

HAJMERESZTŐ KÍSÉRLETEK, AVAGY A FÉSÜLKÖDÉS FIZIKÁJA

Stonawski Tamás[®], Beszeda Imre

Nyíregyházi Egyetem, Fizika Csoport, Nyíregyháza

[®]E-mail: stonawski@gmail.com

Bevezető

A mindennapi életünk során a legkülönbözőbb anyagokkal találkozhatunk, mint pl. fa, fémek, műanyagok, üvegek stb., viszont általában nem foglalkozunk eleget ezek konkrét tulajdonságaival, mint például a különböző mechanikai tulajdonságokkal (hogyan viselkednek, milyen „erők”, mekkora a teherbírásuk, milyen a rugalmasságuk) vagy a hőtani, az elektromos és egyéb tulajdonságaikkal. Az iskolai oktatásban a legfontosabb anyagok ilyen tulajdonságai nagy vonalakban szerepelnek ugyan a tananyagban, de nem a fontosságuknak megfelelő mértékben, ezért a felsőoktatásba bekerülő diákok jelentős részének sok esetben még alapvető ismeretei sincsenek ezekről.

Kifejezetten érdemes lehet megvizsgálni néhány érdekes, nem fémes anyagot is, mint a gumi vagy a damilszál, sőt, általában a műanyagokat vagy az emberi haját. Az emberi hajszálak környezetünk mindennapos részét képezik, de gyakran nem is gondolunk arra, hogy mekkora tudományos potenciál rejlik bennük. Különösen izgalmas, amikor saját magunkkal kapcsolatban kísérletezünk, hiszen ez nem csupán a környezetünk jobb megértéséhez vezet, hanem önmagunk felfedezésének élményét is megadja.

Hajunk az életünk során folyamatosan megújul, és természetes úton hullik ki. Ez azt jelenti, hogy mindig kéznél van egy egyszerűen hozzáférhető anyag, amely fizikai kísérletek sorának alapjául szolgálhat. A hajszálak ellenállása bizonyos mechanikai hatásokkal szemben, mint például a fésülködés, érdekes kérdéseket vet fel. Vajon mekkora erőhatásnak tud ellenállni egy hajszál? Hogyan befolyásolják a mechanikai hatások a haj szerkezetét és tulajdonságait? Különböző vizsgálatok során

azt is megtudhatjuk, hogy a hajszál miként reagál a megnyúlásra, elszakadásra vagy elvékonyodásra [1].

Ezek a kérdések és a rájuk adható válaszok nem csupán tudományos érdekességgel bírnak, hanem lehetőséget nyújtanak arra is, hogy a diákok számára szemléletesen és könnyen megvalósítható fizikai kísérleteket vezessünk be. A hajszál átmérőjének meghatározásától kezdve az anyagi tulajdonságok vizsgálatáig számos izgalmas módszer áll rendelkezésünkre, amelyek a tanórai vagy otthoni kísérletek részévé válhatnak.

Ebben az írásban olyan egyszerű, mégis lenyűgöző kísérleteket mutatunk be, amelyekkel különböző módon mérhetjük meg a hajszál átmérőjét és egyéb fizikai tulajdonságait. Ezek a kísérletek nemcsak tudományos megfigyelésekre és pontos számításokra adnak lehetőséget, hanem a diákok számára közvetlen élményt is nyújtanak a fizika világának megismerésében.

Fésülködés közben fellépő erőhatások

A hajszálak mechanikai ellenállásának vizsgálata során különösen érdekes kérdés, hogy mekkora erőhatások érik őket fésülködés közben. Ennek mérésére egyszerű, otthon vagy tantermi környezetben is elvégezhető kísérletet mutatunk be.

Természetesen a fésülködés során fellépő erőhatások nem egyformák minden esetben. Ha a haj egyenes és párhuzamos szálakból áll, a fésű viszonylag könnyen halad előre, és a hajszálak közötti súrlódás csupán csekély mértékben járul hozzá az ellenálláshoz. Ezzel szemben, ha a haj hosszú és gubancos, a fésűnek nemcsak előre kell haladnia, hanem egyúttal ki is kell igazítania az összekeredit szálakat. Ilyenkor a fésülés közben a hajszálakra ható erők jelentősen megnőhetnek, sőt, egyes esetekben



Stonawski Tamás a Nyíregyházi Egyetemen főiskolai docens. Doktori címét 2016-ban az ELTE Fizika Tanítása doktori programjának keretében szerezte. Kutatási területe a digitális média alkalmazása a tanulói kreativitás, problémamegoldás és önálló kísérletezés fejlesztésére az általános és középiskolában.



