kulcsszerep jut a benne alkalmazandó fotopolimer (más néven műgyanta) mechanikai tulajdonságainak. Fontos, hogy a működés során UV fény hatására rövid idő alatt létrejövő térhálósodás (folyadék-szilárd halmazállapot változás) során ne keletkezzen az emberi bőrt károsító hő, vagy káros

kémiai vegyület, ugyanakkor a megszilárdult gyanta mechanikailag alkalmas legyen a kullancs eltávolítására. Ez a tanulmány azonban azt vizsgálja, hogy a folyadék halmazállapotú műgyanta kikeményedése során annak térfogatában létrejövő zsugorodás milyen hatást gyakorol a kullancs testére. A tanulmány eredményeinek megismerésével olyan zsugorodási jellemzővel bíró gyanta kerülhet az eszközbe, amely tulajdonság biztosítja, hogy a kullancseltávolító eszköz használata során a kullancs testére nem hat nyomó erő, így a használat közbeni fertőzés veszély minimális. A kéziratban egy alkalmas mechanikai modellt dolgozunk ki a jelenség részletes vizsgálatára. A bemutatott numerikus számítások elvégzéséhez vége-selemes módszert⁴⁻⁵ alkalmazunk.

MECHANIKAI MODELL

A vizsgált jelenség egyszerűsített geometria modelljének félmetzeti képét a [3. ábra](#) ismerteti. A kullancseltávolító csőben helyezkedik el a gyantát reprezentáló anyag, ami a kullancsot körbeveszi. Az emberi bőrfelszínt síkfelülettel modellezzük, a felületi egyenletlenségeket a számítások során nem vesszük figyelembe, hiszen azok hatása a kullancs zsugorodására/tágulására elhanyagolható. A kullancsok tényleges geometriáját egy ellipszoid jellegű testtel helyettesítjük, melynek geometriáját két

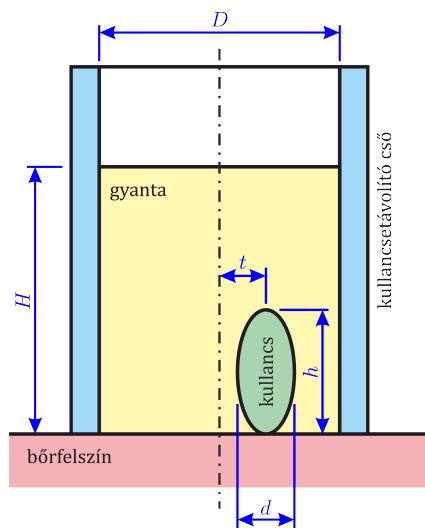


2. ábra. SEM felvétel egy kullancsról

paraméter határozza meg: a d szélessége és a v vastagsága. Pásztázó elektronmikroszkóp felvételek alapján a kullancs h hosszának és szélességének az arányát minden esetben $h/d=1,77$ -re vettük fel, amivel a modellezés során figyelembe vettük a kullancs elnyújtott alakját, ahelyett, hogy egyszerűen csak egy gömbként modelleztük volna. A numerikus számítások során két különböző vastagságot vizsgáltunk, hogy képet kapjunk arról, hogy a vastagság/szélesség arány miképpen befolyásolja a kullancs zsugorodását/tágulását. Ezáltal betekintést nyerhetünk abba, hogy a még vérrel nem telített kullancs és az önmagát már vérrel megszívott kullancs esetén miképpen változnak a mechanikai viszonyok. A kullancsetávolító cső belső átmérője adott, ennek értéke $D=3,6\text{ mm}$. A csőhöz képest 5 különböző szélességű kullancsméretet modelleztünk, melyek értékeit az 1. táblázat tartalmazza, ami a további geometria méreteket is ismerteti.

