

UNIVERZITA KARLOVA V PRAZE

FARMACEUTICKÁ FAKULTA V HRADCI KRÁLOVÉ

Katedra biofyziky a fyzikální chemie

Strain-Stress křivky lidských vlasů

Diplomová práce

Vedoucí diplomová práce: Mgr. Monika Kuchařová, Ph.D.

Hradec Králové 2016

Michaela Kernerová

Prohlašuji, že tato práce je mým původním autorským dílem. Veškerá literatura a další zdroje, z nichž jsem při zpracování čerpala, jsou uvedeny v seznamu použité literatury a v práci řádně citovány. Práce nebyla využita k získání jiného nebo stejného titulu.

Souhlasím, aby moje práce byla volně k dispozici k nahlédnutí ke studijním účelům.

Hradec Králové

.....

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji své školitelce, paní Mgr. Monice Kuchařové PhD., za odborné vedení, ochotu a čas strávený se mnou v laboratoři a při opravování práce.

Dále bych chtěla poděkovat panu doc. RNDr. Petru Klemerovi, CSc., za velkou snahu pomoci při hledání řešení problémů spojených s přístrojem.

ABSTRAKT

Univerzita Karlova v Praze
Farmaceutická fakulta v Hradci Králové
Katedra biofyziky a fyzikální chemie

Kandidát: Michaela Kernerová

Školitel: Mgr. Monika Kuchařová, Ph.D.

Název diplomové práce: Strain-Stress křivky lidských vlasů

Katedra biofyziky a fyzikální chemie FaF UK zkoumá již řadu let vliv mechanického namáhání na biologické struktury. Lidský vlas je jedna z možných struktur, zajímavá pro další výzkum. Předmětem této práce je měření biomechanických vlastností vlasů a jejich kvalitativní srovnávání pomocí modulu pružnosti E a maximálního napětí σ_{\max} . Cílem práce je zhodnotit možnosti měření lidských vlasů pomocí dynamického viskoelastometru a proměřit statické charakteristiky (strain-stress křivky) lidských vlasů.

Teoretická část se zabývá anatomií kůže, detailně popisuje biomechanické vlastnosti a stavbu základního stavebního proteinu vlasu – keratinu. Další kapitola se zabývá anatomií vlasu, popisuje jednotlivé vrstvy průřezu vlasu. S ohledem na kosmetický aspekt důležitosti vlasů jsou v teoretické části zmíněny i časté kosmetické úpravy a hygienické návyky spojené s úpravou vlasů a jejich možný vliv na biomechaniku vlasu. Poslední kapitola teoretické části se věnuje rozboru a vlastnostem strain-stress křivky.

Experimentální část je zaměřena na popis uchycení vzorku a následného měření strain-stress křivek. Data ohledně základních hygienických a kosmetických návyků respondentů byla získána pomocí dotazníkového průzkumu. Následuje vyhodnocení na základě srovnání aritmetických průměrů hodnot modulu pružnosti E , který byl získán jako směrnice lineární části naměřených strain-stress křivek nebo maximálního napětí σ_{\max} . Jako nejvýznamnější se ukázala závislost modulu pružnosti E a maximálního napětí σ_{\max} na ploše průřezu vlasu.

V závěrečné části je uveden přehled výsledků práce. Shrnutí a okomentování výsledků je uvedeno v diskuzi práce.

ABSTRACT

Charles University in Prague

Faculty of Pharmacy in Hradec Králové

Department of Biophysics and Physical Chemistry

Candidate: Michaela Kernerová

Supervisor: Mgr. Monika Kuchařová, Ph.D.

Title of diploma thesis: Strain- stress curves of human hair

Department of Biophysics and Physical Chemistry Faculty of Pharmacy of Charles University in Hradec Králové studies since many years the influence of mechanical stress on biological structures. Human hair is one of these biological structures that turns out to be interesting for the further research. The subject of the thesis is to measure biomechanical properties of hair and their qualitative comparison by using Young's modulus E [MPa] and maximal stress σ_{\max} [MPa]. The aim of the thesis is to evaluate measuring potential of dynamic viscometer for measurement of static characteristics (strain-stress curves) of human hair.

The theoretical part focuses on the anatomy of skin and describes biomechanical properties and structure of basic hair protein – keratin. The following chapter is devoted to the anatomy of hair and describes its cross-section area layers. Considering that hair is also subjected to various cosmetics rituals, the theoretical part of the thesis lists out the most common cosmetic treatments and hygiene habits concerning hair and their possible influence on the biomechanics of hair. The last chapter of the theoretical part discusses properties of strain-stress curves

The experimental part describes the attachment of the sample and measuring process of strain-stress curves. The author conducted a survey via questionnaires in order to obtain data about basic hygiene and cosmetic habits of samples' donors. The following evaluation was obtained on the basis of comparison of arithmetic means of the Young's modulus E values, which was acquired as the slope of linear function of measured strain-stress curve or max stress depending on data collected from survey participants. The most important turned out to be the Young's modulus and maximal stress dependency on the cross-section area.

At the end, you can find overview of thesis results. The summary and commented results are to be found in the discussion.

Obsah

1. Úvod.....	- 9 -
2. Teoretická část.....	- 10 -
2.1 Kůže a její základní vlastnosti	- 10 -
2.1.1 Epidermis	- 10 -
2.1.2 Dermis	- 12 -
2.1.3 Hypodermis.....	- 14 -
2.2 Keratiny.....	- 15 -
2.2.1 Cytoskelet a intermediární filamenta.....	- 15 -
2.2.2 Základní rozdělení keratinů	- 17 -
2.2.3 Biomechanické vlastnosti keratinů.....	- 18 -
2.2.4 Další struktury nacházející se v lidském vlasu	- 22 -
2.3 Vlasy.....	- 25 -
2.3.1 Stavba vlasového folikulu.....	- 27 -
2.3.2 Rozdělení vlasových vrstev na průřezu vlasu.....	- 27 -
2.4 Stárnutí, biologický věk a další faktory ovlivňující kvalitu vlasu	- 31 -

2.4.1 Biologický věk	- 31 -
2.4.2 Stárnutí.....	- 31 -
2.4.3 Kouření.....	- 33 -
2.4.4 Sluneční záření.....	- 33 -
2.4.5 Vliv kosmetických přípravků na vnější a vnitřní struktury vlasu.....	- 36 -
2.4.5.1 Šampony a kondicionéry	- 36 -
2.4.5.2 Trvalá ondulace.....	- 37 -
2.4.5.3 Barvení vlasů.....	- 38 -
2.4.5.4 Odbarvení vlasu	- 39 -
2.4.5.5 Vysoušení vlasů.....	- 40 -
2.5 Mechanické vlastnosti lidských vlasů	- 41 -
2.5.1 Mechanické charakteristiky vlasu.....	- 41 -
2.5.2 Strain-stress křivka.....	- 42 -
2.5.3 Částečná linearizace strain-stress křivky	- 42 -
2.5.4 Diagnostické zhodnocení důležitosti mechanických parametrů ve vztahu k nehomogenní struktuře lidských vlasů.....	- 46 -
3. Experimentální část	- 48 -

3.1 Materiál	- 48 -
3.2 Měřicí aparatura	- 50 -
3.3 Metodika měření.....	- 52 -
3.4 Výsledky měření	- 61 -
3.5 Diskuze	- 69 -
4. Závěr.....	- 73 -
5. Seznam použité literatury	- 74 -
Seznam obrázků.....	- 82 -
Seznam tabulek	- 84 -

1. Úvod

Cílem této diplomové práce je proměřit statistické charakteristiky (strain-stress křivky) lidských vlasů lidí různého věku a zjistit jejich závislost na věku. Mechanická odpověď vlasů bude měřena na mechanickém viskoelastometru DELTER vyvinutém na našem pracovišti.

Práce vznikla na Katedře biofyziky a fyzikální chemie Farmaceutické fakulty Univerzity Karlovy v Hradci Králové. Oddělení biofyziky a Oddělení výpočetní techniky se zabývá výzkumem zaměřeným na aplikaci biofyzikálních, matematických, systémově-kybernetických a analytických metod v gerontologii, zejména v oblasti teorií stárnutí a jejich verifikace. K důležitým oblastem zájmu patří právě i metodika hodnocení biologického věku [1].

Do této doby byly na Katedře biofyziky a fyzikální chemie FaF UK zkoumány hlavně viskoelastické a biomechanické vlastnosti lidské kůže, případně vlastnosti cévních stěn a kostí. Práce jako první se zabývá biomechanikou lidského vlasu. Jak již bylo řečeno, cílem práce bylo zjistit statické charakteristiky a jejich závislost na věku jedince a odhadování biologického věku. Ale součástí práce byla i snaha zjistit, zda dynamický viskoelastometr je vůbec vhodný pro měření lidských vlasů, které jsou, z důvodu jejich mechanické odolnosti a zároveň průměru v řádu mikrometrů, značně obtížné pro správné uchycení. Výsledkem bylo proměření strain-stress křivek od 20 dobrovolníků.

V teoretické práci je popsána základní stavba kůže, ve které je vlas uchycen. Detailně je rozebrána bílkovina keratin, její stavba i biomechanické vlastnosti. Vzhledem k tomu, že zájem o lidské vlasy je výrazný i z kosmetického hlediska, obsahuje práce i základní přehled možných vlivů, které se podílejí na kvalitě vlasu a zároveň i souhrn nejčastěji používaných kosmetických procedur pro upravení vzhledu vlasu. Další kapitoly zaznamenávají stavbu vlasu a možnosti biomechanického zkoumání pomocí strain-stress křivky.

2. Teoretická část

2.1 Kůže a její základní vlastnosti

Vzhledem k tomu, že základním tématem práce jsou vlasy a jejich viskoelastické vlastnosti, v této kapitole nastíním základní funkce a složky kůže, které jsou přímo spojeny s funkcí a životem vlasu.

Kůže, *cutis*, řec. *derma*, je rozsáhlý plošný orgán tvořící zevní povrch organismu a tím i bariéru organismu vůči okolí. Mezi funkce kůže řadíme funkci ochrannou vůči fyzikálním, chemickým a mikrobiologickým noxám. Dále funkci termoregulační, kůže se účastní látkové výměny a podílí se na funkcích imunitního systému [2].

Kůže zaujímá kolem 15% celkové tělesné hmotnosti dospělého člověka a její povrch je udáván kolem 2m^2 [3]. Mezi základní vrstvy kůže řadíme:

- epidermis
- dermis
- hypodermis

2.1.1 Epidermis

Epidermis je povrchová vrstva tvořená epitelem ektodermového původu; je to co do stavby epitel vrstevnatý dlaždicový, v povrchových vrstvách zrohovatělý. Mimo základní buňky – keratinocyty – v různém stadiu jejich vývoje obsahuje i další (tzv. symbiotické) buňky: melanocyty, Langerhansovy buňky a Merkelovy buňky [2]. Keratinocyty tvoří až 95% z počtu všech buněk tvořících epidermis. Epidermis je rozdělena na 4 hlavní vrstvy dle diferenciaci keratinocytů [3]. Jedná se o neustále keratinizující nebo rohovatějící vrstevnatý epitel, končící v mukokutánních spojích (např. v ústech). Její struktura je přerušována póry potních a mazových žláz a dále vlasovými folikuly [4]. V literatuře se můžeme setkat s několika možnostmi dělení těchto vrstev, např. Čihák uvádí 5 dále popsaných hlavních vrstev.

- *Stratum germinativum* je vrstva zárodečná; rozlišují se v ní další dvě vrstvy:
 - *Stratum basale (cylindricum)* – jedna vrstva vyšších buněk při bazální membráně, v níž probíhá buněčné dělení a vznik nových buněk [2]. Bazální membrána odděluje epidermis

od dermis. Krom toho, že je místem, kde dochází ke zrání keratinocytů, nacházejí se zde též další keratinocyty s vlastnostmi podobnými kmenovým buňkám, dále Merkelovy buňky, které zprostředkovávají přenos smyslových vjemů k zakončení senzoričkových nervových vláken a melanocyty, jež produkují důležitý pigment melanin. Melanin působí fotoprotektivně a dává kůži její zbarvení [3][4]. Proces zrání keratinocytů trvá u zdravých jedinců až 40 dní a končí vytvořením vrstvy zvané *stratum corneum*. V případě nemocí, jako je např. psoriáza, je tento proces daleko kratší [3].

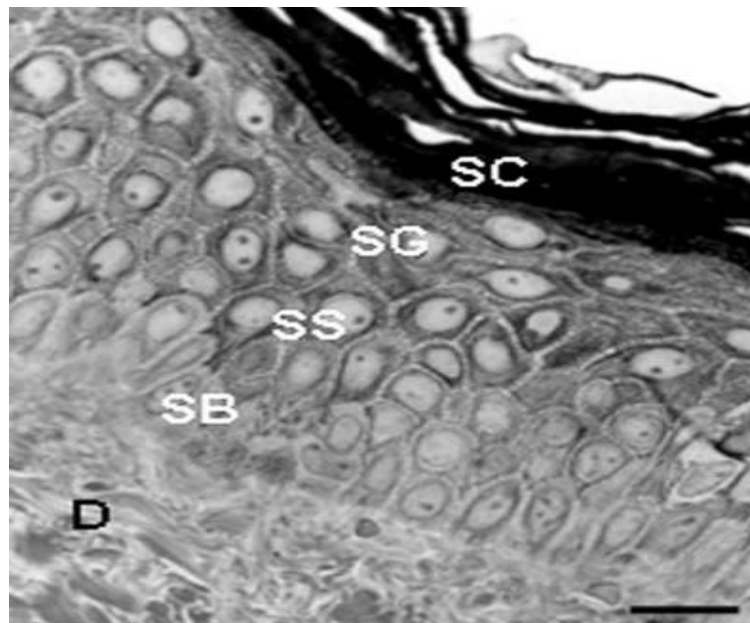
- *Stratum spinosum* – navazuje na *stratum basale*; buňky se v něm ve 2-5 vrstvách směrem k povrchu oplošťují do tvaru, který je na kolmém řezu kopinatý nebo polyedrický [2]. Nacházejí se zde ochranné Langerhansovy buňky, které jsou příbuzné buňkám kostní dřeně a plní zde funkci imunitního systému – hledají a vychytávají cizorodé částice [4].

Dalšími vrstvami epidermis směrem k povrchu jsou:

- *Stratum granulosum*, obsahující 1-3 vrstvy buněk, kde se v buňkách začínají vytvářet zrna keratohyalinu (což je prekursor keratinu, uložený ve formě submikroskopických granul mezi tonofilamenty keratinocytů). Buňky postupují k povrchu, diferencují se a nakonec podléhají buněčné smrti. Současně s pohybem směrem k povrchu probíhá degradace jádra a organel. Buněčná membrána se stává silnější a až překvapivě nepropustná. Nakonec dochází k buněčné smrti buněk [2][4]. Poté přecházejí v buňky vrstvy zvané:
- *Stratum lucidum*, což je tenká vrstva, nápadnější v tlustší epidermis na dlani nebo na chodidle. Buňky této vrstvy obsahují eleidin (což je další prekursor keratinu obalující tonofilamenta); *stratum lucidum* přechází přesnou hranicí ve:
- *Stratum corneum*; tato vrstva je složena z plně zrohovatělých buněk; jsou to bezjaderné keratinocyty (někdy označované jako rohové buňky – korneocyty); v kůži jsou pevně sestaveny v 15-25 vrstvách (na chodidle až ve 100 vrstvách) a jsou to vlastně odumřelé buňky [2].