Beszeda Imre matematika-fizika-számítástechnika szakos középiskolai tanár, anyagtudományi mérnökfizikus, a NyE Műszaki és Agrártudományi Intézet fizikatanára. 2006 óta foglalkozik tudomány- (elsősorban fizika-) népszerűsítéssel és tehetséggondozással. A Kreatív Fizika Tábor megálmodója és szervezője.

a hajszálak inkább kitépődnek, elszakadnak, mintsem kiegyenesednének.

A kísérlet egyik célja annak megvizsgálása, hogy az egy hajszálra jutó erő nagysága eléri-e azt a küszöbértéket, amely már roncsolja a haj szerkezetét. A mindennapos fésülési rutin során az erőhatások visszafordíthatatlan károsodást okoznak-e a hajszálakban? E kérdés megválaszolására végezzük el a következő méréseket.

A következő lépés annak becslése, hogy egyetlen hajszálra mekkora erő jut ebből. Ehhez meg kell számolnunk, hogy a fésű húzása közben hány hajszálát érint. Ezt úgy végezhetjük el, hogy kiválasztunk két fésűfogat, és megszámloljuk, hogy a közöttük lévő részen hány hajszál található. Az így kapott értéket megszorozzuk a fésű fogainak számával (mínusz egy), hogy becslést kapjunk a teljes hajcsomóra. Az átlagos erőhatást elosztva ezzel a számmal, megkapjuk azt az értéket, amely egy hajszálra esik.

A hajszálak tulajdonságainak vizsgálata

A továbbiakban már az egyes hajszálak fizikai tulajdonságainak részletes vizsgálatára összpontosítunk. Érdeemes megjegyezni, hogy a hajszálak anyagi tulajdonságai, például a vastagságuk vagy rugalmasságuk, nagy szórást mutathatnak egyénenként vagy akár ugyanazon személy hajszálain belül is. Különösen igaz ez eltérő életkorú egyének hajszálaira, illetve pl. az eredeti vagy kezelt (festett, göndörített) hajszálakra. Ezért fontos, hogy minden mérési eljárást többször megismételjünk, és az adatok átlagolásával minimalizáljuk az esetleges eltéréseket.

A hajszál rugalmassági tulajdonságainak pontos méréséhez először is elengedhetetlen a hajszál vastagságának meghatározása. Ez a mérés alapvetően két módszerrel végezhető el, amelyek célja, hogy mindenki számára könnyen hozzáférhető technikákat kínáljanak:

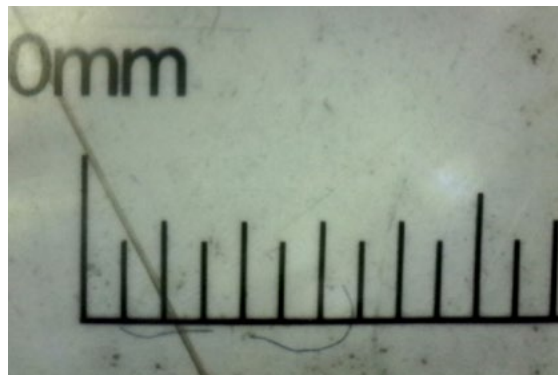
1. Mikroszkópos mérés: egy egyszerű nagyító vagy mikroszkóp segítségével vizsgáljuk meg a hajszálát, és a látómezőben látható skála vagy digitális mikroszkópos felvételnél pixelvonalzó segítségével határozzuk meg a vastagságát.
2. Diffrakciós mérés lézerpointerrel: ez a módszer a fény hullámtermészetén alapul, és egy lézerpointer segítségével egyszerűen elvégezhető. A hajszál árnyékán megjelenő elhajlási kép interferenciás mintázatot hoz létre, amelyből a hajszál vastagsága precízen kiszámítható. Ez a módszer nemcsak pontos, hanem látványos is, így kiválóan alkalmas arra, hogy a diákok érdeklődését felkeltse a fizika iránt.

(Ne feledkezzünk meg azonban egy harmadik – talán a legtriviálisabb – módszerről sem; tolómérővel, vagy egy kicsit pontosabb csavarmikrométerrel is mérhetünk, azonban ezek felbontóképessége nem éri el a fenti két módszerét, és nyomást is gyakorol a hajszálra.)