Mindezek alapján összesen tíz különböző méretű kullancs geometriát vizsgálunk, amik elemzésével átfogó képet kapunk a vizsgált mechanikai jelenség esetén a méret hatásáról. A valóságban nem biztosítható, hogy a kullancs minden esetben a cső középtengelyén helyezkedik el. Emiatt a mechanikai modellben további paramétert vezetünk be, amivel a kullancs excentricitását jellemezzük. A kullancs excentricitását a $\eta=t/(D/2-d/2)$ dimenziótlan paraméterrel írjuk le. Vegyük észre, hogy $\eta=1$ esetén a kullancs eléri a cső belső falát. Négy különböző excentricitást vizsgálunk: $\eta=0$; 0,3; 0,6; 0,9. Összességében ez azt jelenti,

hogy 40 különböző konfigurációt elemzünk a kullancs méretére és elhelyezkedésére vonatkozólag. A gyanta magassága minden esetben $H=4\text{ mm}$. Jegyezzük meg, hogy a két leghosszabb kullancs geometria esetén a kullancs kilóg a gyantából. Ez olyan eset, ami a valóságban is előfordulhat, emiatt ezen méreteket is vizsgáljuk a számítások során.



3. ábra. A vizsgált modell sematikus ábrája

A gyanta adatlapja szerint a sűrűsége $1000\text{--}1200\text{ kg/m}^3$. A szimulációk során az 1100 kg/m^3 középtérrel számolunk. A gyanta rugalmassági moduluszára vonatkozólag a gyártó annyit közöl, hogy $E < 100\text{ MPa}$, de konkrét számértéket nem. Továbbá, az adatlaptól ismert a gyanta Shore A keménysége, aminek értéke 90. Habár a Shore A keménység és a rugalmassági modulusz között egyértelmű zárt

1. táblázat. A modellek geometria méretei

Kullancs szélessége [mm]:	$d = 0,36; 1,08; 1,8; 2,52; 3,24$
Kullancs szélessége a cső belső átmérőjéhez viszonyítva:	$d/D = 0,1; 0,3; 0,5; 0,7; 0,9$
Kullancs hossza [mm]:	$h = 0,64; 1,91; 3,19; 4,46; 5,73$
Kullancs vastagsága a szélességéhez viszonyítva:	$v/d = 0,5; 1,0$

alakú összefüggés nem adható meg, mégis vannak szakcikkek, amik ajánlást tesznek arra vonatkozólag, hogy miképpen lehet a Shore A keménységértékből a rugalmassági moduluszt becsülni. Gent mérési alapján az egyik elfogadott közelítést⁶ alkalmazva az (1) képlet adódik a rugalmassági moduluszra, ami összhangban van a gyártói adatlappal.

$$E = \frac{0,0981(56 + 7,66 \cdot S)}{0,137505(254 - 2,54 \cdot S)} = 20,94 \text{ MPa} \quad (1)$$

A fenti kifejezésben S jelenti a Shore A keménységértéket. A számítások során $E=25 \text{ MPa}$ értékkel számolunk. A Poisson-tényező értékét 0,42 értékre vettük fel szakirodalmi ajánlás⁷ alapján. Fotopolimerek további anyagjellemzőiről részletes elemzést találhatunk a szakirodalomban.⁸⁻¹⁰ A kullancseltávolító cső anyaga a gyantához képest lényegesen merevebb, emiatt a számítások során a csőfal deformációjával nem számolunk, azt merevnek tekintjük. Az eljárás során a gyanta a cső belső falához hozzáragad, attól nem válik el. A végeselemes modell esetén emiatt a gyantát alkotó hengeres test külső palástján megfogás kényszerrel alkalmazunk. A gyanta alsó lapja a bőrfelülettel érintkezik, ami érdemben nem gátolja a gyanta zsugorodását, emiatt hengeres test alsó lapján lévő csomópontok mozgását nem gátoljuk. A felső szabad lap esetén is engedjük az anyag deformációját.