Korneocyty mají silný, ve vodě nerozpustný obal složený z loricrinu a involucrinu a dále z intercelulárních lipidů (ceramidů, sterolů a volných mastných kyselin), jsou uvolňovány z níže položené granulární vrstvy [3].

- *Stratum disjunctum*: nejvyšší vrstva složená z bezjaderných keratinocytů (korneocytů). Průběžně se rozděluje v jednotlivé zbytky buněk, ty se pak postupně odlučují a odpadávají. Keratin, jímž jsou buňky ve *stratum corneum* vyplněny, je vláknitá bílkovina, specifický produkt keratinocytů. V intercelulárních prostorech je pak tmelová substance, která spojuje *stratum corneum* v jednotnou lamelu a při tom zabraňuje průniku mnoha látek skrze epidermis [2]. V jednotlivých vrstvách epidermis se množství keratinu pohybuje asi od 30 % v *s. basale* do přibližně 80 % v *s. corneum* [4]. Jednotlivé vrstvy epidermis jsou znázorněny na Obr. 1.



Obr. 1: Snímek ze světelného mikroskopu s vysokým rozlišením zobrazující jednotlivé vrstvy epidermis a dermis (D), S. Corneum (SC), S. Granulosum (SG), S. Spinosum (SS), S. Basale (SB), měřítko 30 μ M[4].

2.1.2 Dermis

Dermis se nachází pod epidermis, dokáže absorbovat a tlumit nárazy. Je rozdělena na 2 části a to na část vrchní, papilární a část spodní, retikulární [4].

Papilární část je v těsném kontaktu s epidermis a je bohatě prokrvena díky cévnímu zásobení. Dále se zde nacházejí zakončení sensorických nervů.

Retikulární část je označována za hlavní část dermis [3]. V některých publikacích se toto rozdělení vytrácí a funkce dermis i jejích hlavních makromolekul, kolagenu a elastinu, je zahrnuta do vlastností extracelulární matrix [4]. Přestože dermis obsahuje daleko méně buněk, než epidermis, zastupuje daleko větší část ve stavbě kůže. Většinu tohoto objemu nezaujímají jednotlivé vrstvy, ale vláknitá a amorfnní extracelulární matrix. Extracelulární matrix je prostoupena kožními adnexy, nervovými zakončeními, cévami, kožními receptory atd.

Hlavním typem buněk v dermis jsou fibroblasty a různé migrační buňky, které tvoří a degradují extracelulární matrix. Fibroblasty vynikají schopností zvýšit svou syntetickou a proliferativní aktivitu v průběhu procesu hojení. Jsou zde též zastoupeny buňky imunitního systému - mastocyty a makrofágy, jež krom jiného, mohou uvolňovat histamin, který je jedním z hlavních mediátorů alergických reakcí.

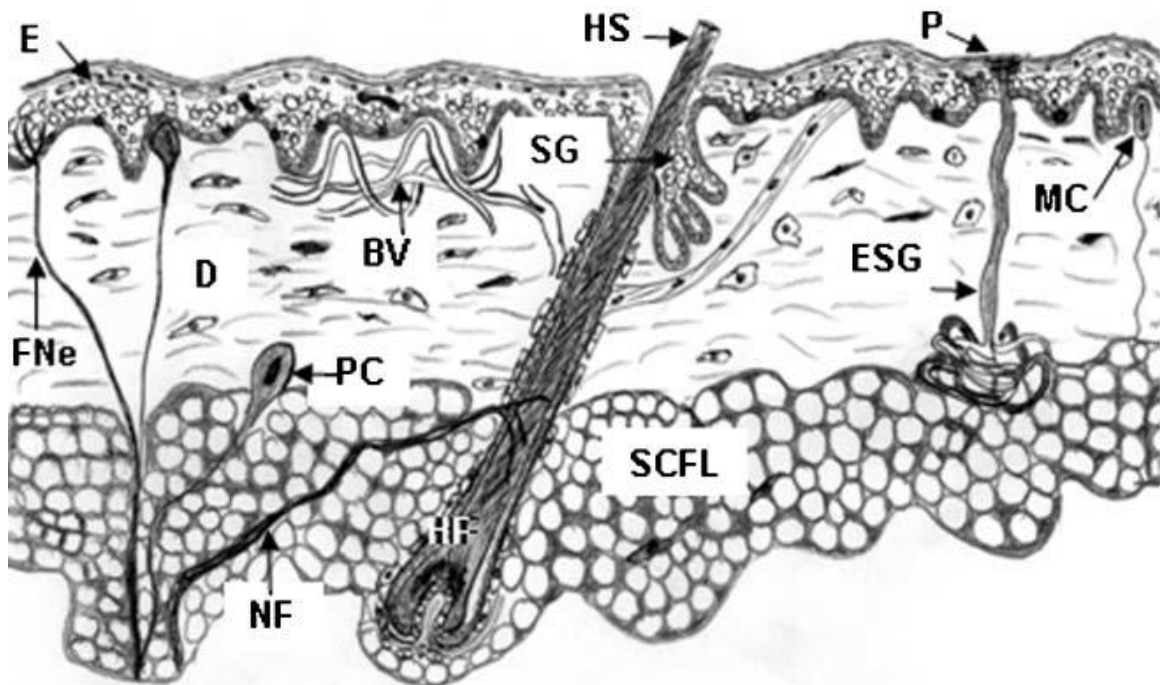
Většina funkcí dermis je zprostředkována skrze extracelulární matrix, což je vysoce komplexní směs bioaktivních makromolekul produkovaná buňkami dermis. Tyto molekuly jsou buď sekretovány v nezměněné formě nebo se shlukují vně buněk pro pozdější použití. Obecně se extracelulární matrix skládá z velkých oligomerů jednoho nebo více polypeptidů, které spolu tvoří těsné spoje pomocí uspořádání se do coiled-coil nebo super-coiled struktury. Detailně bude tato struktura popsána v další kapitole.

Hlavní složkou extracelulární matrix jsou kolageny, dále jsou obsaženy: elastin, fibrilin, fibulin, laminin, proteoglykany, integriny a mnoho dalších [4]. Kolageny zaujímají kolem 90% všech proteinů obsažených v dermis a tvoří až 75% váhy vysušené kůže [5]. Zatím je objeveno 25 různých typů kolagenů. V kůži se nejčastěji vyskytuje kolagen typu I (85-90%), III (8-11%) a V (2-4%). Kolageny zajišťují tkáňovou integritu, novotvorbu a též se podílejí na agregaci krevních destiček. Jsou nezbytné pro přilnavost epidermis a dermis.

Elastin je další významnou složkou extracelulární matrix. Je to vysoce zesíťovaný protein, který je součástí amorfnní části vlákna zajišťujícího elasticitu, je schopen se protáhnout na několiknásobek své klidové délky. Mikrofibrilární část vlákna je složena hlavně z fibrilinu 1 – velkého glykoproteinu, jehož jednotlivé části jsou spojeny vápenatými ionty, které zajišťují stabilitu molekuly [4]. Elastin zaujímá 4% sušiny [5].

2.1.3 Hypodermis

Hypodermis spolu s dermis zprostředkovává spojení kůže s vazivovým povrchem svalů a kostí. V jiných místech řídké vazivo dovoluje posuny kůže např. nad kontrahujícími svaly. V podkožním vazivu jsou buňky tukové tkáně, které tvoří významnou energetickou rezervu a mají i tepelně izolační funkce. V obou vrstvách jsou přítomny také lymfocyty a makrofágy. V některých částech těla jsou na vazivová vlákna dermis napojeny snopce příčně pruhovaných svalů (mimické svaly) nebo hladké svaloviny (např. skrotum, prsní bradavky a dvorce) [6]. Celkové vyobrazení lidské kůže zachycuje Obr. 2.



Obr. 2: Vyobrazení lidské kůže zachycující epidermis (E), dermis (D), podkožní tukovou vrstvu (SCFL), a kožní adnexa zahrnující vlasový folikul (HF) a vlasovou pochvu (HS), mazovou žlázu (SG), ekrinní potní žlázu (ESG), Meissnerovo tělísko (MC) a Pacciniho tělíska (PC) (senzorická nervová zakončení), krevní vlasečnice (BV), vyústění potních žláz (P), nervové vlákno (NF) a volné nervové zakončení (NFe) [4].

2.2 Keratiny

2.2.1 Cytoskelet a intermediární filamenta

Keratiny jsou součástí široké skupiny vláknitých proteinů buněčného cytoskeletu. Ten zahrnuje 3 hlavní vláknité systémy. Aktinová mikrofilamenta (MFs), mikrotubuly (MTs) a intermediární filamenta (IFs). Označení intermediární filamenta vychází z jejich průměru (10-12 nm), což je mezi hodnotami průměrů vláken MTs (25 nm) a MFs (7 – 10 nm). Tyto systémy společně zajišťují mechanickou celistvost a odolnost buňky a zaujímají zásadní roli v procesech buněčného dělení, pohybu a plasticity. IFs se svými strukturálními vlastnostmi jasně odlišují od obou dalších vláknitých systémů.

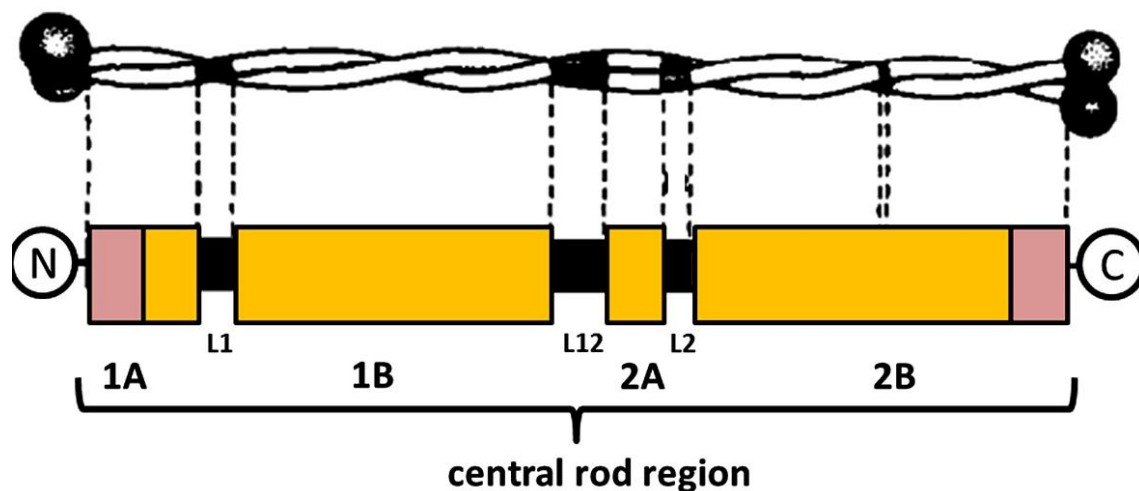
1. základní stavební jednotkou MFs a MTs jsou proteiny globulárního charakteru. Jedná se o monomerní aktin a heterodimer $\alpha\beta$ -tubulin, zatímco základní jednotkou IFs je protáhlý (~45 nm) a úzký (~2-3 nm) tyčinkovitý (rod-like) dimer. Osy základních dimerů jsou zarovnané přibližně paralelně k ose vlákna, zatímco šířka vlákna je kontrolována specifickým laterálním spojením dimerů.

2. aktinová MFs i MTs jsou polárního charakteru, což umožňuje aktivní transport souvisejících motorových proteinů, jako jsou myoziny a kinesiny, podél těchto vláken. Naopak shluky IFs jsou nepolární. Jednotlivé dimery jsou orientovány oběma směry “nahoru i dolů” podél vlákna.

3. IFs se *in vivo* zdají být nejdynamičtější ze všech 3 typů vláken. Zejména vratný proces disociace – asociace dimerů IFs, ke kterému může docházet v průběhu délky celého vlákna a nejenom na jeho koncích, jak je tomu u MTs a MFs [7].

Ačkoli se vyskytují odlišnosti ve velikosti (40-240kDa) a struktuře, všechny proteiny, jež se následně podílejí na stavbě IFs, mají stejné strukturální znaky. Mezi ně patří tyčinkovitá α -helixová doména stálé délky, která v sobě zahrnuje 4 heptapeptidové repetice obsahující segmenty (1A, 1B, 2A a 2B), které jsou přerušeny 3 krátkými spojovacími sekvencemi (L1, L12 a L2) a mají své stálé umístění [8][9]. Spojovací sekvence nejsou součástí spirálovité struktury (Obr. 3) [10]. Tato základní tyčinkovitá doména podporuje vlastní shlukování do struktury intermediárních filament. Části proteinů, jež také nejsou součástí centrální α -helixové spirály umístěné na N-konci (head) a C-konci (tail) se účastní tvorby, organizace a vzniku IFs např. skrze posttranslační modifikace a interakce s dalšími proteiny. Proteiny IFs snadno formují

coiled-coil dimery tak, že iniciují polymerizační reakce s dalšími zúčastněnými řetězci seřazenými paralelně v řadě [8].

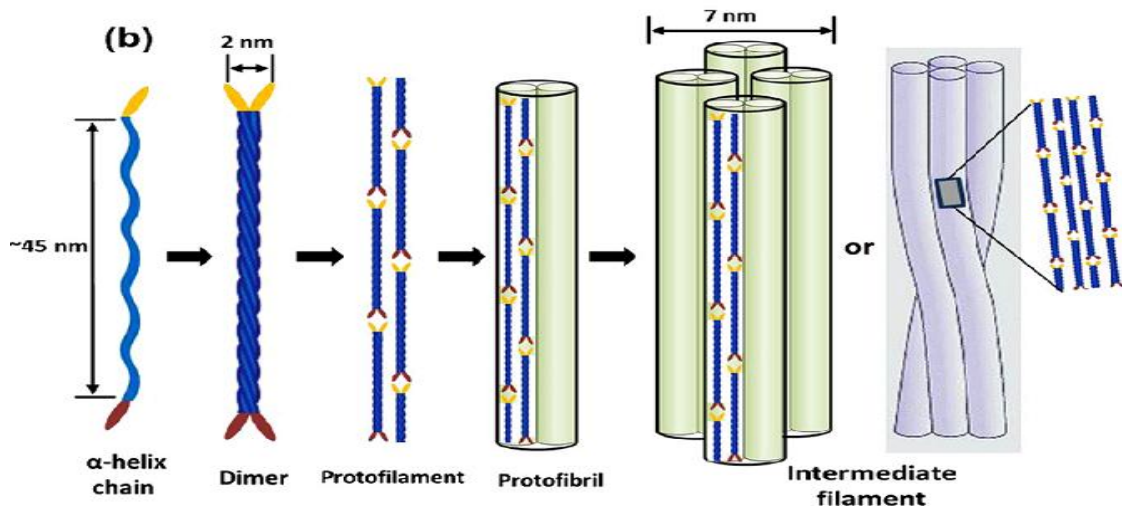


Obr. 3: Detailní molekulární struktura: intermediární filamentum se skládá z C- a N- konce, které nejsou součástí centrální spirálovité struktury. C- a N- konce spojují IF vzájemně a s matrix. Centrální část (46 nm na délku) obsahuje 4 α -helikální coiled-coil spirálovité struktury (1A,1B,2A, 2B) a 3 nespirálovité spojovací sekvence (L1, L12, L2) [10].