Mindkét mérési módszer megbízható adatokat szolgáltat, és a kettő alkalmazása egymást is ellenőrzi. A hajszál vastagságának meghatározása nem csupán az anyagszerkezeti tulajdonságok megértésében segít, hanem előkészíti a terepet a további kísérletekhez, például a rugalmassági vizsgálatokhoz. Az ezt követő fejezetekben ezeknek a módszereknek a részleteit és alkalmazási lépéseit tárgyaljuk.

1. Mikroszkópos mérés

A hajszálakat egy átlátszó, mm-skálával ellátott műanyaglemez alá helyeztük, majd egy olcsó, kb. százszoros nagyítással rendelkező digitális mikroszkóppal lefényképeztük. Egy ilyen fényképet mutat az 1. ábra. A képen az osztásköz és a hajszál vastagságát egy ingyenesen letölthető pixelvonalzó-alkalmazással megmértük, majd ezen értékekből egyenes arányosság alapján meghatároztuk a hajszál vastagságát.



1. ábra. Hajszál optikai mikroszkóppal készült képe, 1 osztásköz 0,5 mm nagyságú (saját fotó)

A hajszál vastagságát az alábbi módon számoltuk ki:

$$d = \frac{D_{\text{pix}}}{S_{\text{pix}}} S_{\text{mm}} \approx 0,05 \text{ mm},$$

ahol d a hajszál vastagsága (mm), $D_{\text{pix}} = 23 \pm 2$ a hajszál vastagsága pixelben, $S_{\text{pix}} = 458 \pm 2$ az 1 mm-es osztásköz hossza pixelben, $S_{\text{mm}} = 1$ mm (ennek nincs hibája).

A relatív hibaterjedést az alábbi módon számoltuk ki:

$$\frac{\Delta d}{d} = \sqrt{\left(\frac{\Delta D_{\text{pix}}}{D_{\text{pix}}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta S_{\text{pix}}}{S_{\text{pix}}}\right)^2} \rightarrow \Delta d \approx 0,004.$$

A hajszál vastagsága tehát: $(0,050 \pm 0,004)$ mm.

Megjegyezzük, hogyha nincs kéznél mikroszkóp, és nem akarunk pixelvonalzós szoftvert keresgélni, akkor mobiltelefonnal is készíthetünk egy jó minőségű képet a vonalzóról és a hajszálról, és egy ingyenes képnézegető (IrfanView) vagy képszerkesztő (Gimp) segítségével is meghatározható a hajszál vastagsága. Meg kell mérni, hogy hány pixel a vonalzó osztásköze, és hány pixel vastag a haj, és az eredmény a fenti arányossággal ugyanúgy kiszámolható.

2. Mérés fényinterferenciával

A kísérletben egy lézernyílásba irányítunk egy 1,76 méter távolságban lévő ernyőre úgy, hogy a lézersugár útjába celluxszal rögzítünk egy hajszálát (2. ábra). A hajszál vastagsága megfelelő a vörös lézer hullámhosszával való interferencia létrehozására, így az ernyőn tisztán megfigyelhetők az interferenciacsíkok, amelyeket a lézersugár diffrakciója eredményez (3. ábra).



2. ábra. A lézerpointer útjába helyezett hajszál (saját készítésű kép)

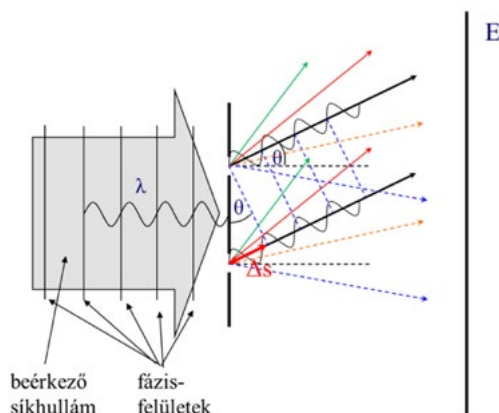
A kísérlet egyszerűsége és a szükséges eszközök széles körű elérhetősége elősegíti a fényhullám alaptulajdonságainak bemutatását az iskolai környezetben. A hajszál – amely vastagságában tipikusan az 50–100 mikrométeres tartományban mozog – nagyságrendjében közel van a vörös színű lézernyílás hullámhosszához (≈ 650 nm), így az interferenciacsíkok tisztán kirajzolódnak, ahogy azt a 3. ábra illusztrálja.



3. ábra. A hajszállal létrehozott diffrakciós kép (saját készítésű kép)

Az interferencia feltétele

A kétréses kísérletben a két nyíláshoz érkező fénysugarak koherensek (önmagukkal), hiszen ugyanazon elemi



4. ábra. Ábra a fényelhajlás és interferencia létrejöttének értelmezéséhez (saját készítésű ábra)

kibocsátásból származnak. A másik oldalon mindkét nyílásból indulnak fénysugarak (gömbhullámok) minden irányban, ahogy ezt a 4. ábra illusztrálja.