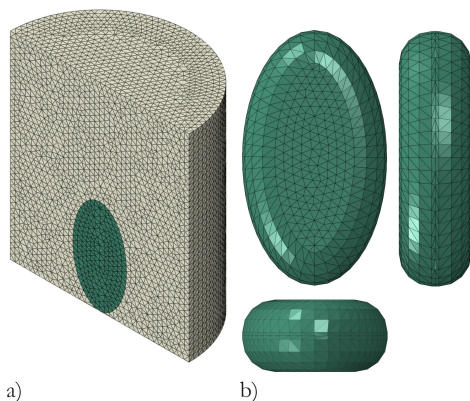
Számításaink során a pontosabb modellezés végett figyelembe vesszük a geometriai nemlineárisit, hiszen az alkalmazott térfogati alakváltozások az 5%-os értéket lényegesen meghaladják. A gyanta előírt térfogatváltozását a lineáris hőtágulási együttható (α) segítségével tudjuk megadni a végeselemes számítás során. Jelölje a deformált és a kezdeti konfiguráció közötti kvázi hőmérsékletkülönbséget ΔT . A geometriai nemlinearitás végett a mérnöki térfogati alakváltozás (ε_V) és a kvázi hőmér-

sékletkülönbség közötti összefüggés az alábbi alakban adható meg:

$$\varepsilon_V = \frac{\Delta V}{V_0} = \exp(3\alpha \cdot \Delta T) - 1. \quad (2)$$

A számítás során az $\alpha \Delta T$ szorzat értékével tudjuk kontrollálni az elérni kívánt térfogati alakváltozást. -10%-os térfogati zsugorodás esetén $\alpha \Delta T = -0,0351202$, amit példaképpen megadhatunk úgy, hogy α értékét 0,001 1/K-re vesszük és az előírt kvázi hőmérsékletváltozásra $\Delta T = -35,1202 \text{ K}$ -t állítunk be. Fontos megjegyeznünk, hogy α értékének pontos specifikálása a számítás során nem szükséges, csupán az $\alpha \Delta T$ szorzat értéke számít.

A geometria végeselemes diszkrétizációjához négy csomópontos lineáris tetraéder elemeket használtunk. A számítások előtt részletes hálólínggetlenségi vizsgálatot végeztünk és olyan elemméretet választottunk, ahol az eredmények már érdemben nem változtak és ezáltal a számítás pontosnak tekinthető. Illusztrálás végett a 4. ábra mutatja a végeselemes hálót az egyik kiválasztott referencia konfiguráció



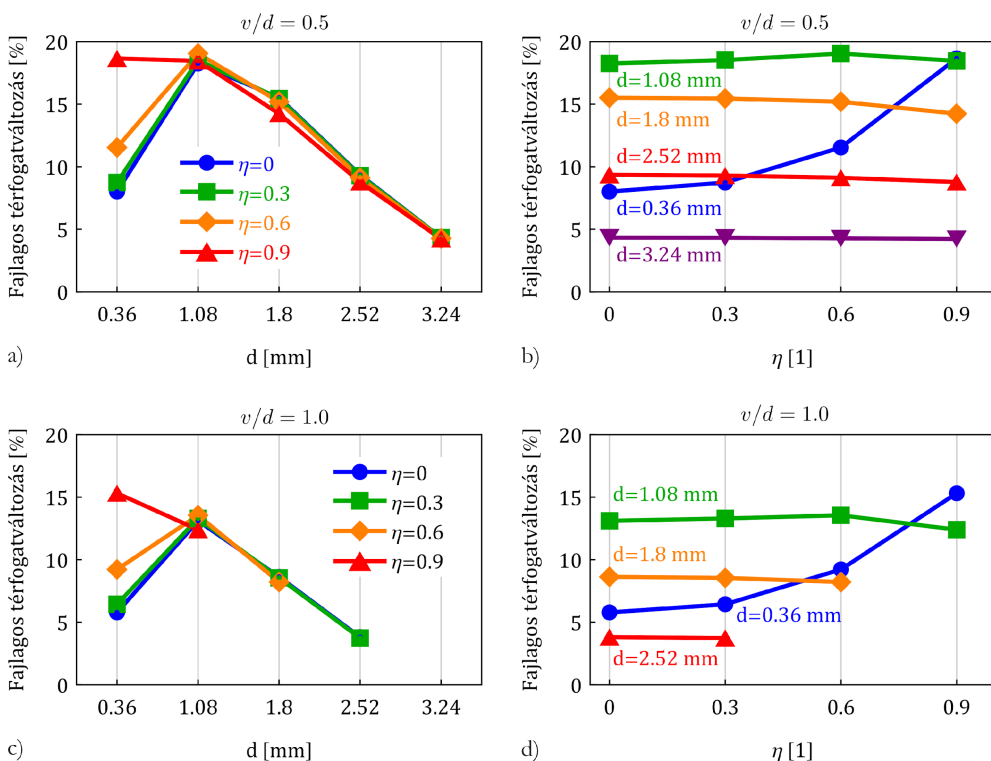
4. ábra. A végeselemes diszkrétizáció (hálózás) illusztrálása. a) félmetzeti kép, ahol a zöld elemek jelölik a kullancs térfogatát, míg a világosbarna elemek jelölik a gyanta anyagát; b) a kullancsot alkotó végeselemes háló kinagyított ábrái három különböző nézetben