Coiled-coil je α -helixová konformace nacházející se v polypeptidovém řetězci. Je strukturou, ve které se nejčastěji 2 nebo více pravotočivých α -helixových spirál ovíjí levotočivě kolem sebe za účelem skrytí hydrofobních zbytků. Vznikající konformaci můžeme označit jako “superhelixovou“. V její sekvenci se vyskytují charakteristické heptapeptidové repeticce [7][11][12]. Přirozeně vyskytující se α -helixové struktury nacházející se v proteinech jsou vždy pravotočivé. Spirálovitá struktura je stabilizována vodíkovými můstky uvnitř helixového řetězce, které způsobují, že se řetězec stáčí a dotváří tvar spirály. Podélným spojením bočních stran antiparalelně a stupňovitě seřazených coiled-coil dimerů se současným překrytím smyček 1B subdomén dojde ke vzniku apolárního tetrameru [8].

Celý proces tvorby intermediárního filamenta je tedy složen z následujících kroků: 2 izolované pravotočivé α -helixové řetězce zformují levotočivou coiled-coil strukturu. Jedná se o dimer (45 nm dlouhý), který se formuje díky tvorbě disulfidických můstků mezi cysteinovými zbytky. Následně se konce jednotlivých dimerů spojují a střídavě se řadí bok po boku za vzniku protofilament (kolem 2 nm v průměru) [9]. Ze dvou protofilament, která se bočně spojí, vzniká protofibrila. Spojením 4 protofibril do cirkulárního nebo spirálovitého tvaru vzniká intermediární filamentum (průměr 7 nm) (Obr. 4). Je tedy zřejmé, že pro intermediární filamentum je základní coiled-coil struktura. Následně se intermediární filamenta srolují do supercoilové

konformace a spojí se s proteiny matrix. Na síru bohatá amorfnní keratinová hmota je složena z proteinových řetězců, jež obsahují vysoké množství cysteinových zbytků a též tyrosinových, glycinových a fenylalaninových zbytků [10].



Obr. 4: Schematické znázornění tvorby intermediárních filament: α -helixové šroubovice se stáčejí a formují dimery, které se následně shlukují a formují protofilamenta. Ze 4 protofilament, která se bočně spojí, vzniká protofibrila. Spojením 4 protofibril se stává intermediární filamentum [10].

2.2.2 Základní rozdělení keratinů

Keratiny patří k nejčastěji se vyskytujícím proteinům v epitelálních buňkách a spolu s kolagenem mezi nejdůležitější živočišné biopolymery. Jsou jednou z hlavních stavebních složek vlasů, nehtů a kůže. Vyznačují se vysokým množstvím cysteinu v molekule a svou odolností a nereaktivností vůči okolnímu prostředí. Z biomechanických vlastností vynikají tuhostí a zároveň vysokým modulem pružnosti, ačkoli jsou téměř výhradně složeny z polymerních složek a zřídka obsahují minerály. Tyto přírodní polymerní sloučeniny vykazují komplexní hierarchickou strukturu [10].

Můžeme je definovat na základě různých mechanismů

1. Z hlediska rozdílné biosyntézy a následně i odlišného smyslového vjemu na tvrdé a měkké keratiny. Měkké keratiny se nacházejí v epidermis. Tvrdé keratiny obvykle dále rozdělujeme na tvrdé (hard) α -keratiny (založeny na α -helixové konformaci), nacházející se u savců v derivátech epidermis (vlasy, chlupy, nehty, rohy atd.) a β – keratiny, též označované jako ptačí keratiny, (konformace β -skládaný list), nacházející se v tkáních ptáků a plazů [13].

2. Na základě Rentgenovy difrakční analýzy (metoda určená pro zjištění krystalické struktury látek, kdy rozměry krystalové mřížky jsou srovnatelné s vlnovou

délkou Rentgenova záření nebo jejími celými násobky) dochází na krystalové mřížce k ohybu (difrakci) záření. Difrakční vzor po průchodu krystalem je v poměrně dobrém vztahu se strukturou krystalu [10][14]. Tato metoda se používá při zkoumání keratinu a keratinových materiálů. S její pomocí dělíme keratiny na 4 typy vzorů. To jsou α -vzor, β -vzor, vzor typický pro peří a amorfní vzor [10].

3. Nový nomenklaturní konsensus rozděluje keratiny na základě genů, jež je kódují. Uspořádává funkční geny a pseudogeny, jež klasifikuje na 54 funkčních keratinových genů jako epiteliální a vlasové keratiny (28 keratin-kódujících genů typu I se 17 epiteliálními a 11 vlasovými a 26 keratin-kódujících genů typu II s 20 epiteliálními a 6 vlasovými keratiny) [10][15].

Lidský vlas tedy svou strukturou odpovídá tvrdému α -keratinu a jeho stavbu můžeme považovat za vzorovou pro většinu intermediárních filament (IFs) [13].

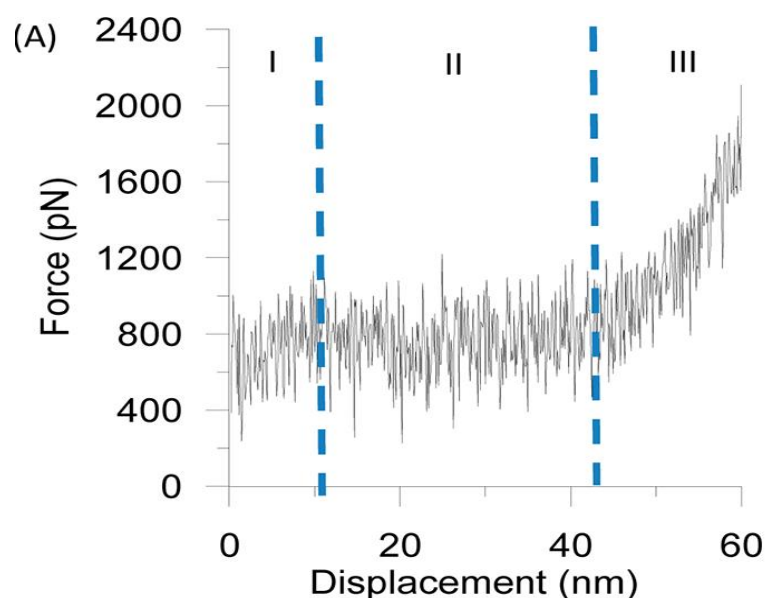
Vlákná α -keratinu označujeme jako IFs s velikostí 7-10 nm v průměru. Pro filamenta β -keratinu je typická velikost 3-4 nm. Rozdíl ve velikosti vláken odpovídá i odlišným vzorům. Kromě toho se liší složením. Pro α -keratin je typických několik proteinů s nízkým obsahem atomů síry, tyto slouží pro tvorbu intermediárních filament, zatímco matrix se skládá z proteinů s vysokým obsahem síry v molekule a dále s významným zastoupením aminokyselin glycinu a tyrosinu. Naopak vlákná β -keratinu jsou vždy shodného složení. Nakonec i molekulová hmotnost α -keratinu se pohybuje v rozmezí 40-68 kDa, což je mnohem více než u β -keratinu, jehož molekulová hmotnost je 10-22 kDa. Rozdíly v molekulární struktuře a formování vláken, jsou jedny z nejdůležitějších, jež odlišují α - a β -keratiny [10].

Keratiny nacházející se ve vlasech – trichocytární keratiny se obvykle dělí na 2 typy. Keratiny I. typu (k31 – k40), které obsahují aminokyseliny, jež dávají výslednému vláknu neutrální nebo bazický charakter a keratiny II. typu (k81 – k86), které jsou naopak kyselého charakteru. Na rozdíl od ostatních IFs, keratinová IFs jsou heterodimery, kdy se v 1 heterodimeru vyskytuje keratin typu I a keratin typu II. Keratinové homodimery jsou značně nestabilní [9].

2.2.3 Biomechanické vlastnosti keratinů

Mechanické vlastnosti α -keratinů na molekulární úrovni byly studovány experimentálně skrze atomární simulaci za účelem porozumění procesům, které probíhají při deformaci a ruptuře proteinového řetězce.

Pro výzkum na molekulární úrovni Chia-Ching Chou a Markus J. Buehler využívají simulace za vzniku křivky závislosti tahové síly na prodloužení (tensile force – displacement curve). Pokus probíhá na α -keratinovém heterodimeru a zkráceném tetrameru. Při protahování heterodimeru se v první oblasti křivky použitá síla zvyšuje lineárně s prodloužením až do okamžiku ruptury vodíkových vazeb a rozvolnění α -helixové struktury. V druhé části křivky použitá síla kolísá kolem hodnoty, při které se α – spirálovité domény dimeru začínají rozkládat. Ve třetí části se síla rapidně zvyšuje spolu s prodloužením z důvodu protažení kovalentních vazeb základního polypeptidového řetězce. Heterodimer je protahován až do okamžiku, kdy jsou všechny spirálovité domény plně protaženy (Obr. 5) [9].

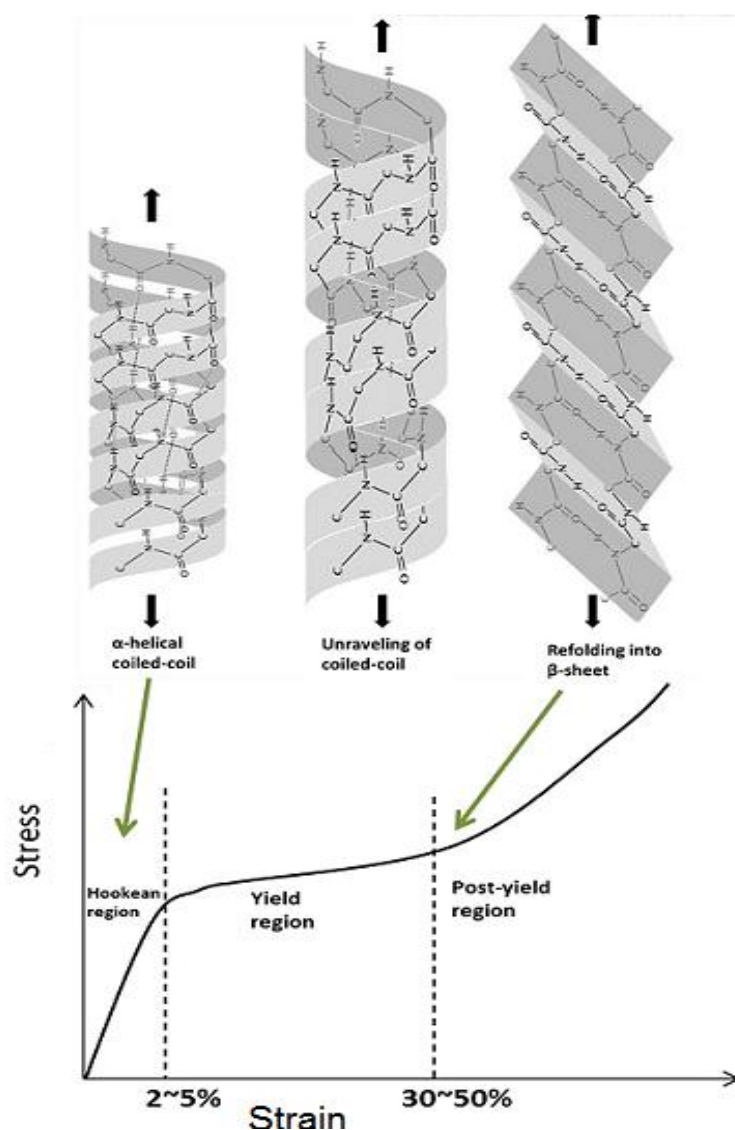


Obr. 5: Křivka závislosti tahové síly na deformaci [9].

Při testování zkráceného tetrameru se dostáváme k nanomechanice vlákna s a bez disulfidických vazeb. Tetramer se skládá ze 2 heterodimerů spojených disulfidickými vazbami. První část křivky tetrameru s disulfidickými vazbami vykazuje stejný průběh jako u heterodimeru. To znamená, že se síla zvyšuje lineárně s prodloužením až do prasknutí vodíkových vazeb a rozvolnění α -helixové struktury. Dále platí, že se síla zvyšuje až k bodu, ve kterém dojde k ruptuře disulfidických vazeb mezi dvěma dimery, což dokazuje posilující vliv disulfidických vazeb. U tetrameru, ve kterém byly porušeny disulfidické vazby, najdeme opět stejný průběh první části

křivky, ale rozdíl je v druhé a třetí oblasti, kdy tažná síla klesá a dochází k rozkladu tetrameru z důvodu posunování a štěpení vodíkových vazeb [9].

Ze vzorů Rentgenovy difrakční analýzy můžeme pozorovat přeměnu α -helixové struktury do struktury β -skládaného listu, která je způsobena vlivem rostoucího napětí. Při protahování α -keratinového proteinového řetězce dochází k reformování vodíkových vazeb, α -spirálovitá coiled-coil doména se postupně rozplétá a znovu se spojuje do struktury β -skládaného listu, která je zároveň prostorově výraznější. Změnu je možné pozorovat na křivce závislosti napětí na deformaci (strain – stress curve), (Obr. 6) [10].



Obr. 6: Schematické znázornění změny uspořádání z konformace α -helix na β -skládaný list v průběhu protahování. Šipky ukazují směr protahování. Strain-stress křivka s vyznačením Hookeova regionu, oblasti kluzu a meze pevnosti [10].

Na křivce závislosti napětí na deformaci můžeme opět pozorovat tři odlišné oblasti. Přibližně lineární Hookeův region (do protažení 2-5%), kde dochází k protažení α -helixové struktury, a postavení vodíkových vazeb je pozměněno, ale nejsou patrné podstatné strukturální změny. Dále oblast kluzu - yield region, kde je protažení v rozmezí od 2-5% až do 30-50% a α -helikální coiled coil domény se začínají rozvolňovat a reformovat do struktury β -skládaného listu. Poslední je mez pevnosti - post-yield region s nejvyšším sklonem křivky, kde dochází k dokončení transformace a většinou strukturou je β -skládaný list. Tato přeměna dodá soustavě větší schopnost absorpce energie, důkazem je významně větší plocha pod křivkou (area under the counter). Poté, co přestane působit napětí, se část energie znovu uvolní [16].

Dále vlas můžeme charakterizovat z pohledu viskoelastického. Vlas není čistě viskózním ani čistě elastickým materiálem. Zásadní význam viskoelasticity pro keratinové tkáně plyne nejen z poskytování mechanické podpory pro zachování tvaru, ale také ze schopnosti absorbovat energii a tlumit její výkyvy při zatížení. Napětí, jemuž je vystaveno keratinové vlákno se rozkládá do longitudinálních a transversálních vln, Tento rozklad je zvýrazněn viskózní složkou, z důvodu propojení svazků keratinových vláken slabšími vazebnými interakcemi, než jsou vazby v základních proteinových řetězcích. Tyto slabší vazebné interakce umožňují jednotlivým řetězcům vykonávat vzájemný klouzavý pohyb, a dále procesy reorganizace struktury řetězců pod vlivem napětí [10].