Tekintsük pl. a θ irányba induló, feketével jelölt fénysugarakat. Az E ernyőn kialakuló interferenciaképen a világos (maximumpontok) és sötét (minimumpontok) csíkok a két hullám közötti úttérítés miatt alakulnak ki. A maximumpontok helyén a hullámok azonos fázisban találkoznak, azaz az úttérítés a hullámhossz egész számú többszöröse:

$$\Delta s = m\lambda,$$

ahol m az interferenciamaximum rendje ($m = 0, 1, 2, \dots$). Esetünkben a hajszál két oldala veszi át a két rés szerepét; a két oldal által létrehozott elhajló hullámok közötti úttérítés a hajszál vastagságától (d) és a szögelhelyezkedéstől (θ) függ.

A maximumpontokat a következő geometriai összefüggés határozza meg:

$$\Delta s = d \sin \theta,$$

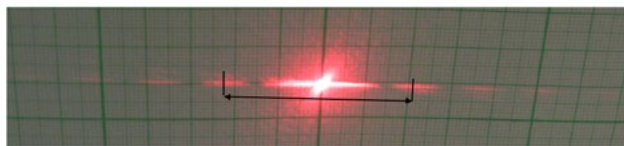
ahol θ az a szög, amely alatt a fény a maximumpontba érkezik. A θ szög kis értékei esetén $\sin \theta$ értéke jó közelítéssel helyettesíthető a tangenseivel:

$$\sin \theta \approx \tan \theta = \frac{y}{L},$$

ahol y a középpont és a maximumpont közötti távolság a képernyőn, L a hajszál és a képernyő közötti távolság (176 cm). Ezt behelyettesítve az úttérítés összefüggésébe, és d -t kifejezve

$$d = \frac{mL}{y}.$$

Az előbbieket alapján elvégeztük a mérést, melynek elvi elrendezését az 5. ábra felső része mutatja. A milliméterpapíron létrejött interferenciamaximumokat megjelöltük, az erről készült fotó látható az 5. ábra alsó részén.



5. ábra. Fent: a lézerpointerrel és a hajszállal létrehozott diffrakciós maximumok keletkezésének vázlata. Lent: a táblára vetített diffrakciós kép az $m = 2$ maximumhelyek jelölésével ($L = 176$ cm)

Az elsőrendű maximumhelyek távolsága nehezen olvasható (5. ábra lent), ezért a 2. és 3. rendű maximumhelyek távolságaival számoltunk. $m = 2$ esetén $\theta \approx 0,72^\circ$, míg $m = 3$ esetén $\theta \approx 1,2^\circ$, de mindkét esetben a szögek szinusza és tangense az első 5 tizedesjegyre megegyeznek, így a $\sin \theta \approx \tan \theta$ közelítés valóban alkalmazható. A másod- és harmadrendű maximumhelyek távolságai-

ból meghatározva a hajszál átlagos vastagsága

$$\bar{d} = (49,2 \pm 4) \mu\text{m}.$$

Összehasonlítás képpen a hajszál vastagságát egy 0,01 mm pontosságú csavarmikrométerrel is megmértük, ami $(0,05 \pm 0,005)$ mm értékűnek adódott. Látható, hogy a három érték hibahatáron belül azonosnak tekinthető.

A hajszálak mechanikai vizsgálata

A fésülködés közben fellépő erőhatások mérése

A kísérlet során egy egyszerű műanyag fésűt használtunk, amelynek fogbeosztása egyenlő közül volt. A fésűhöz egy cérnát erősítettünk, amelynek végére egy rugós erőmérőt rögzítettünk, ahogy a 6. ábrán is látható. A mérést úgy végeztük el, hogy a rugós erőmérőt folyamatosan terheltek, és a teljes folyamatot videóra vettük. Az erő változását az idő függvényében ábrázoltuk, így pontos képet kaptunk a fésülés során fellépő erőhatásokról.

Fontos megfigyelni, hogy a fésű megmozdításához a tapadási erőt kell legyőzni, amely a haj és a fésű között fellépő legnagyobb kezdeti ellenállás. Miután a fésű elindult, a mozgás folytatásához már kisebb erő szükséges, mivel a csúszási súrlódási erő kisebb a tapadási erőnél.