($d/D=0,3$, $v/D=0,5$ és $t=0$) esetén. A teljes modellt ennél a példánál 257 572 elem alkotja. Amennyiben a kullancs mechanikai viselkedését nem modellezzük, hanem csak az általa kitöltött térfogat változását vizsgáljuk, akkor értelemszerűen a biztonság javára döntünk amikor a gyanta zsugorodása következtében a kullancs térfogatváltozását számítjuk. Emiatt a végeelemes modellünkben, habár a kullancsot is diszkrétizáltuk, annak numerikus szempontból elhanyagolhatóan kis rugalmassági modulusz értéket (0,001 MPa) állítottunk be zérus Poisson-tényező alkalmazása mellett, hogy a térfogati rugalmassági modulusz értékét is alacsonyan tartsuk. A numerikus számítások elvégzéséhez az Abaqus¹¹ végeelemes

szoftvert használtuk, statikus implicit megoldási stratégia alkalmazásával a geometriai nemlinearitás figyelembe vételével.

EREDMÉNYEK

A numerikus számítások során elsődleges célunk a kullancs térfogatváltozásának meghatározása minden egyes konfiguráció esetén -10%-os gyanta zsugorodás (mérnöki fajlagos térfogatváltozás) esetén. A vizsgált konfigurációkat a kullancs mérete, vastagsága és a csőben való elhelyezkedése (excentricitása) határozza meg. A kapott eredményeket az 5. ábra foglalja össze. Az ábrák függőleges tengelye minden esetben a kullancs térfogatváltozását



5. ábra. A kullancs térfogatváltozása $v/d=0,5$ és $v/d=1$ esetekben.

a) és c): eredmények a d/D méret függvényében. A különböző színnel jelölt értékek különböző excentricitás értékekhez tartoznak;

b) és d): eredmények a t excentricitás függvényében. A különböző színnel jelölt értékek különböző d értékekhez tartoznak

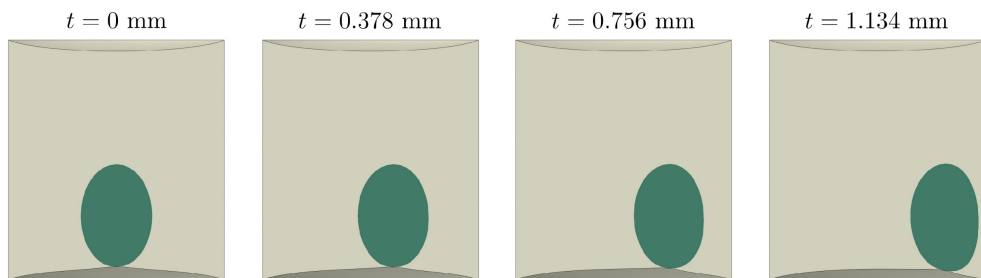
jelöli. Az a) és b) ábrák a $v/d=0,5$ esethez, míg a c) és d) ábrák a $v/d=1$ esethez tartoznak.