Viskoelastická pevná látka prochází při namáhání fází toku (závislost deformace na čase při konstantním napětí, resp. přesněji zatížení) a relaxace napětí (závislost napětí na čase při konstantní deformaci) [17].

Jedním z důsledků viskoelasticity je citlivost materiálů na rychlost deformace. Důkazem jsou odlišné mechanické vlastnosti závislé právě na rychlosti deformace a možná změna chování materiálu z plastického (nebo pseudoplastického) na křehké při vyšší rychlosti namáhání [18].

Dalším vlivem, který se podílí na mechanickém chování vlasu, je obsah vody. Se zvyšující se vlhkostí tuhost a pevnost klesá, zatímco velikost deformace (breaking strain), při které dochází k ruptuře vlákna, se zvyšuje [10]. Proteiny matrix můžeme považovat za hydrosenzitivní, zatímco proteiny IFs jsou krystalické a jejich mechanické vlastnosti nejsou vodní složkou ovlivněny [19].

Vliv vody je vysvětlován různými mechanismy:

- Vytvořením sítě molekul vody řetězci, které následně nabobtnají. Poruší se meziřetězcové vazby a zvětší se prostory mezi jednotlivými řetězci [10].
- Přerušením nebo nahrazením slabších sekundárních vazebných interakcí, jako jsou vodíkové vazby mezi proteiny bohatými na glycin/tyrosin v matrix a následným zvýšením mobility proteinů matrix [19].
- Vytvořením trojrozměrné sítě molekul vody a keratinu, která funguje jako plastifikátor, snižuje tuhost a zvyšuje částečnou mobilitu matrix [10].

2.2.4 Další struktury nacházející se v lidském vlasu

Desmosomy

- Jsou velmi důležité pro adhezi buněk epitelových tkání. Jednou z hlavních strukturálních součástí desmosomů jsou zástupci ze skupiny desmosomálních kadherinů, kam patří např. desmogleiny a desmocolliny [20].
- Jedná se o glykoproteiny s jednosměrnou transmembránovou doménou, podílející se na buněčné adhezi zprostředkované Ca^{2+} ionty. Propojují je s dalšími extracelulárními doménami.
- Desmoglein 4 (DSG4) je exprimován převážně ve vysoce diferencovaných oblastech vlasové pochvy, jako jsou prekortikální oblast, keratinizující oblasti kůry, stejně jako nižší vrstvy kutikuly vlasové pochvy a svrchní oblast kutikuly vnitřní epitelové pochvy [21]. DSG4 je jediným z desmogleinů, který je exprimován v keratinizující kortikální oblasti, kde jsou převážně exprimovány keratiny [22].
- Desmosomální vrstva je složena z 3 glykoproteinů: plakoglobin, desmoplakin a plakofilin. Fungují jako spojovníky. Ukotvují keratinová intermediární filamenta v buněčné membráně a pomáhají udržovat integritu buněčného cytoskeletu [20].

- Ve *stratum corneum* se vyskytují modifikované desmosomy – corneodesmosomy a jejich degradace se ukazuje být jedním z podstatných kroků při deskvamčních procesech [23].

Lipidy

- Povrch vlasu je pokryt lipidy, které se z většiny tvoří nepřetržitě v mazových žlázách, umístěných u vlasového kořene. Některé endogenní lipidy jsou vlastním produktem kutikulárních buněk. Ztráta těchto lipidů se nedá nahradit [24].
- Lipidy tvoří přibližně 0,7% - 1,3% z celkové hmotnosti vlasu [25]. Rozdělujeme je na vnější a vnitřní v závislosti na jejich umístění ve vlasovém vláknu [26].
- Lipidová vrstva je jedinou souvislou strukturou, která se podílí na udržení vlasové integrity zajištěním hydrofobního charakteru a tuhosti vlasu [25].
- Mezi strukturální (vnitřní) lipidy patří např. kyselina 18-methyleikosanová (18 – MEA), nacházející se v kutikule vlasu, kde je esterovými vazbami spojena s molekulami keratinu [26]. Tato kovalentní vazba připevňuje lipidy k vnějšímu povrchu kutikuly a zajišťuje tak jeho hydrofobicitu a je důležitá při určení fyzikálních vlastností vlasového vlákna [24].
- Báze každé kutikulární buňky je pokryta tenkou vrstvou složenou převážně z mastných kyselin (např. palmitová, stearová, olejová), s níže ležícími proteiny jsou vázány esterovými a thioesterovými vazbami. Kvůli tomuto spojení je obtížné uvolnit lipidy pomocí extrahujících roztoků.
- Další strukturální lipidy nacházející se v kutikule a kůře jsou nazývány volné lipidy (např. volné mastné kyseliny, cholesterol, ceramidy). Jsou snadno extrahovatelné z vlasového vlákna, protože jsou vázány pouze slabými vazebnými interakcemi, jako jsou Van der Waalsovy síly.

- Strukturální lipidy jsou stavebními součástmi buněčného membránového komplexu, který se nachází jak v kutikulární, tak korové vrstvě [26].
- Od kořene vlasu k jeho konci se množství obsažených lipidů snižuje, hlavně kvůli opakovanému mytí šamponem, česání a vystavení ultrafialovému záření. Vliv mají i další činnosti, chlor obsažený v pitné vodě a v bazénech, barvení vlasů a další kosmetické úpravy.
- Tahové vlastnosti vlasu se též zhoršují se zvětšující se vzdáleností od kořene. Ztráta lipidů může vyústit ve ztrátu integrity kutikuly, tím se zvýší náchylnost proteinů a lipidových lamel obsažených v kůře k degradaci, což vede k zhoršení tahových vlastností vlasu [24].

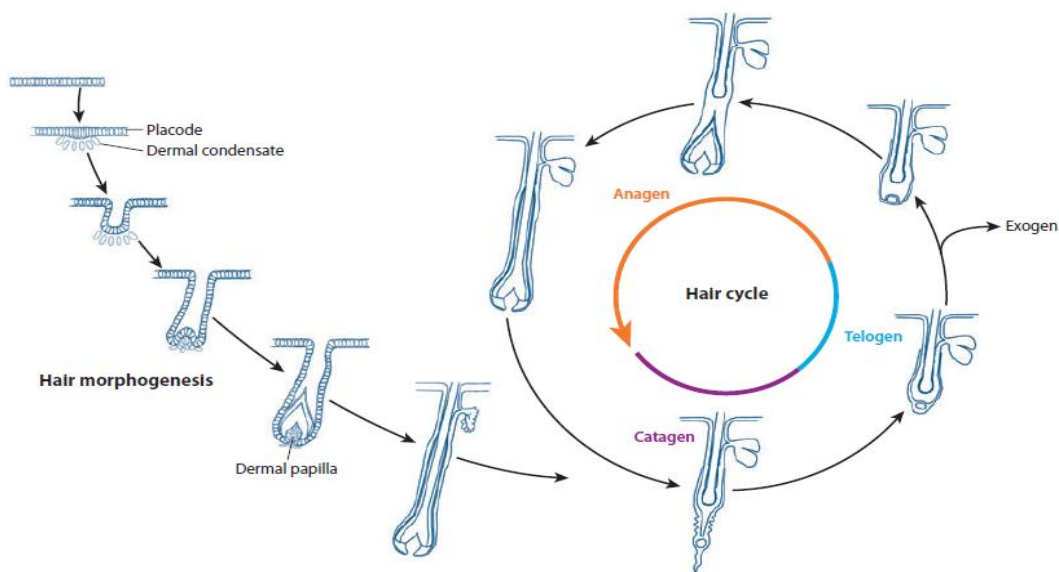
2.3 Vlasy

Vlasy jsou keratinové útvary, jež vyrůstají cyklicky a nepravidelně z vchlípenin epidermis – vlasových folikulů.

Základní stavební složkou lidského vlasu je α -keratin. Jeho 2 molekuly se stáčíjí do výsledného spirálovitého α -helixového tvaru [27]. Detailní stavba byla popsána v předchozí kapitole.

Při vzniku vlasového folikulu dojde nejprve k uvolnění prvního signálu pro tvorbu vlasového folikulu, který pochází z dermis. Epiteliální buňky, které obdrží tento signál, se začnou shlukovat a tvořit válcovitý útvar známý jako plakoda. Ten vydává další signály, které vedou k tvorbě dermálního kondensátu, který jej následně vyživuje. Dalšími interakcemi dojde k protahování plakody a postupným vývojem až k tvorbě vlasového folikulu (Obr. 7) [20].

Vlasy rostou v cyklech, které zahrnují opakující se fázi růstu (anagenní), fázi regrese (katagenní) a klidovou fázi (telogenní). V průběhu anagenní fáze dochází k proliferaci a diferenciaci buněk v germinální matrix, a tím k prodlužování vlasů. V průběhu katagenní a telogenní fáze se germinální matrix stává neaktivní a může atrofovat. Vlas se odděluje od vlasové cibulky, zevní epitelová pochva se retrahuje a vlas se vysunuje směrem vzhůru k povrchu a nakonec vypadává (Obr. 7). V průběhu další anagenní fáze roste hlubší část zevní epitelové pochvy opět směrem dolů a tvoří buď novou germinální matrix na staré papile, nebo stimuluje tvorbu papily nové, cibulka vlasová se rekonstruuje a cyklus pokračuje. Růstové cykly vlasů neprobíhají synchronně na celém povrchu těla. Objevují se spíše v ostrůvcích. Tento způsob růstu se nazývá mozaikovitý. Hormony, zejména androgeny, ovlivňují charakter konečného rozložení definitivních vlasů a rychlost jejich růstu [28]. Vlasy hlavy žijí asi 5 let, ostatní vlasy podstatně kratší dobu [29].



Obr. 7: Znázornění morfogeneze vlasového folikulu a růstového cyklu vlasu [20].

Denně vypadává u mladých osob 30 – 90 vlasů, ve stáří může být toto číslo vyšší. Růst vlasů je pomalý. Vlasy rostou denně asi o 0,30 – 0,45 mm.

Vlas je uložen v kůži šikmo. Na té straně, kde vlas s povrchem kůže svírá menší úhel, je uložena mazová žláza a snopeček hladkého svalu – *m. arrector pili*, probíhající šikmo od vazivové pochvy do dermis. Jeho kontrakcí se šikmo uložený vlas vzpřimuje [29].

Vlasové folikuly se šíří od povrchu hluboko do dermis nebo hypodermis. Široká báze folikulu, neboli vlasová cibulka, se skládá z vrstvy rychle se dělících epitelových buněk (germinální matrix). Germinální matrix leží nad dermální papilou, která obsahuje nervy a cévní zásobení. Buňky germinální matrix keratinizují, jak se posunují směrem k povrchu kůže a tvoří koncentrické vrstvy volné části vlasu. V blízkosti povrchu vytvářejí zřetelné vrstvy pochvu, která obklopuje kanál obsahující volnou část vlasu.

Germinální matrix tvoří vrstva epitelových buněk, která nasedá na dermální papilu a tvoří čtyři nepřesně odlišitelné koncentrické zóny kolem papily. Oblast, která je nejbližší papile, odpovídá *stratum basale*, jak svou strukturou, tak i funkcí. Obsahuje cylindrické epidermální buňky a melanocyty, které jsou zodpovědné za barvu vlasu. Z germinální vrstvy vznikají neúplně keratinizované buňky, které tvoří dřevň volné části vlasu, a buňky uložené v ostatních třech zónách germinální matrix. V oblasti kolem báze vlasového bulbu, je germinální vrstva kontinuální se zevní epitelovou pochvou, která obklopuje celý vlasový bulbus a volnou část vlasu. V blízkosti povrchu kůže je

kontinuální se *stratum basale*. Buňky v sousední vrstvě tvoří kutikulu. Nejperifernější vrstva germinální matrix tvoří neúplně keratinizované buňky vnitřní epitelové pochvy [28].

2.3.1 Stavba vlasového folikulu

Pilus – chlup je tvořen základními částmi:

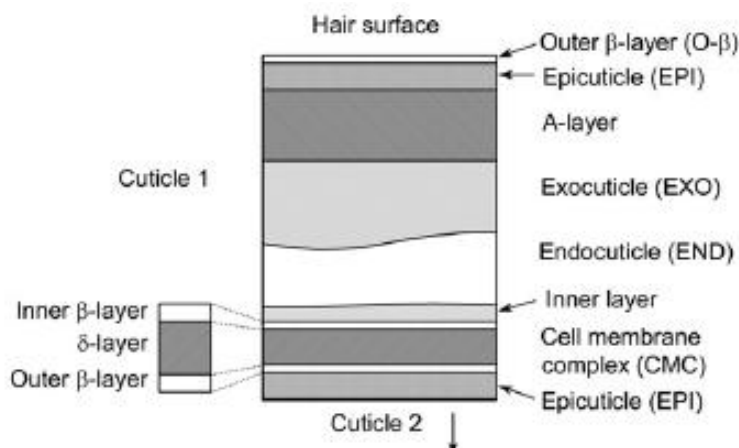
- ***Scapus pili*** – vlasový stvol (kmen) – vyčnívá z kůže, u člověka je po celé délce stejně silný, teprve na volném konci se ztenčuje a končí zaobleně
- ***Radix pili*** – vlasový kořen – je zapuštěný do vklesliny epidermis, označované jako *foliculus pili* – vlasová pochva
- ***Bulbus pili*** – vlasová cibulka – je bazální rozšíření vlasového kořene, proti jeho spodině se zdola vyklenuje [2]. V cibulce se nacházejí melanocyty. Tvoří vlasový pigment melanin, který schází šedivým vlasům a vlasům albinů [29].
- ***Papilla pili*** – vlasová bradavka – cévnatý výběžek škáry. Zánik vlasové papily má za následek odloučení a vypadnutí vlasu. To může být děj přirozený, při němž jsou vlasy vyměňovány, nebo děj patologický. Papila po odloučení vlasu zaniká a buňky, které zbyly na spodině vlasové pochvy, vytvářejí epitelový provazec, který se stává základem nového *bulbus pili*, a proti němu se vytváří nová papila [2].

2.3.2 Rozdělení vlasových vrstev na průřezu vlasu

- **Dřeň vlasu** – *medulla pili* – soubor buněk v ose vlasu. Tyto buňky se vyvíjejí z *matrix pili* směrem od vrcholu vlasové papily a jsou méně keratinizované než korová vrstva. U velmi jemných chloupků je dřeň zredukována [2]. Dřeň se skládá z jedné až dvou řad polyedrických buněk, které mají jádra zachována jen v blízkosti cibulky. V jejich cytoplazmě jsou acidofilní zrna trichohyalinu [29]. Jedná se o protein patřící do skupiny keratin-associated proteins (KAPs), které spolu s keratinem tvoří významnou strukturální složku většiny vyzrálých vláken. Též ztvrdzuje vnitřní epitelovou pochvu, která obaluje vlákno v průběhu poslední fáze vývoje [30]. Směrem ke hrotu vlasu buňky rychle rohovatí a mění se ve svaštělé, zrohovatělé váčky vyplněné vzduchem [29].