A következő lépés annak becslése, hogy egyetlen hajszálra mekkora erő jut ebből. Ehhez meg kell számolnunk, hogy a fésű húzása közben hány hajszálát érint. Ezt úgy végezhetjük el, hogy kiválasztunk két fésűfogat, és megszámoljuk, hogy a közöttük lévő részen hány hajszál található. Az így kapott értéket megszorozzuk a fésű fogainak számával (mínusz egy), hogy becslést kapjunk az összes húzott hajszál számára. Ha az átlagos erőhatást elosztjuk ezzel a számmal, megkapjuk azt az értéket, amely egy hajszálra esik.

Már kifésült haj esetén az alkalmazott erő 15 N volt. A fésű 64 fogból állt, de fésülés közben csak 33 fogközben volt haj, és két fog között átlagosan 117 hajszál helyezkedett el.

Az összes hajszál száma tehát:

$$117 \cdot (33) = 3861.$$

Az egy hajszálra eső erő:

$$\frac{15}{3861} \approx 0,004 \text{ N}.$$

Tehát egyetlen hajszálra körülbelül 0,004 N erő jut.

Egy másik módszerrel is ellenőrizhetjük a hajszálak számát. Ehhez a megszámolni kívánt hajcsomót kissé megcsavarjuk, hogy szoros, nagyjából henger alakú formát öltön, majd tolómérő segítségével megmérjük az átmérőjét.

Mivel a hajszálak átmérője ismert, és figyelembe vesszük a köztük lévő helykitöltést is, a hajszálak számát a

következőképpen számolhatjuk ki:

$$N = k \frac{A_{\text{csomó}}}{A_{\text{hajszál}}} = k \frac{\frac{\pi d_{\text{csomó}}^2}{4}}{\frac{\pi d_{\text{hajszál}}^2}{4}} = k \left(\frac{d_{\text{csomó}}}{d_{\text{hajszál}}} \right)^2,$$

ahol A a hajcsomó, illetve a hajszál keresztmetszetét jelöli. A helykitöltési tényező (k) értéke a hajszálak rendezettségétől függően általában 0,7 és 0,9 között van.



6. ábra. A fésülködés közben fellépő erőhatások mérése

A hajszálak nyújtásának vizsgálata

A hajszálak nyújthatóságának és szakítószilárdságának vizsgálatára egy nyújtópadot készítettünk, amely egy falemre applikált mérőszalagból állt (7. ábra). A hajszála-



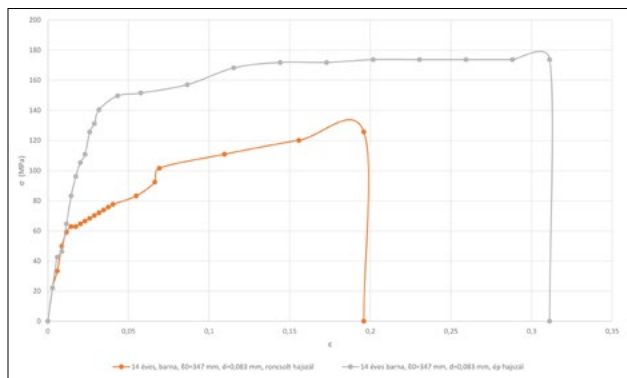
7. ábra. A hajszálak nyújtásának vizsgálatához készített „nyújtópad”, ami képes a hajszálak keresztmetszetének csökkenését is detektálni az előtérben látható mikroszkóp segítségével

kat iratcsipesszel fogtuk be, ügyelve arra, hogy a csipesz szorítása ne legyen túl erős, hogy elkerüljük a hajszál átvágását, de elég erős legyen ahhoz, hogy az ne csúszson ki. A megfelelő befogás ellenőrzésekor azt figyeltük, hogy a hajszál csipeszekből kilógó végei ne mozduljanak meg, valamint a szakadásnak a két csipesz közötti tartományban kell végbemennie.

A mérési elrendezésben az egyik csipeszt rögzítettük, míg a másikat egy rugós erőmérővel csatlakoztattuk. A hajszál folyamatosan növekvő terhelése mellett a teljes folyamatot videóra vettük egy speciális, fából készült állványra helyezett mobiltelefonnal. Vizsgáltunk fiatal és idős személyek esetén vastagabb és vékonyabb szálú, természetes és festett hajszálakat is.

A roncsolás hatása a mechanikai tulajdonságokra

A grafikon egyazon személy (14 éves barna hajú tanuló) hajszálainak feszültség-nyúlás görbéit mutatja. A két görbe összehasonlítása azt vizsgálja, hogy a haj szerkezeti roncsolódása hogyan befolyásolja a mechanikai tulajdonságokat.