Az első és egyben legfontosabb következtetésünk, hogy a számított fajlagos térfogatváltozás minden esetben pozitív, vagyis a kullancsot reprezentáló térfogat a gyanta zsugorodása következtében mindig nő, hozzávetőlegesen 5-20% közötti fajlagos térfogatváltozás értékkel jellemezhető a konfigurációtól függően. A legkisebb mértékű térfogatváltozás a legnagyobb kullancs geometria ($d/D=0,9$) esetén jelentkezik, hiszen ebben az esetben a teljes térfogatban a kullancs által kitöltött térfogat nagyobb, mint a gyanta térfogata és ennek következtében a gyanta zsugorodása csak kisebb mértékű térfogatváltozást tud előidézni a kullancs térfogatán. Vegyük észre, hogy a kullancs mérete és a kapott térfogatváltozás közötti nemlineáris viselkedést: a vizsgált konfigurációk közül a $d/D=0,3$ esetben egy lokális maximumot fedezhetünk fel a kisebb excentricitások esetén. Ez az összetett nemlineáris viselkedés a numerikus szimulációk nélkül egyszerűsített analitikus számításokkal minden bizonnyal nem fedezhető fel. További megfigyelésünk, hogy a legkisebb kullancs geometria ($d/D=0,1$) kivételével a kapott térfogatváltozás csak kis mértékben függ az excentricitástól. Ellenben $d/D=0,1$ esetén az excentricitás növelésével a kullancs térfogata rohamosan növekszik. A $v/d=1$ vastagság esetén néhány kullancs mérete akkora, hogy radi-

ális irányban is kilóg a csőből, emiatt értelemszerűen ezen konfigurációkat nem vizsgáljuk és ezekhez eredmény sem tartozik az ábrákon. Vegyük észre, hogy a kullancs vastagsága (v/d arány) jellegét tekintve nem változtat az eredményeken, de a vastagabb kullancs esetén kisebb térfogati növekedés tapasztalható a gyanta zsugorodása következtében.

A deformált konfigurációkat különböző excentricitási értékekhez mutatja a [6. ábra](#) félmetset alkalmazásával a $d/D=0,3$ és $v/D=0,5$ geometria esetén. A deformált alakokból látszik, hogy az excentricitás növelésével az ellipszoid geometria kezd egyre jobban eltorzulni.

A fent közölt numerikus számítások eredményei a -10%-os gyanta zsugorodáshoz tartoznak. Annak érdekében, hogy átfogóbb képet kapjunk arról, hogy a kullancsot övező anyag térfogatváltozása miképpen hat a kullancs térfogatváltozására kiszámítottuk egy referencia kullancsméret ($d/D=0,3$, $v/D=0,5$ és $t=0$) esetén a kullancsot beágyazó anyag térfogatváltozása és a kullancs térfogatváltozása közötti összefüggést mind tágulás, mind zsugorodás esetére a $\pm 16\%$ fajlagos térfogatváltozási tartományban. A kapott eredményt a [7. ábra](#) mutatja. Az eredményből láthatjuk, hogy amennyiben a kullancsot beágyazó anyag térfogata tágul, akkor a kullancs térfogata csökken. Ennél a referencia modellnél -10%-os



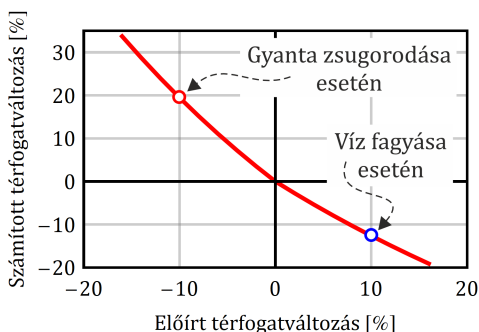
6. ábra. Deformált konfigurációk egy választott referencia geometria esetén különböző excentricitás értékekhez

előírt térfogatváltozáshoz +19,5%-os kullancs térfogatváltozás tartozik, míg előírt +10%-os esetben -12,6%-os térfogatváltozás adódik. Fontos kihangsúlyozni, hogy a víz fagyása megközelítőleg 10%-os térfogatnövekedéssel jár. Ha gyanta helyett vizet használnánk és annak fagyását tudnánk biztosítani, akkor a kullancs összenyomódna, ami éppenséggel az elkerülendő deformációs mechanizmus. A térfogatváltozások közötti összefüggés ebben a tartományban is kismértékű nemlinearitást mutat. A kapott numerikus értékek %-ban kifejezve jól közelíthetőek az alábbi analitikus összefüggéssel:

$$\varepsilon_{\text{kullancs}} = -1,625 \cdot \varepsilon_{\text{előírt}} + 0,0955 \cdot (\varepsilon_{\text{előírt}}^2)^{0,7807} \quad (3)$$