- **Korová vrstva** – *substantia corticalis* – skládá se z hustě sestavených a silně keratinizovaných buněk vřetenovitého tvaru, které se začínají množit v bazální vrstvě *bulbus pili* a postupují s růstem vlasu do *scapus pili* [2]. Kůra tvoří hlavní složku volného vlasu. V buňkách jsou zrna melaninu podmiňující barvu vlasu. Stářím se v buňkách tvoří dutinky vyplněné vzduchem, které způsobují šedivé až bílé zbarvení vlasu. Zevně pokrývá povrch vlasu tenká kutikula vlasu [31].
- **Kutikula vlasu** - *cuticula pili* – tenká buněčná lamela na povrchu *substantia corticalis*, vzniká z distinktní vrstvy buněk vlasového bulbu, buňky kutikuly se posunují vzhůru s růstem vlasu a postupně mění svůj tvar od cylindrického (kolmého na povrch vlasu) po plochý podélný, kdy jsou buňky kutikuly naskládány jako tašky na střeše [2]. Buňky směřují volnými okraji ke konci vlasu [31]. Kutikulární buňky jsou tvořeny amorfním materiálem a každá z nich se dále dělí na 4 podjednotky, které mají rozdílné chemické složení (Obr. 8). Jedná se o epikutikulu (vrstvu 1), která tvoří nejsvrchnější část kutikulárních buněk silnou přibližně 2,5 nm. Je hydrofobní a jsou zde značně zastoupeny molekuly cysteinu. A vrstva (vrstva 2) a exokutikula (vrstva 3) jsou obě více zesíťované a ještě více hydrofobní vzhledem k ještě vyššímu obsahu cysteinu. Poslední je endokutikula (vrstva 4), což je vnitřní vrstva, která je tvořena substancemi, jež obsahují jen minimální množství cysteinu a je hydrofilní. Poslední součástí kutikuly vlasu je komplex buněčných membrán (cell membrane complex - CMC), který má adhezivní funkci a udržuje vrstvy kutikuly pohromadě. Je složen z cytoplazmatických membrán dvou sousedních buněk, skládá se z hydrofilní centrální δ – vrstvy, jež je tvořena hlavně proteiny a polysacharidy. Je uložena mezi dvěma lipidovými vrstvami, nazývanými β – vrstvy, obě jsou tvořeny jednou vrstvou lipidů, tudíž jsou hydrofobní. Jsou vázány kovalentními vazbami ke keratinovým molekulám v epikutikule a van der Waalsovými interakcemi jsou přitahovány konci mastných kyselin k δ – vrstvě. Vnitřní β – vrstva je tvořena hlavně kyselinou palmitovou, stearovou a olejovou. Hlavní složkou vnější β – vrstvy je 18-metyleikosanová kyselina [32][33]. Při studiu biomechanických vlastností je nejvýznamnější právě kutikula vlasu, která se dostává do kontaktu s produkty vlasové péče, je

namáhána při mechanickém upravování vlasů např. česání a kartáčování a je v kontaktu s kůží a dalšími povrchy [34].

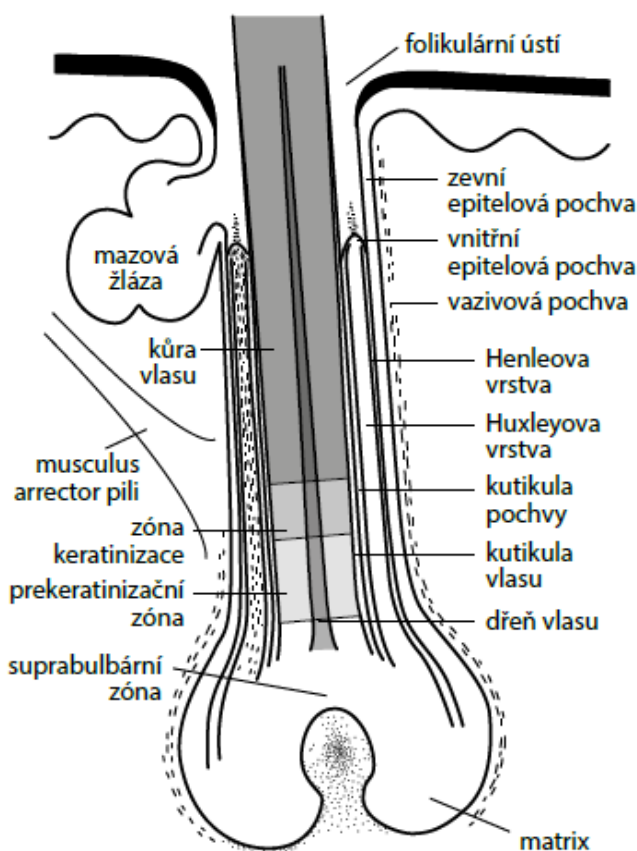


Obr. 8: Schematické znázornění sublamelární struktury kutikuly lidského vlasu [32].

- **Vnitřní epitelová pochva** přiléhá zevně ke kutikule vlasu. Začíná kutikulou, která má obdobnou stavbu, jen volné okraje zrohovělých šupin směřují opačným směrem (tedy ke kořeni vlasu). Tak představují obě kutikuly aretační aparát vlasu [31]. Vnitřní epitelová pochva vzniká ze spodního okraje vlasové cibulky. Její epitel postupně směrem nahoru rohovatí až k vyústění mazové žlázy [29]. Vnitřní epitelová pochva se skládá ze tří součástí [28].
- **Kutikula vnitřní epitelové pochvy** – vrstva oploštěných buněk. Buňky kutikuly a kutikuly vnitřní epitelové pochvy na sebe velmi těsně přiléhají.
- **Vrstva Huxleyova** přiléhá ke kutikule vnitřní epitelové vrstvy a je složena z jedné až tří vrstev polyedrických buněk, které mají v cytoplazmě hrubší zrna trichohyalinu [31].
- **Vrstva Henleho** se nachází zevně od vrstvy Huxleyovy, je tvořena jednou vrstvou oploštělých buněk s jemnými zrny trichohyalinu [31]. Podobá se *stratum lucidum* epidermis[28].
- **Zevní epitelová pochva** je pokračováním spodních vrstev epidermis. Skládá se ze *stratum basale* a *stratum spinosum*, které tvoří několik vrstev buněk se světlou cytoplazmou, s četnými glykogenovými granuly, na povrchu se známkami rohovění. Kolem volného okraje zrohovělého vlasu je zevní epitelová pochva rozšířena v *infundibulum*. V této oblasti je *stratum basale* zevní epitelové pochvy ztlustělé v cirkulární val obsahující multipotentní

kmenové buňky pro rostoucí vlas a také pro mazovou žlázu a generují též progenitorové buňky, které osidlují bazální vrstvy epidermis [31].

- **Sklovitá membrána** – je ztluštělá bazální membrána, která leží pod *stratum basale* zevní epitelové pochvy a odděluje ji od okolní pochvy vazivové.
- **Vazivová pochva** – tvoří ji kondenzovaná vazivová tkáň, jež se skládá z vnitřní cirkulární a vnější longitudiální vrstvy kolagenního vaziva. Ta obklopuje celý vlasový folikul včetně vlasového bulbu. Šíří se podél folikulu k povrchu, kde splývá s řidším *stratum papillare dermis*. Připevňuje vlas k okolí [29][28]. Výše zmíněné vrstvy jsou zobrazeny na Obr. 9.



Obr. 9: Vlas - schematický vertikální řez (podle P. Arenbergera) [35][36].

2.4 Stárnutí, biologický věk a další faktory ovlivňující kvalitu vlasu

2.4.1 Biologický věk

Lidský věk, který je označován jako chronologický, počítaný od narození člověka, je obecně brán jako významný rizikový faktor pro nemoci, jako jsou např. rakovina, diabetes, chronické selhání ledvin, Alzheimerova choroba, Parkinsonova choroba a deprese. Stárnutí ovlivňuje širokou škálu biochemických procesů, které probíhají v lidském těle a to zánětlivé procesy, proteostázu, odpověď těla na oxidační stres a energii celého metabolismu. Celkový odraz lidského metabolismu zahrnující fyziologické i patofyziologické mechanismy a genetické odlišnosti, ale též i aspekty sociálního prostředí a životního stylu nám může dát představu o tzv. biologickém věku člověka. Tzn., že dva jedinci shodného chronologického věku mohou mít odlišný biologický věk jako důsledek výše zmíněných odlišností [37].

Vlasový folikul je snadno dostupný a unikátní model, který nabízí jedinečnou možnost i pro gerontologický výzkum na studování problémů spojených se zvyšujícím se věkem. Je to mnohobuněčný, vzájemně interagující komplex zahrnující epitel, mesenchym a neuroektoderm. Další ojedinělou charakteristikou vlasového folikulu je jeho cyklická aktivita růstu, regrese, odpočinku a opět růstu. Ve vlasovém folikulu lze pozorovat kmenové buňky, buňky ve fázi diferenciaci, v rozdílných stádiích mitózy, postmitotické buňky a plně diferencované buňky. Nacházejí se zde i buňky s různou citlivostí k apoptóze [38].

2.4.2 Stárnutí

Se stárnutím se vlas začíná měnit. Vlasový folikul se zmenšuje a produkuje menší množství melaninu. Též mazové žlázy se smršťují a nejsou schopny produkovat původní množství mazu, je ho tedy méně. Tyto změny způsobené věkem vyústí v rozřepené konce vlasů, šedé zbarvení, křehkost vlasu, hrubou strukturu a jednotvárný tenký vzhled. Šedivění, zužování, křehkost a vysušenost jsou čtyřmi hlavními problémy spojenými se stárnutím vlasu. Stárnutí vlasu je obvykle spojováno se změnami v třecích a mechanických vlastnostech kutikuly [34].

Pro zjištění vlivu stárnutí na biofyzikální vlastnosti vlasu je nezbytné studovat jeho vliv na průměr vlasu, jeho povrch, mechanické vlastnosti a drsnost.

Jak jsem již psala v kapitole popisující průřez vlasu, zdravý vlas je pokryt asi sedmi vrstvami kutikulárních buněk. Pokud jsou tyto buňky zdravé, zajišťují správný tvar a hydrofobicitu vlasu. Každá tato buňka se skládá z dalších vrstev, jsou to A-vrstva, exokutikula a endokutikula. Mezi sousedními kutikulárními buňkami se vyskytuje centrální membránový komplex, který zajišťuje vlasovou integritu. Endokutikulární vrstva patří k nejnáchylnějším na poškození, protože obsahuje nejmenší zastoupení disulfidických vazeb.

Při namáhání kutikulární vrstvy se nejčastěji vyskytují 2 typy poškození.

- Typ L, kdy dojde k oddělení centrálního membránového komplexu (CMC) od kutikulárních buněk, které se následně začnou odchlípnout
- Typ E, kdy endokutikula, nejzranitelnější substruktura kutikulárních buněk, je poškozena a její zdrsňelé zbytky se nachází na povrchu kutikuly[39].

Pokud je endokutikula tužší, než buněčný membránový komplex, bude jako první absorbovat namáhání vlasu právě buněčný membránový komplex a dojde ke vzniku poškození typu L. Naopak, pokud bude endokutikula náchylnější k poškození než buněčný membránový komplex, bude právě na ni působit namáhání a dojde snáze k poškození typu E. Ve věku pod 50 let je pravděpodobně kutikula pevnější než buněčný membránový komplex, proto převažuje výskyt poškození právě typu L. Se stárnutím endokutikula slábne a dojde k nárůstu poškození typu E [40].

Výskyt určitého typu poškození závisí na druhu vlasu. Pro kavkazský druh vlasu je dominantní poškození vlasu typu E. Pro japonský druh to je naopak poškození typu L. Tyto vztahy závislosti věku na kvalitě lidských vlasů byly získány ze studie Toshie Takahashi a kol., kteří zkoumali právě změny poškození vlasové kutikuly v závislosti na věku u japonských žen. Dokázali, že poškození typu L je převažující u žen mladších 50 let. U žen mladších 40 let se dokonce poškození typu E téměř nevyskytovalo. Výskyt poškození vlasu typu L dosahuje největší četnosti přibližně ve věku 40 let. S dalším stárnutím se výskyt poškození typu L snižuje. Naopak se zvyšuje výskyt poškození typu E. Tedy s rostoucím věkem se výskyt poškození vlasu mění z typu L na typ E, kdy přelomovým rokem bývá 40. rok života [39].

K udržení celistvosti vlasového povrchu též výrazně přispívá kyselina 18-methyleikosanová, která je kovalentně vázána k buňkám kutikuly a zajišťuje lubrikaci, hladkost, výživu a spolupodílí se na konečném lesku vlasového vlákna [41].

Již bylo prokázáno, že snižování obsahu kyseliny 18-methyleikosanové např. chemickým odbarvováním a následným barvením negativně ovlivňuje kvalitu vlasu [42]. Stárnutí též snižuje množství kyseliny 18-methyleikosanové. Tento pokles je výrazný hlavně po 40. roce života [39].

2.4.3 Kouření

Kouření tabáku a cigaret je již dávno spojováno s nežádoucími efekty na pokožku. Způsobuje nejen předčasné stárnutí pokožky, ale v současné době se zkoumá i vliv kouření na předčasné šedivění a vypadávání vlasů. Mechanismů, kterými kouření ovlivňuje vypadávání vlasů je několik. Jedná se o poruchu mikrocirkulace u vlasové dermální papily, kouřením indukované genotoxiny, které způsobují poškození DNA vlasového folikulu a o nerovnováhu proteázového a antiproteázového systému, který kontroluje tkáňovou remodelaci v průběhu růstového cyklu vlasu. Dále prooxidační efekt kouření vedoucí k uvolnění prozánětlivých cytokinů, vyúsťující ve folikulární mikrozáněty a perifolikulární fibrózy [38]. Perifolikulární fibróza je stav, kdy kolagen kolem vlasových folikulů ztvrdne a tlačí na cévy, které jej zásobují krví a živinami [43]. Nakonec vlivem kouření dochází ke zvýšené hydroxylaci estradiolu, způsobující relativně hypoestrogenní stav [38].

Hyoseung Shin, Hyeong Ho Ryu a kol., ve své studii přímo prokázali, že kouření a obezita jsou rizikovými faktory pro předčasné šedivění vlasů, protože oba dva tyto faktory jsou spojovány se zvýšeným oxidačním stresem. Kouření je zdrojem volných radikálů, které následně generuje i v živém organismu [44].

2.4.4 Sluneční záření

Vliv slunečního záření na lidské vlasy je diskutován, ale v literatuře často nenacházíme žádné jasné usnesení o tom, jaký vliv na lidský vlas mají jednotlivé složky slunečního záření. A to jsou ultrafialové (UVA, UVB a UVC) o vlnové délce $\lambda = 280 - 400$ nm, viditelné (VIS) $\lambda = 400 - 700$ nm a infračervené (IR) $\lambda = 750 - 2800$ nm. Z toho ultrafialové záření je dále rozděleno dle vlnové délky na další 3 skupiny: UVA $\lambda = 315 - 400$ nm, UVB $\lambda = 280 - 315$ nm a UVC $\lambda = 100 - 280$ nm). Ozonová vrstva blokuje vstup UVC záření. Z UVB záření projde 1-10% a UVA záření prochází téměř z 90 – 99% [45][46].