8. ábra. A mikroszkópos vizsgálat során talált roncsolódott hajszál és az egészséges hajszálon elvégzett szakítási vizsgálat

Az ép hajszál (szürke görbe) lényegesen nagyobb feszültséget (≈ 190 MPa) képes elviselni, míg a roncsolt hajszál (narancssárga görbe, vegyi hatásnak kitett haj) 120 MPa körüli értéknél már eléri a szakadás előtti maximumot. A nyúlás is csökken: az ép haj kb. $\varepsilon = 0,3$ -ig nyúlik, mielőtt elszakadna, a roncsolt haj már $\varepsilon = 0,18$ körül szakad, vagyis kevésbé rugalmas, hamarabb szakad.

A roncsolt haj feszültség-nyúlás görbéje laposabb, vagyis hamarabb bekövetkezik a maradó alakváltozás. Megállapítható, hogy a roncsolás gyengíti a hajszálakat, csökkenti a szakítószilárdságukat és rugalmasságukat. A haj kevésbé lesz ellenálló a mechanikai igénybevétellel szemben, könnyebben elszakad és kevésbé képes visszanyerni eredeti alakját.

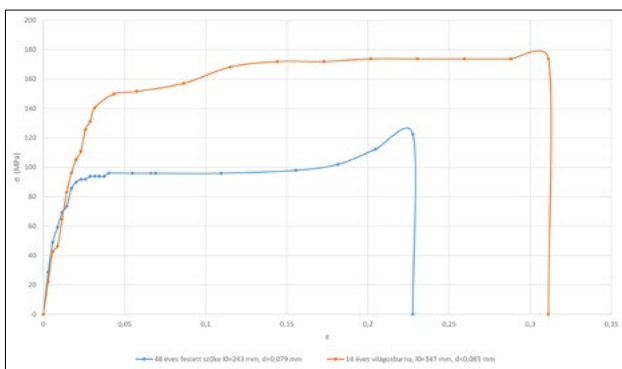
A különbség azt mutatja, hogy a haj belső szerkezeti integritása sérült, valószínűleg a külső behatások, pl. hő, kémiai kezelés vagy fizikai sérülések miatt.

A roncsolt haj tehát lényegesen gyengébb, kevésbé rugalmas, és hamarabb szakad, míg az ép hajszál nagyobb terhelést bír ki. A haj szerkezeti épségének megőrzése

(például kevesebb mechanikai vagy kémiai terhelés) tehát alapvető fontosságú a haj ellenállóképességének fenntartásához.

Rugalmassági és szakítószilárdsági különbségek

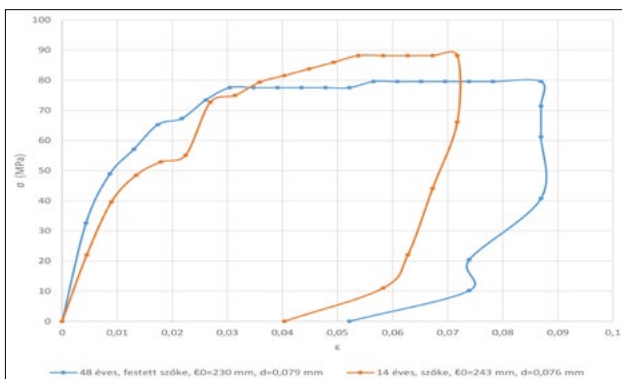
A fiatal, világosbarna személy haja (narancssárga görbe) nagyobb feszültséget bír ki, akár 190 MPa körüli értékig, míg az idősebb személy, festett szőke haja csak kb. 90 MPa-ig terhelhető. A fiatal személy haja nagyobb nyúlást is elér, kb. $\varepsilon = 0,28$, míg az idősebb személyé kb. $\varepsilon = 0,23$ értéknél szakad. A festett haj görbéjén kisebb lokális csúcsok is megfigyelhetők, ami a szerkezeti egyenetlenségek, például a festési eljárás okozta károsodások miatt lehet.



9. ábra. Különböző életkorú személyek hajszálainak szakítási vizsgálatból kapott grafikon

Plasztikus deformáció és rugalmasság

A világosbarna haj rugalmasabb, mert hosszabb szakáson viselkedik lineárisan, és nagyobb deformációt képes elviselni, mielőtt elszakad. A festett haj esetében a görbe hamarabb ellaposodik, ami azt jelenti, hogy hamarabb eléri a folyási határt, tehát kisebb terhelésre is maradó alakváltozás következik be.