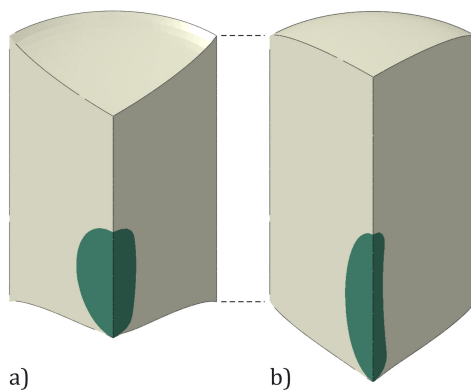
A $\pm 16\%$ -os előírt térfogati alakváltozásokhoz tartozó deformált konfigurációkat a 8. ábra mutatja a teljes geometria egynegyedének ábrázolásával, hogy a kullancs két metszete is kivehető legyen. Fontosnak tartjuk kihangsúlyozni, hogy amennyiben a kullancsot beágyazó anyag térfogata növekszik, akkor a kullancs térfogatának csökkenését főként a testének kikapulása és megnyúlásának együttese okozza, ami a b) ábrán jól kivehető.

A kullancsot körülvevő gyanta esetén a számításaink során a bőrrel érintkező alsó lap



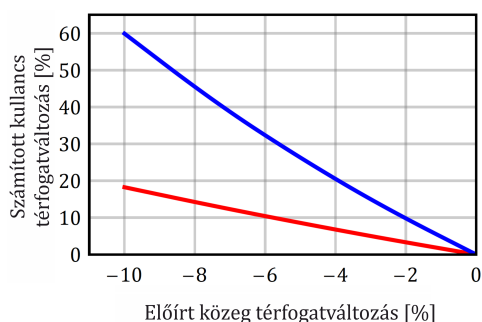
7. ábra. A kullancs térfogatváltozása a kullancsot körülvevő anyagra előírt térfogatváltozás függvényében a referencia modell esetén

esetén, valamint a felső lap esetén is szabad elmozdulást biztosítottunk a végeselemes modellben. A következőkben bemutatjuk az eredményeket a másik határhelyzetben is, amikor mind az alsó, mind a felső lapok axiális irányú elmozdulása gátolt. Ebben az esetben azt várjuk, hogy a gyanta zsugorodása következtében nagyobb térfogati tágulás jelentkezik a kullancson. A számítási eredményeket a $d/D=0,3$, $v/D=0,5$ esetben közöljük a 9. ábrán. A megoldásokból jól kivehető, hogy amennyiben az alsó és felső lapok axiális (a cső tengelye) irányú mozgásokat lekötjük, akkor lényegesen nagyobb a kullancs térfogatának növekedése, ami összhangban van a kezdeti hipotézisünkkel. A vizsgált referencia modell esetén a gyanta -10%-os zsugorodása esetén +59,92% térfogatnövekedést kaptunk (+18,25% helyett), ha az alsó és felső lap mozgását gátoltuk. Mindezek alapján arra a következtetésre jutunk, hogy a szimulációs modell megalkotásában a biztonság javára döntünk, ha a henger alsó és felső lapjának a mozgását nem gátoljuk és szabadon deformálódhatnak. Ha ebben az esetben is a kullancs térfogatának növekedése tapasztalható, akkor



8. ábra. A 16%-os előírt térfogati zsugorodás (a) és tágulás (b) esetén kapott deformált alakok a referencia modell esetén. Az egyes nézetek csak a teljes geometriának egynegyedét mutatják, hogy a kullancs alakja jobban kivehető legyen

minden bizonnyal abban az esetben is pozitív relatív térfogatváltozást kapnánk, ha a gyanútával kapcsolatban lévő bőrfelszín összetette mechanikai modelljét építenénk be. Emiatt a vizsgált jelenség kvalitatív elemzéséhez az általunk épített mechanikai modell peremfeltételeit elfogadjuk.