UVB záření ovlivňuje všechny vrstvy lidského vlasu, protože je schopno proniknout až 5 μm do nitra vlákna lidského vlasu, ale jeho intenzita se snižuje. Proto, když bereme v potaz intaktní vlasovou kutikulu mající 6 – 10 vrstev, z nichž každá má průměr 0,3 – 0,5 μm , toto záření nemůže plně proniknout až do kůry, ale může způsobit strukturální změny v kutikule. Naproti tomu UVA záření proniká hluboko do kůry. První co se stane po vystavení vlasu záření je jeho absorpce vlasovým vláknem. Za nejvýznamnější proteinové chromofory se považují aminokyseliny tryptofan, tyrosin, fenylalanin a cystein, které absorbují ve vlnových délkách vyhrazených pro UVB záření. UVA a VIS záření by nemělo být příčinou přímého poškození proteinů. Ze všech chromoforů vyskytujících se v keratinu pouze tryptofan absorbuje významně UVB záření, a proto je náchylnější k rozkladu za pomoci záření.

Vlasové proteiny absorbují záření v rozmezí vlnových délek 200 – 380 nm. Vazebná energie, která odpovídá proteinové ztrátě, může být zjištěna pomocí měření množství proteinů eluovaných z vlákna. Kromě přímé interakce mezi UV zářením a složením vlasového vlákna se k fotodegradaci vlasových vláken pojí též vznik volných reaktivních forem kyslíku (ROS). Reaktivní formy kyslíku vznikají hlavně působením UVA záření a jsou snadno dostupné při oxidaci aminokyselin jako tryptofan a cystein. Též přispívají k produkci oxymelaninu z melaninu a stejně tak k oxidaci umělých pigmentů používaných při barvení vlasu [45].

Melanin, který se nachází v lidské kůži a vlasech, je polymerní pigment s komplikovanou různorodou strukturou. Ačkoli obsah melaninových granul v lidském vlasu zaujímá procentuelně pouze malou část celkové hmotnosti vlasu, právě obsah těchto granul určuje přirozenou barvu vlasu, protože keratin, který tvoří většinu vlasové hmoty, je bezbarvý. Syntéza melaninu probíhá v melanocytech [47].

Melanocyty savců a ptáků produkují 2 rozdílné typy melaninu - černý až hnědý eumelanin a žlutý až červenohnědý feomelanin. Je to především množství a poměr eumelaninu a feomelaninu, jež určují barvu vlasů, kůže a očí. Je obecně přijímáno, že eumelanin v tkáních působí fotoprotektivně, zatímco feomelaninu je přisuzováno fototoxické působení [48].

Přirozená barva lidského vlasu se významně liší mezi jednotlivými rasami. Tyto rozdíly jsou dané právě odlišným množstvím melaninu a různým poměrem mezi eumelaninem a feomelaninem. Nejvíce melaninových granul je umístěno v kůře vlasu. Melaninové granule jsou elipsoidního tvaru měřící přibližně 0,4 – 1,2 μm na délku a 0,1 – 0,5 μm v průměru. Ačkoli přesná struktura melaninu nebyla ještě

objasněna, je její část již popsána. Mezi nejčastěji se opakující jednotky eumelaninu patří indolchinon a dihydroxyindol [47].

Melanin, hlavně v nižších vlnových délkách, zajišťuje fotochemickou ochranu určitým proteinům vyskytujícím se v kůře vlasu tím, že absorbuje, filtruje a odvádí energii ve formě tepla. Tato schopnost absorbovat energii je spojena s přítomností karbonylových skupin a systému konjugovaných dvojných vazeb. Melanin nejenže má schopnost zadržet část záření, též dokáže imobilizovat mnoho volných radikálů, které vznikají v průběhu expozice vlasu záření a zabraňuje tak jejich průniku do keratinové masy. V průběhu toho procesu, je melanin sám rozkládán, a ztrácí svou původní barvu [45].

Dle Signoriho, je za změny přirozené barvy nebarveného vlasového vlákna nejvíce zodpovědné viditelné záření, právě kvůli degradaci melaninových granul, zatímco ultrafialové záření způsobuje změny v proteinové mase, které ovlivňují mechanické vlastnosti vlasu [49]. Fernandez a kol., pak uvádějí, že UVA záření podporuje tvorbu reaktivních forem kyslíku, zatímco UVB záření degraduje melaninový pigment a ovlivňuje mechanické vlastnosti vlasu tím, že podporuje štěpení disulfidických vazeb mezi molekulami cysteinu vyskytujícími se v keratinu, což oslabuje vlasové vlákno [50].

Bílé, případně šedivé vlasy neobsahují melanin nebo mají obsah tohoto přirozeného pigmentu výrazně snížený, a proto jsou více náchylné k poškození, které je způsobeno UV zářením. Dochází k častějšímu rozpadu disulfidických vazeb. Proto dochází ke snížení mechanické pevnosti vlasu. U tmavých vlasů dochází po vystavení viditelnému záření (VIS) nebo i celkovému ozáření (UVB+UVA+VIS+IR) k změně jejich barvy, která ztratí na své intenzitě a vlasy vyblednou. U světlehnědých vlasů (které mají větší množství feomelaninu vůči eumelaninu) dojde ke změně barvy ve všech případech ozáření s výjimkou IR a částečně UVA a VIS. Z toho se dá usuzovat, že eumelanin, pravděpodobně kvůli obsahu chinonové skupiny ve své polymerní struktuře, má vyšší fotostabilitu ve vztahu k feomelaninu. Též melanin v ozářených zrzavých vlasech produkuje více ROS nežli ten v ozářených černých vlasech. Z chemického hlediska se blednutí nebarveného vlasu vystaveného slunečnímu záření přisuzuje oxidaci indolchinonové části molekuly eumelaninu a změně benzothiazinové části molekuly feomelaninu na benzothiazolovou [45]. Též uměle barvené vlasy vykazují lepší odolnost vůči UV-VIS ozáření a opět platí, že čím tmavší barva, tím lepší fotoprotekce [49].

2.4.5 Vliv kosmetických přípravků na vnější a vnitřní struktury vlasu

Hlavním důvodem používání šamponů je odstranění mazu a nečistot z povrchu vlasů a hlavy. Zatímco používání kondicionérů má zajistit snadné rozčesávání vlasu. Některé běžně dostupné šampony mají další přidané složky, které slouží např. k omezení tvorby lupů a k udržení dobré kondice vlasu. Stejně tak kondicionéry mohou navíc omezit vznik statické elektřiny při rozčesávání a úpravě vlasů, podpořit lesk a zvýšit ochranu. Právě z důvodu mnohostranného využití vlasových přípravků zahrnuje jejich složení dlouhý seznam látek s rozmanitým vlivem na vlasy.

2.4.5.1 Šampony a kondicionéry

Šampony typicky obsahují primární a sekundární surfaktanty pro důkladné čištění, látky zvyšující viskozitu, kondicionační složky, látky používané k úpravě pH a další neesenciální složky jako parfémy a barviva pro komerční vzhled přípravku.

Kondicionéry obvykle obsahují silikonové polymery pro zvýšení lesku a jemnosti vlasu, kationické sloučeniny jako jsou např. kvartérní amonné sloučeniny pro snížení statické elektřiny a tzv. bridging agents, pro zvýšení absorpce. Nakonec stejně jako u šamponů se zde vyskytují látky používané k úpravě pH a látky zvyšující komerční atraktivitu přípravku [51].

Bylo dokázáno, že jedna aplikace šamponu odstraní přibližně 50% extrahovatelných lipidů [51], při opakovaném používání šamponu to je 70 – 90% extrahovatelných lipidů [52].

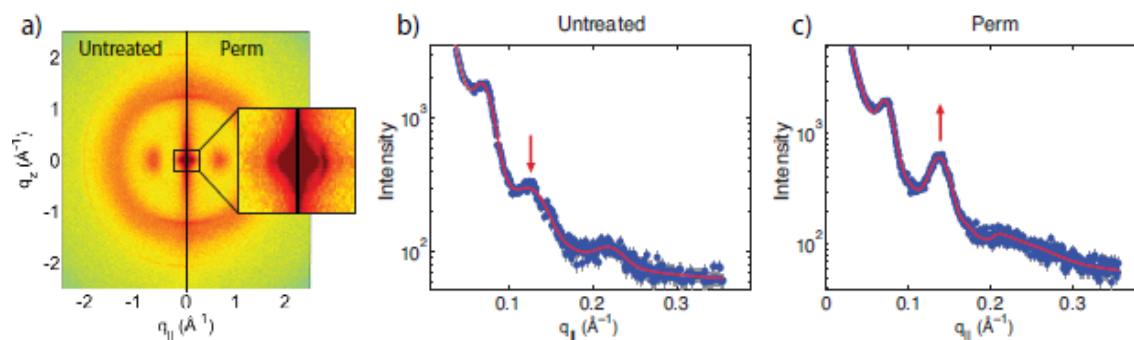
Vzhledem k tomu, že šampon odstraňuje částice a maz z povrchu vlasu a aktivní složky kondicionérů opět působí na povrchu vlasu, tak většina interakcí mezi šamponem, kondicionérem a vlasem bude ovlivňovat pouze několik svrchních vrstev kutikuly. Kůra vlasu bude ovlivněna pouze, pokud bude vlas natolik poškozen, že kutikulární vrstva nebude přítomna. V tomto případě může při mytí šamponem dojít k poškození keratinových a nekeratinových struktur na povrchu vlasu [53].

Zhang a kol., kteří zkoumali difrakční vzory Rentgenova záření na vlasech, které původně nebyly ošetřovány a následně byly podrobeny působení šamponu, kondicionéru a kombinaci obou, neprokázali žádný efekt na vnitřní keratin a lipidy [51].

2.4.5.2 Trvalá ondulace

Trvalé zvlnění vlasu je proces, během kterého se z rovných vlasů stávají kudrnaté za použití chemického procesu. Tento proces je složen z mnoha kroků a zahrnuje rozvolnění a přestavění disulfidických vazeb uvnitř vlasu. K rozdělení disulfidických vazeb dojde pomocí redukující složky, např. thioglykolátu nebo bisulfátu. Před použitím redukujícího přípravku se na vlasy ještě nanese roztok bazického charakteru, který usnadňuje odchlípnutí šupinek kutikuly a snazší průnik do vnějších korových vrstev. V dalším kroku jsou vlákna tvarována do preferovaných vln a v tomto tvaru udržována pomocí natáček. Přitom v kutikulární a vnější korové vrstvě probíhá reorganizace vláken. Tento proces je ukončen oxidujícím činidlem, např. použitím peroxidu vodíku[54][55].

Zejména použití peroxidu vodíku na konci procesu je zodpovědné za značné poškození povrchu vlasu a snížení tuhosti vlákna. Nedávné studie dokazují, že vystavení oxidujícím/redukujícím složkám používaným při trvalé ondulaci, delší než 30 minut, snižuje množství keratinu v α -helikální konformaci, což je patrné i na difrakčních obrazcích [51][56]. Yang F-C, Zhang Y, Rheinstädter MC, zkoumali rozdíl v obrazcích pomocí malouhlého rentgenového rozptylu (Small Angle X-ray Scattering). Na Obr. 10 je znázorněna dvourozměrná mapa intenzity signálu neupravovaných vlasů proti trvale ondulovaným vlasům. Zatímco většina signálu, která náleží keratinovým vláknům a lipidům zůstává nezměněna, na zvýrazněné části snímku jsou zřejmé nepatrné odlišnosti v oblasti odpovídající intermediárním filamentům. Na obrázcích B a C je tato oblast lépe znázorněna použitím dat z malouhlého rentgenového rozptylu (SAXD). Ta lépe kvantitativně analyzují pozici a amplitudy signálů. Zobrazují amplitudy neupravených vlasů a trvale ondulovaných vlasů. Píky jsou zobrazeny v hodnotách 90 Å, 47 Å a 27 Å. Je zde znázorněno zvýšení intenzity píky v hodnotě 47 Å a snížení intenzity v hodnotě 27 Å. Tato oblast je pravděpodobně místem, které označuje shlukování keratinových intermediárních filament do makrofibril. Pozorované změny v této oblasti mohou být způsobeny právě trvalou ondulací vlasu [57].



Obr. 10: Maloúhlý rentgenový rozptyl znázorňující rozdíl získaný z neupravených vlasů a trvale ondulovaných vlasů [57].

Navíc při tomto procesu lze vyextrahovat i polární vnitřní lipidy z buněčného membránového komplexu a výrazně tak snížit jejich množství [51].

Krátce trvajících zvlnění vlasů lze dosáhnout pouhým namočením vlasů a natáčkami. Při tomto procesu se reorganizují pouze slabší vodíkové vazby [55].

2.4.5.3 Barvení vlasů

Barvení vlasů je obvykle klasifikováno dle toho, jak dlouho barva na vlasech vydrží. Existuje postupné barvení, dočasné, semi-permanentní a permanentní.

Nejběžnější přírodní barvou je hena, která barví vlasy do oranžově-zrzavého odstínu. Dále je možno použít extrakt z heřmánku, který se nyní používá jen velmi řídko. Extrakty z duběnky, kampeškového dřeva a sapanu ježatého se používají v některých asijských zemích pro krytí šedin.

- Postupné barvení

Postupné barvení používá hlavně soli kovů, např. bismutu a stříbra. Tento typ barvení může vlasy pouze ztmavit. Částičky kovů interagují s cysteinovými zbytky uvnitř kutikuly a vznikají tak sulfidy kovů [55]. Vlasy postupně během několika týdnů používání mění své zbarvení ze šedivé na žluto-hnědou až k hnědo-černé [54]. Důležitá je nepřetržitá aplikace.

- Dočasné barvení

Používají se barvy kyselého charakteru, ve vodě rozpustné. Vzhledem k jejich vysoké molekulární hmotnosti tyto barvy nepronikají do vlasu, zůstávají na jeho povrchu, dokud nejsou vymyty. Pokud vlasy před barvením nebyly chemicky ošetřeny, tak jsou zpravidla vymyty už po prvním umytí šamponem. Vlasy, které před tím byly chemicky ošetřeny, jsou více porézní, a proto barva proniká hlouběji do vlasové

pochvy. Po chemickém ošetření očekáváme delší setrvání barvy na povrchu. Jsou považovány za bezpečné, zřídka kdy způsobují kontaktní dermatitidu.

- Semi-permanentní barvení

Většinou se používají syntetické barvy. Přírodní barvy typu hena se používají zřídka. Většinou jsou nahrazeny syntetickými produkty henového typu. V těchto barvách je obsažen nízkomolekulární kamenouhelný dehet a mohou obsahovat oxidační barviva (diaminy, aminofenoly, fenoly). Tyto barvy mohou způsobovat alergickou kontaktní dermatitidu. Vzhledem k malým molekulám tyto barvy mohou prostupovat až do korových vrstev, proto jejich efekt vydrží déle. Jedná se o dobu 4-6 týdnů. Jejich efekt opět může být prohlouben předchozím chemickým ošetřením vlasu, které umožní ještě hlubší prostup.

- Permanentní barvení

Tyto barviva mohou zesvětlit i ztmavit původní barvu a zakryjí jakékoli množství šedin. Přebarvení je nutné až po 4-6 týdnech, ale ne z důvodu vymývání barvy, nýbrž kvůli odrostům. Tento proces je nevratný. Při barvení se uplatňují 3 základní složky. Primární meziprodukty, které vznikají oxidací, se spojují s kuplery. Nejběžněji používané primární meziprodukty jsou např.: ortho- a para- aminofenoly. Kuplery reagují s produkty oxidace primárních meziproduktů a formují barvu. Typické kuplery zahrnují fenoly, meta-aminofenoly a meta-diaminobenzeny. Oxidantem je téměř vždy peroxid vodíku.