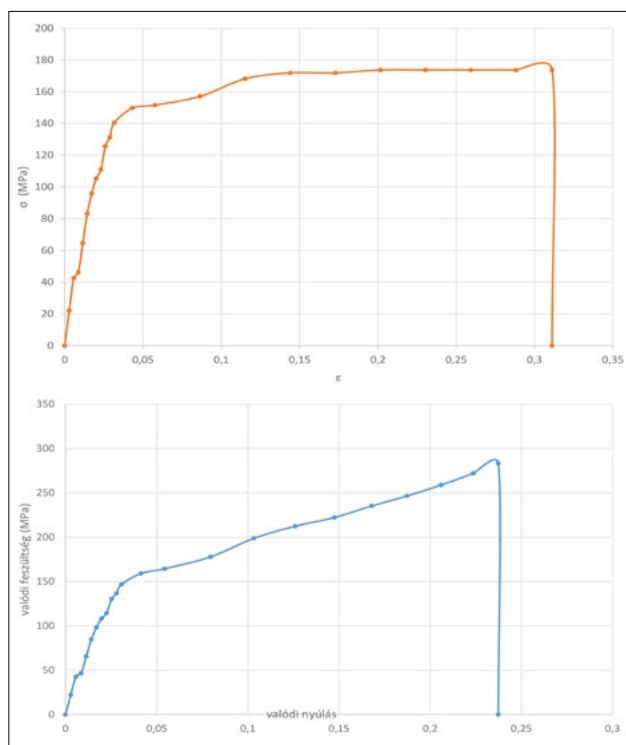
10. ábra. Egy 14 éves és egy 48 éves személy hajának hiszterézise, azonos maximális erőhatásnak kitéve (0,4 N)

A 10. ábrán bemutatott grafikon két különböző életkorú ember hajszálának mechanikai viselkedését ábrázolja a nyújtási vizsgálat során. Itt a terhelést a szakadás előtt, kb. 0,4 N maximumnál elkezdtük csökkenteni,

és az ábráról látható, hogy nem kaptunk zárt hiszterézis-hurkot, hanem nagyságrendileg 10 mm-es maradó megnyúlás jött létre ($\varepsilon \approx 4\text{--}5\%$). A fiatalabb személy hajszála (14 éves, szőke) nagyobb szakítószilárdságot mutat, azaz nagyobb maximális feszültséget bír el, kevésbé nyúlik meg a törés előtt, ami arra utal, hogy erősebb, rugalmasabb. Az idősebb személy (48 éves) festett hajszálának alacsonyabb szakítószilárdsága van, azaz hamarabb szakad el kisebb feszültség mellett, nagyobb nyúlást mutat a törés előtt, ami arra utalhat, hogy az életkor előrehaladtával és a festés hatására az anyagszerkezete megváltozott, elvesztette merevségét és szívósságát.

A valóságos nyúlás meghatározása

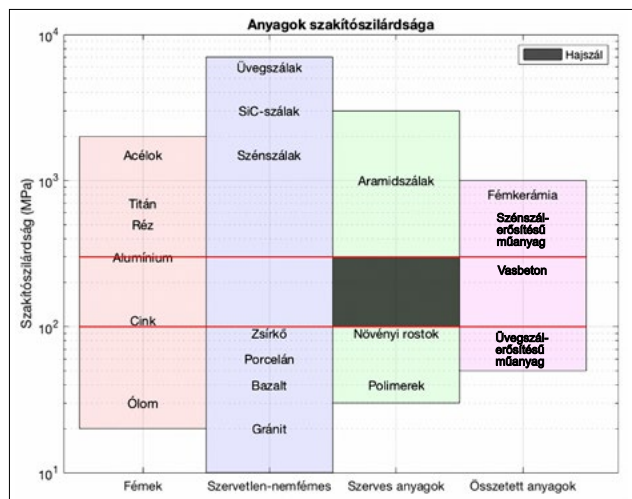
A hajszál egy részét mikroszkóppal is videóra rögzítettük, így a szakadás előtti állapotokban követni tudtuk a hajszál vastagságának csökkenését is. Az így mért pillanatnyi átmérőből meghatározott úgynevezett valódi feszültséget [2] is ábrázoltuk a relatív megnyúlás függvényében, így a 11. ábrán bemutatott diagramot kaptuk, ami a hajszál nyúlása során minden pillanatban a tényleges terhelést (feszültséget) mutatja. A legfontosabb azt látnunk, hogy a keményedés az egyenletes nyúlás határán túl is folytatódik; jöllehet a szakítódiagram utolsó szakaszában állandó az erő, a valódi feszültség tovább nő, ahogyan azt a 11. ábra alsó grafikonja szemlélteti. Jól elkülöníthető a rugalmas és a plasztikus deformációs tartomány.