9. ábra. Az alsó és felső lapokon alkalmazott peremfeltétel hatása a térfogatváltozásra. Piros görbe mutatja a megoldást az eredeti modellben alkalmazott peremfeltétel esetén, míg a kék görbe jelenti a számítási eredményeket abban az esetben, ha mindkét lap mozgása gátolt.

ÖSSZEFOGLALÁS

Jelen kézirat egy új fejlesztésű fotopolimer alapú ektoparazita eltávolító eszköz mechanikai modellezését mutatja be. Összetett végelelemes 3D modellt javasoltunk, aminek segítségével lehetőségünk nyílik arra, hogy az alkalmazott műgyanta kikeményítése során a zsugorodásnak a kullancsra gyakorolt hatását részletesen elemezzük. Számos különböző konfiguráció esetén kiszámítottuk a kullancs térfogatváltozását és arra a következtetésre jutottunk, hogy az új eljárás alkalmazása során nem várható olyan eset, amikor a kullancs térfogata csökkenne. Az új fejlesztésű eszköz biztonságosságának megítélése szempontjából ez kulcsfontosságú következtetés. Az összetett geometria és peremfeltételek miatt, egyszerűsített mechanikai modell megalkotására nem volt lehetőség, mindenképpen végelelemes modell megalkotása volt szükséges a nagy deformációk okozta geometria nemlinearitások figyelembevételével. Kiegészítő eredményként számítást közöltünk arra az esetre is, ha a kullancsot körülölelő anyag – ellentétben a műgyantával – térfogatilag tágul, mint például a víz a fagyása során.

A szerzők részvétele: G.Á.: mechanikai modell kidolgozása, végelelemes modell fejlesztése, eredmények kiértékelése, kézirat írása, K.A.: mechanikai modell kidolgozása, végelelemes modell fejlesztése, eredmények kiértékelése, kézirat írása.

Köszönetnyilvánítás: -

Támogatás: A szerzők köszönetüket fejezi ki a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatalnak a 2021-1.1.4-GYORSÍTÓSAV projekthez nyújtott támogatásért, valamint a Labsolver Innovációs és Technológiai Kft-nek. Szerzők köszönetüket fejezik ki az NKFIH FK 142457 projekt keretében kapott támogatásért.

Összeférhetetlenség: Nincs.

IRODALOM

1. *Gombos AE.* Method and device for removing an ectoparasite from the skin. European Patent Office EP3968864A1.
2. *Gombos AE.* Eljárás és eszköz ektoparazita bőrből való eltávolítására. Szellemi Tulajdon Nemzeti Hivatala.
3. *Gombos AE.* Method and device for removing an ectoparasite from the skin. United State Patent Application US 20220183720A1.

4. *Hughes TJR*. The finite element method: linear static and dynamic finite element analysis. Dover Publications. 2000.
5. *de Borst R, Crisfield MA, Remmers JJC, Verhoosel CV*. Non-linear finite element analysis of solids and structures. Wiley. 2012.
6. *Gent AN*. On the relation between indentation hardness and Young's modulus. Transactions of the Institution of the Rubber Industry. 1985;34: 46-57.
7. *Pandini S, Pegoretti A*. Time, temperature, and strain effects on viscoelastic Poisson's ratio of epoxy resins. Polymer Engineering and Science. 2008;48(7):1434-41.
8. *Kovacs JG, Kortelyesi G, Kovacs NK, Suplicz A*. Evaluation of measured and calculated thermal parameters of a photopolymer. International Communications in Heat and Mass Transfer. 2011;38:863-7.
9. *Nakamura K*. Photopolymers: photoresist materials, processes, and applications (optics and photonics). CRC Press. 2014.
10. *Izdebska-Podsiadły J*. Polymers for 3D Printing. Elsevier. 2022.
11. *Dassault Systemes*. Abaqus version 2022. Available form: <https://www.3ds.com/products/simulia/abaqus>