2.4.5.4 Odbarvení vlasu

Nejběžněji používaná metoda odbarvení vlasu zahrnuje použití alkalického roztoku 12% peroxidu vodíku. Peroxid vodíku se obvykle skladuje v roztoku s kyselým pH a s roztokem obsahujícím alkalickou bázi je smíchán až těsně před použitím. Alkalický roztok je nezbytný, protože účinnost odbarvování se snižuje s klesajícím pH. Nejčastěji se používá roztok amoniaku. Stupeň odbarvení závisí na době kontaktu a na původní barvě vlasu. Odbarvení vlasu zahrnuje 2 kroky. V prvním dojde k rozvolnění a rozpuštění granul melaninu. Tento krok je spojen se změnou barvy z černé na hnědou a je zodpovědný za rezavý nádech vlasů, který je často znatelný při odbarvování vlasů. Po této fázi následuje mnohem pomalejší dekolorační fáze, kdy pravděpodobně dochází k rozbití polymerické struktury melaninu [55].

2.4.5.5 Vysoušení vlasů

Důsledky sušení vlasů popisuje ve své práci Lee Y. a kol. Zabývají se vlivem sušení na vlasy s použitím fěnu při teplotě 47°C, 61°C a 95°C a při volném schnutí za běžné pokojové teploty. Viditelné poškození kutikuly nebylo zřejmé u přirozeně schnoucích vlasů. V případě fénování při teplotě 47°C byly zaznamenány podélné praskliny pozorovatelné v kutikule vlasu. Ještě znatelnější bylo poškození při teplotě 61°C. Nejzávažnější poškození bylo při 95°C (Obr. 11), kdy byly pozorovány trhliny, díry a nejasné ohraničení kutikulární vrstvy. Poškození kůry nebylo zřejmé v žádné skupině. K překvapivému závěru došli při zkoumání vlivu sušení na buněčný membránový komplex. Pouze skupina, s vlasy schnoucími při pokojové teplotě, vykazovala známky poškození CMC. Trvalo přes 2 hodiny, než vlas úplně uschl. Delší kontakt s vodním prostředím může být pro CMC více poškozující než sušení běžným fénem. Při jiném způsobu sušení nebylo toto poškození zaznamenáno. Opakované namáčení a sušení vlasů může způsobit mnohočetné praskliny v kutikule vlasu a způsobit změny barvy vlasu [58].

Rebenfeld a kol., zkoumali změny mechanických vlastností vlasu při fénování. Zjistili, že modul elasticity a modul meze pevnosti a tuhost vlákna se snižují se zvyšující se teplotou, zatímco roztažnost vlákna se zvyšuje [59].



Obr. 11: Ukázka poškození kutikulární vrstvy fénováním horkým vzduchem při teplotě 95°C. Měřeno transmisním elektronovým mikroskopem [58].

2.5 Mechanické vlastnosti lidských vlasů

2.5.1 Mechanické charakteristiky vlasu

Kvantitativní určení mechanických vlastností a parametrů lidských vlasů, může být využito při diagnostice kožních onemocnění a dále ke zhodnocení účinnosti terapie kožních onemocnění, případně i vhodnosti jejího použití. To platí i u kosmetických přípravků. Ke správné interpretaci těchto výsledků je zapotřebí vhodné metodiky, která zohlední následující vlastnosti vlasu.

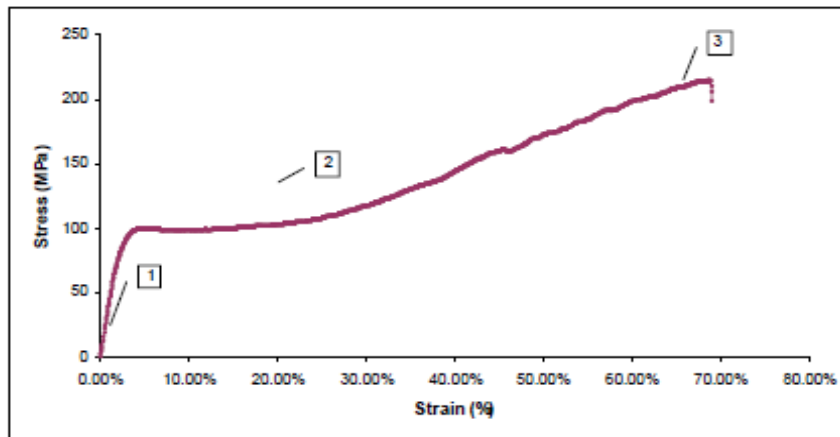
1. Lidský vlas vykazuje viskoelastické chování, které je charakterizováno současnou závislostí změny času a deformace v průběhu celého experimentálního stanovení strain-stress křivky.
2. Nestejnorodá struktura, která je charakterizována třemi hlavními vrstvami: kutikulou, kůrou a dření [60].
3. Bifazická přirozenost vlasové kůry, kdy se v průběhu protažení α -keratin mění na β -keratin a v matrix vlasu dojde k změně skupenského stavu: 'gel' to 'sol' [61].

Aby se předešlo problémům spojeným s nestejnou strukturou lidského vlasu, byly definovány 2 typy mechanických parametrů. Ty, jež jsou téměř výlučně závislé na mikrostruktuře vlasové kůry a ty, které zohledňují průměr vzorku, tzn. velikost vlasové dřene.

Mechanické parametry vzorku lidského vlasu jsou určeny studováním strain-stress křivky vzniklé podélným protahováním. Napětí vyvolané v lidském vlasu v průběhu protažení, je závislé na protažení (deformaci), kterému již byl vlas vystaven. Proto je vlasová deformace $\sigma(\epsilon, t)$ charakterizována dvěma proměnnými – prodloužením (ϵ) a časem (t). Samostatná interpretace vztahu času (t) a prodloužením (ϵ) na výsledné deformaci $\sigma(\epsilon, t)$, vyžaduje obecnou formulaci zahrnující nelineární strain-stress charakteristiku [60].

2.5.2 Strain-stress křivka

Strain-stress křivka získaná po tahových testech má následující tvar (Obr. 12).



Obr. 12: Křivka závislosti napětí na deformaci [62].

První část křivky označujeme jako Hookeův region. Tato oblast křivky se dále dělí a to na: lineární oblast charakteristickou pro gumové materiály, ze které určujeme Youngův modul, a platí zde Hookeův zákon. A nelineární oblast, ve které je deformace viskoelastická. V této části nemá deformace trvalý charakter z důvodu ovlivnění pouze nejslabších vazeb struktury (vodíkové a solné můstky).

Druhá část křivky je oblast kluzu (yield region), ze které získáme mez kluzu. Pro tuto část je charakteristická viskoplastická deformace spojená s aktivní přeměnou α -keratinové struktury v β -keratinovou s konformací β -skládaný list, ve které jsou vodíkové vazby kolmo k ose vlákna a protažené kovalentní vazby tvoří pevnou stabilizovanou síť.

Třetí část určuje zlomové napětí a deformaci. Značíme ji jako mez pevnosti (post yield region). Jedná se o přechodnou fázi, kdy se postupně zvyšuje napětí s deformací. Poměr mezi napětím a deformací je relativně konstantní, následuje ruptura vzorku [62].

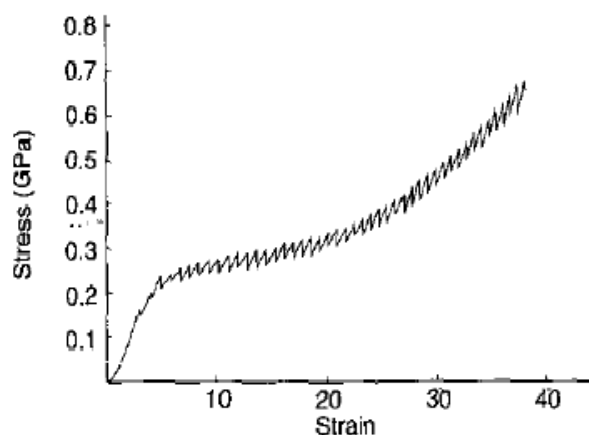
2.5.3 Částečná linearizace strain-stress křivky

Další možností, jak popsat a znázornit nelineární viskoelastické chování vlasu, je jeho částečná linearizace. Toho je docíleno v několika na sebe navazujících krocích (Obr. 13).

Každý z kroků obsahuje fázi, která je charakterizována téměř okamžitým protažením (0,1 s) se zvýšením původní délky až o 1 %, následované relativně dlouhou trvající relaxační fází (5,0 s), vyjádřenou jednoduchou exponenciální funkcí:

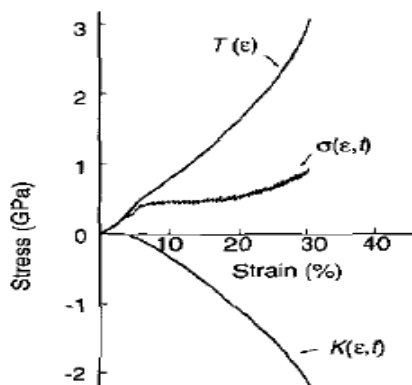
$$G_i(t) = A_i \exp(-k_i t) \quad (1)$$

Kde i odpovídá pořadí postupných kroků. V každém kroku tak může být viskoelastické chování považováno za lineární.



Obr. 13: Postupné protahování vlasu pro experimentální částečnou linearizaci [60].

Vzhledem k tomu, že ve fázi okamžitého protažení téměř nenastává fáze relaxace, můžeme tyto jednotlivé časově závislé $T(\epsilon)$, (elastické) relaxační fáze ignorovat, a následně spojit fáze, ve kterých probíhá protažení vlasu. Schematicky proces znázorníme současným spojením všech fází okamžitého protažení a tím vykompenzujeme poklesy křivky, které nastávají ve fázi relaxace (Obr. 14).

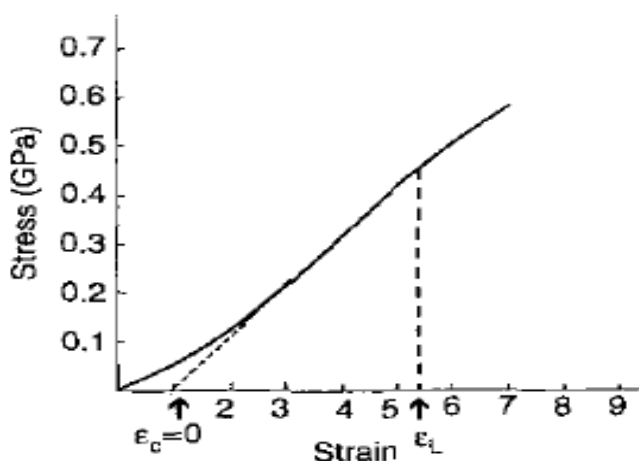


Obr. 14: Odhadované křivky napěťové reakce $\sigma(\epsilon, t)$ spolu s elastickou $T(\epsilon)$ a viskózní $K(\epsilon, t)$ složkou v průběhu postupného protahování [60].

Časově závislá viskózní složka $K(\epsilon, t)$ může být získána spojením všech postupných fází relaxace, které se vyskytují v průběhu jednotlivých kroků a vznikne nám křivka celkové relaxace vlasu (Obr. 14).

Nikiforidis, při zkoumání vlastností strain-stress křivky, dospěl k následujícím závěrům:

Elastická složka $\Phi(\epsilon)$ není v oblasti Hookeova regionu lineární (Obr. 15). Příčinou je pravděpodobně vlnění vzorku vlasu při začátku měření, kdy dochází k nepřesnému odhadu počáteční délky vlasu. Proto první sigmoideální část křivky, hlavně pokud je již původní vzorek malý, musí být upravena tak, aby vznikla lineární křivka. Maximální sklon neupravené křivky v oblasti Hookeova regionu je i správným sklonem pro novou lineární křivku. Pro upravené protažení (ϵ) nacházející se v rozmezí hodnot ($\epsilon_c=0$ a ϵ_L) platí, že odpor vzorku k aplikovanému napětí zůstává konstantní a je znázorněn modulem elasticity (E_α).



Obr. 15: Vliv zvlnění v úvodní elastické části $\Phi(\epsilon)$; propojení upraveného Hookeova regionu s protažením osy určující pravou počáteční délku vzorku vlasu [60].

Následující charakteristiky a diagnosticky významné parametry lze odvodit z Hookeova regionu strain-stress křivky.

- Modul elasticity (E_α) znázorňuje sklon strain-stress křivky v lineární oblasti, kde poměr napětí/protažení zůstává stejný.
- Limit linearity (T_L) odpovídá napětí, po jehož překročení chování vzorku přestává být lineární.
- Energie protažení (The strain energy, SE) reprezentuje energii nashromážděnou v průběhu protažení vzorku v Hookeově regionu.

Oblast kluzu (yield region) začíná v místě, kde je hodnota protažení vyšší než ε_L . V diagramu $\bar{T}(\varepsilon)$ na Obr. 14 jsou zobrazeny 2 mechanismy vztahující se k přeměně korového α -keratinu v β -keratin. Pokud se soustředíme pouze na protažení jednoho konkrétního vlákna a změnu α -keratinu v β -keratin, odpor k prodloužení se výrazně snižuje. Po dokončení této transformace, která odpovídá danému stupni prodloužení, se vlákno stane tvrdším a vykazuje vyšší modul elasticity (e_β) ve srovnání k původnímu (e_α). Oba mechanismy jsou pozorovány v oblasti kluzu $\bar{T}(\varepsilon)$, čemuž odpovídá počáteční pokles a následný vzestup sklonu křivky. Pokud by všechna vlákna mohla projít změnou současně a byla by podrobena stejnému stupni protažení, konkrétní analýza $\bar{T}(\varepsilon)$ by byla snadná. Ale transformace jednotlivých vláken α -keratinu se vztahuje k odlišným hodnotám prodloužení. Proto křivka $\bar{T}(\varepsilon)$ vykazuje charakteristické chování jednotlivých vláken spojené s funkcí modulace. Tato funkce modulace je spojena se zvýšením počtu vláken β -keratinu a současně snížením počtu α -keratinových vláken ve vztahu k změně prodloužení. Proto můžeme usuzovat, že pro hodnoty $\varepsilon \leq \varepsilon_L$ je počet α - a β -keratinových vláken roven:

$$N_{\alpha 0} + N_{\beta 0} = N \quad (2)$$

Kde N značí celkový počet korových vláken ve vzorku.

Toto platí pro Hookeův region. Naopak v části zobrazující oblast kluzu ($\varepsilon > \varepsilon_L$) platí, že vlákna α -keratinu přecházejí v β -keratinová vlákna. Oblast znázorňující mez pevnosti $\bar{T}(\varepsilon)$ začíná nad danou hodnotou prodloužení (ε_p), ve které je počet vláken β -keratinu větší než počet vláken α -keratinu ($N_\beta(\varepsilon_p) > N_\alpha(\varepsilon_p)$). V této oblasti je mechanické chování vzorku vlasu určeno hlavně vlastnostmi β -keratinového vlákna.