11. ábra. A felső ábra nem veszi figyelembe a keresztmetszet változását, és a kezdeti keresztmetszettel számol, a relatív megnyúlás függvényében. Az alsó grafikon viszont már figyelembe veszi a keresztmetszet változását is a valódi nyúlás függvényében. A 14 éves tanuló világosbarna hajszálának kezdeti hossza 347 mm, átmérője pedig 0,083 mm

A húzófeszültség-megnyúlás grafikonról könnyen leolvashatjuk a szakítószilárdságot (a 11. ábra felső része): $\sigma_{\max} = 174 \text{ MPa}$, ez az érték hasonló néhány gyengébb minőségű alumíniumötvözetéhez vagy a növényi rostokhoz (12. ábra). A hajszál Young-modulusát is kiszámíthatjuk a 11. ábra alsó grafikonja rugalmas szakaszának meredekségéből: $\sigma_{v,1}/\varepsilon_{v,1} = 4735 \text{ MPa}$. A hajszálak főként a keratin nevű fehérjéből állnak, a keratin rugalmassági modulusa pedig körülbelül 2–5 GPa (2000–5000 MPa).

A hajszálak a rugalmassági modulusuk alapján viszonylag merev anyagnak tekinthetők, hiszen ellenállnak a rugalmas alakváltozásnak. Emellett szakítószilárdságuk alapján a középső tartományba esnek, így viszonylag erős anyagnak is tekinthetők (12. ábra).



12. ábra. A hajszál szakítószilárdságának összehasonlítása más anyagokkal (saját ábra)

Összegzés

A tanulmányban a legjellemzőbb mérési eredményeket mutattuk be; további részleteket – például, hogy a hajszálak tulajdonságai a páratartalomtól is függenek – most nem vizsgáltuk. Ennek ellenére számos következtetést vonhattunk le a hajszálak tulajdonságainak változásával kapcsolatban. A mérések többségében a sötétebb haj erősebbnek bizonyult (a melanoszómák miatt, amelyek csak a fekete hajban találhatók meg [3]). A festett haj gyengébb és nyúlékonyabb, ami összhangban van azzal a tapasztalati ténnyel, hogy a hajfestés károsítja a haj szerkezetét. A fiatalabb, festetlen egyén hajszála mechanikailag erősebb és ellenállóbb, kevésbé hajlamos a nyúlásra és törésre, ehelyett inkább szakadásra, míg az idősebb egyén hajának szilárdsága kisebb, valószínűleg az életkor következtében keletkező szerkezeti változások miatt.

A fésülködés során fellépő erő általában jóval a rugalmassági határ alatt marad, azonban gubancok vagy sérült hajszálak esetén károsodás léphet fel. A hajszálak épségének megőrzése érdekében érdemes kerülni az extrém hőhatásokat (a hajszárító helytelen használata), a vegyi kezeléseket (szőkítés, melírozás, festés gyakori alkal-

mazása) és az erős mechanikai igénybevételt (pl. hosszú hajszálak esetén a fésülködés előtt érdemes balzsammal csökkenteni a súrlódási együtthatót).

A fenti vizsgálatok otthon is könnyen elvégezhetők, ha megfelelő rugós erőmérőt kölcsönzünk diákjainknak. Így az egész család számára izgalmas mérések válnak elérhetővé. Fontos megjegyezni, hogy a húzási sebesség nagyjából 1 mm/s volt, bár a kézi mérés miatt ingadozott, és az erő fokozatos csökkentésére sem volt lehetőség. Mindezek ellenére a vizsgálat betekintést nyújt a mérnöki gyakorlatba, és hasznos tapasztalatokat kínál a diákok, főleg fodrásztanulók számára.

Köszönet dr. Borbély Venczelnek és Puskás Tivadarnak.

Irodalom

1. https://www.researchgate.net/publication/268987006_Changes_in_the_mechanical_parameters_of_hair_in_a_group_of_women_in_reproductive_age/figures?lo=1
2. Pék Lajos (2015): Anyagszerkezetan és anyagvizsgálat, Nyugat-magyarországi Egyetem Kiadó, Szombathely. https://oszk-dk.oszk.hu/storage/00/01/58/93/dd/1/Anyagszerkezetan_es_anyagvizsgalat.pdf
3. E. Berardesca, J. L. Leveque, H. I. Maibach (eds.) (2007): Ethnic Skin and Hair. CRC Press, p. 205