Vzhledem k tomu, že moduly elasticity lze stanovit pro každé vlákno (α -keratinu (e_α) a β -keratinu (e_β)) zvlášť, tak spojením modulů elasticity všech jednotlivých vláken vzniká, s ohledem na sklon křivky v Hookeově regionu, celkový modul elasticity E_α , pro který platí:

$$E_\alpha = N_{\alpha 0} e_\alpha + N_{\beta 0} e_\beta \quad (3)$$

V nejvyšší části zobrazující mez pevnosti, právě před přetržením vzorku, jsou již téměř všechna vlákna přeměněna ve vlákna β -keratinu. Pak pro celkový sklon křivky znázorňující elastickou složku ($\bar{T}(\varepsilon)$) v této oblasti je modul elasticity (E_β):

$$E_\beta = (N_\alpha + N_\beta) e_\beta \quad (4)$$

Kombinací obou vztahů nám vznikne:

$$\frac{E_\alpha}{E_\beta} = \frac{N_{\alpha 0} e_\alpha}{(N_\alpha + N_\beta) e_\beta} + \frac{N_{\beta 0}}{N_\alpha + N_\beta} \quad (5)$$

Z tohoto vztahu je zřejmé, že poměr E_α/E_β závisí na původním množství β -keratinu obsaženém ve vláknu.

Napětí viskózního původu, které je vyvoláváno ve vzorku v průběhu podélného protažení, závisí na viskozitním koeficientu a rychlosti deformace. Je zřejmé, že standardizace rychlosti deformace $d\varepsilon/dt$ je nezbytná, ale nedostačující, pro úspěšnou aplikaci $K(\varepsilon, t)$ při diagnostice problémů s kšticí. Parametr, který bude mít relevantní význam při diagnostice, lze odvodit poměrem integrálů pro viskózní složku $K(\varepsilon, t)$ a elastickou složku $\Upsilon(\varepsilon)$ pro dané protažení. Tento viskózní parametr (S_{dis}/S_{stor}), který můžeme standardizovat, je spjat s mikrostrukturou vlasu a je dán poměrem:

$$\frac{\int_0^{30\%} K(\varepsilon, t) d\varepsilon}{\int_0^{30\%} \Upsilon(\varepsilon) d\varepsilon} = \frac{S_{dis}}{S_{stor}} \quad (6)$$

Kde: $\int_0^{30\%} \Upsilon(\varepsilon) d\varepsilon$ zastupuje energii, která byla ve vzorku nashromážděna v průběhu protažení o 30% délky vzorku a

$\int_0^{30\%} K(\varepsilon, t) d\varepsilon$ je pohlcená energie, která byla vyvolána viskózním tokem v průběhu protažení vlasového vzorku.

Viskózní tok uvnitř lidského vlasu, jako parametr zmíněný výše, je primárně spojen s keratinovou matrix. Matrix je svou strukturou propustná pro vodu s relativně nízkým výskytem disulfidického zesílení a větším zastoupením vodíkových vazeb. V průběhu protažení se vodíkové vazby rozpojí a pokračuje proces reformace, který je charakteristický viskózním chováním matrix. Naopak v mikrofibrilech je převaha intermolekulárního disulfidického spojení, které brání plynulému viskóznímu toku.

2.5.4 Diagnostické zhodnocení důležitosti mechanických parametrů ve vztahu k nehomogenní struktuře lidských vlasů

Zhodnocení vlivu výše zmíněných parametrů je limitováno z důvodu nedostatečné homogenity vlasu. Pro diagnózu vlasových problémů je důležité vědět, zda změny v mechanických vlastnostech jsou z důvodu odlišností ve velikosti průřezu dřeňovou vrstvou nebo změnami v korové mikrostruktuře. Vhodný výběr a aplikaci těchto parametrů mohou částečně kompenzovat dále zmíněná omezení.

- 1) Poměry E_α/E_β a S_{dis}/S_{stor} nejsou ovlivněny nehomogenní strukturou lidského vlasu a jsou úzce spjaty se strukturálními vlastnostmi vlasové kůry, proto je tento parametr diagnosticky významný. Značná odchylka hodnoty poměru

E_α/E_β od normálních hodnot může být spojována s abnormální přeměnou α -keratinu v β -keratin.

- 2) Modul elasticity (E_α) a energie protažení (SE) v oblasti Hookeova regionu a sklon křivky znázorňující elasticitu $\mathfrak{T}(\varepsilon)$ v oblasti meze pevnosti závisí na mikrostruktuře vlasové kůry a na relativní velikosti dřeně. Relativní velikost dřeně se zvyšuje se zvyšujícím se povrchem příčného řezu vlasovou pochvou. Proto se zdá opodstatněné, že parametry E_α , E_β a SE vlasu daného subjektu musí být analyzovány s odkazem na normální vlas se stejnou velikostí povrchu vnějšího příčného řezu [60].

3. Experimentální část

3.1 Materiál

Pro experimentální část práce byly použity lidské vlasy dobrovolníků, které se dále neupravovaly. S každým vzorkem vlasů byl od dobrovolníků současně vyplněn níže uvedený dotazník, který je součástí této práce, a přináší základní informace o věku a základních hygienických návycích spojených s úpravou vlasů dobrovolníků.

Michaela Kernerová
Praktická část DP
Farmaceutická fakulta UK
Hradec Králové

Jsem studentka poslední ročníku Farmaceutické fakulty v Hradci Králové a ráda bych Vás poprosila o účast na výzkumu, který je součástí praktické části mé diplomové práce. Téma práce je Strain-stress křivky lidských vlasů. Konkrétně se zabývá mechanickými vlastnostmi vlasu se zaměřením na věk jedince. Na vzorku Vašich vlasů budu měřit již zmíněnou strain-stress křivku a údaje porovnávat s informacemi, které získám z Vámi vyplněných dotazníků. Vámi zvolené možnosti zaškrtnete křížkem umístěným v konkrétním čtverečku. Předem děkuji za Vaši účast.

1. Uveďte prosím, do kterého věkového intervalu patříte:

(10 – 35)

(36-60)

(61 a více)

2. Kouříte cigarety:

ano ne

Pokud odpovíte ano:

jsem pravidelný kuřák (nejméně 1 cigareta/den)

příležitostný kuřák (méně než 1 cigaretu/den)

3. Svě vlasy běžně dostupným šamponem myji:
- každý den každý druhý den 1x týdně
- jiný časový interval doplňte: svě vlasy nemyji šamponem nikdy
4. Po umytí vlasů používám:
- kondicionér masku oba přípravky
- žádný z těchto přípravků
5. Vlasy mám barveny:
- ano ne
- Vyplňte pouze, pokud jste odpověděli ano:
- naposledy barveny v posledních 6 měsících 3 měsících 1 týdnů
6. Vlasy mám trvale ondulovány:
- ano ne
- Vyplňte pouze, pokud jste odpověděli ano:
- naposledy v posledních 6 měsících 3 měsících 1 týdnů
7. K úpravě vlasů používám:
- vlasů fěnuji:
- horkým vzduchem
- studeným vzduchem
- pravidelně používám žehličku/kulmu
8. Svě vlasy chráním před UV zářením:
- před přímým sluncem je chráním šátkem
- vyhýbám se pobytu na přímém slunci
- vlasy před UV zářením necháním žádným speciálním způsobem
9. Vlasy si rozčesávám
- pouze suché namočené hned po umytí

3.2 Měřicí aparatura

Mechanické vlastnosti vzorků vlasů se měřily na dynamickém viskoelastometru, který byl vyvinut Katedrou biofyziky a fyzikální chemie Farmaceutické fakulty UK v Hradci Králové. Konstrukce tohoto variabilního zařízení umožňuje měření mechanických vlastností, statických i dynamických parametrů různých biologických struktur, např. kůže, šlach, cévních stěn atd., ale i umělých materiálů, např. plastů a pryžových vzorků, a lze ji použít i při měření „*in vivo*“. Princip měření spočívá v upnutí vzorku do přístroje a v následném namáhání, např. v tahu, ohybu, tlaku nebo smyku.

Měřicí aparatura se skládá ze stojanu s připevněnou měřicí sondou, fixačního zařízení pro upevnění zkoumaného vzorku, zařízení pro aplikaci deformační síly a A/D (analog/digital) převodníku. Vzorky byly upevněny v definované poloze, byly přesně změřeny jejich parametry a následně byly namáhány v tahu. Snímač zachycující signály je tvořen elektromechanickým čidlem induktivního typu a elektronickým obvodem. Elektronika dále převádí signály ze snímače na napětí a A/D převodník je zpracuje do digitální podoby. Dále je informace vedena do počítače, kde jsou data vyhodnocena speciálním počítačovým softwarem taktéž vyvinutým na pracovišti Katedry. Časová konstanta elektroniky je 1,25 ms. Nejmenší rozlišitelná deformační změna je cca 2 μm .

Nejprve byla změřena kalibrační křivka a to tak, že se definovaným způsobem zvýšilo napětí a byla sledována deformační odezva. Pro získání kalibrační křivky se napětí zvyšovalo celkem 5x. Kalibrační křivka byla nově měřena po každém přerušení měření [63][64]. Měřicí aparatura je zachycena na Obr. 16.

Poté byly měřeny strain–stress křivky upevněných vlasů až do okamžiku mechanického poškození nebo přetržení vlasu. Pokud bylo zřejmé, že vlas prokluzuje, bylo měření ukončeno i bez přetržení vzorku. Vlasy bylo obtížné uchytit, při velkém namáhání se stávalo, že vlas, ačkoli byl dobře upevněn, prokluzoval.



Obr. 16: Fotografie dynamického viskoelastometru s uchyceným vzorkem vlasu.

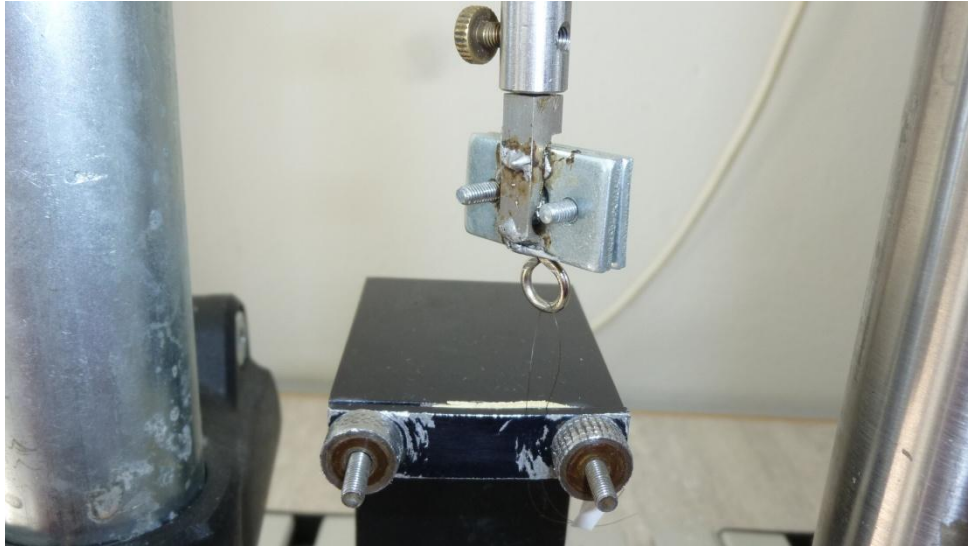
3.3 Metodika měření

Celkem bylo proměřeno 60 vlasů. Vzorky byly získány od 20 dobrovolníků. Od každého jedince byly měřeny 3 vlasy. Vlasy pro měření nebyly dále upravovány.

- 1) U každého vlasu byl nejprve změřen pomocí světelného mikroskopu (zvětšení 400x) a Bürkerovy komůrky průměr vlasu.
- 2) Pomocí vzorce pro výpočet povrchu kruhu byl vypočítán povrch průřezu vlasu.

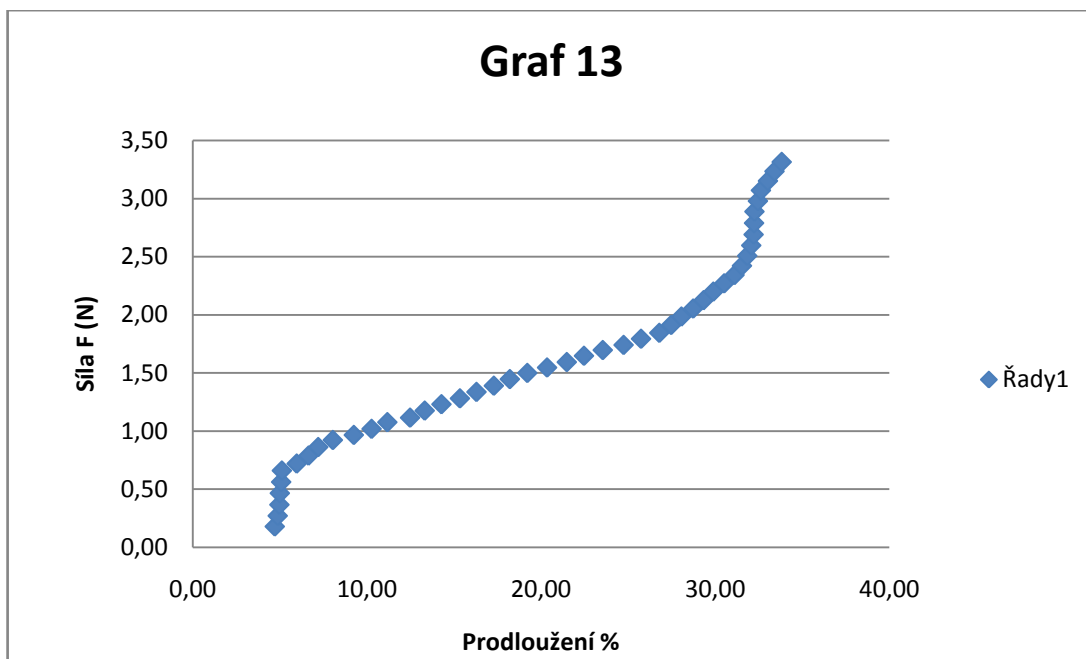
$$S = \pi r^2 \quad (7)$$

- 3) Pro měření byl používán dynamický viskoelastometr, vyvinutý Katedrou biofyziky a fyzikální chemie Farmaceutické fakulty UK v Hradci Králové, data byla zpracovávána v počítačovém programu Nelinearita 3, který byl vyvinut též na Katedře biofyziky a fyzikální chemie.
- 4) Před každým nově započatým měřicím cyklem byla prováděna kalibrace přístroje. Kalibrační křivka se skládala z pěti bodů, pružina byla v okamžiku měření kalibrace bez zatížení.
- 5) Vlas byl při měření ohnut v polovině. Horní část smyčky vlasu byla zavěšena za uchycovací háček, dolní část smyčky byla přichycena v čelistech přístroje a utažena, aby nedocházelo k proklouzávání vlasu. Pomocí digitálního mikrometru byla změřena počáteční délka vlasu l_0 [mm]. Uchycení vlasu je zachyceno na Obr. 17.
- 6) Při každém prodloužení o 0,5 mm působila na vlas zvyšující se síla v tahu. K přístroji byl připojen voltmetr a sledovala se stoupající hodnota napětí [V] od 0 V do 2 V. Program ukládal data o působící síle F [N], a vzhledem k výchozí naměřené délce l_0 [mm] počítal relativní prodloužení ε [%]. Měření probíhalo buď do přetržení vlasu, nebo do okamžiku, kdy bylo zřejmé, že při dané síle deformace již vlas prokluzuje z uchycení. Vlas jako velmi tenké a pevné vlákno bylo obtížné uchytit [63].



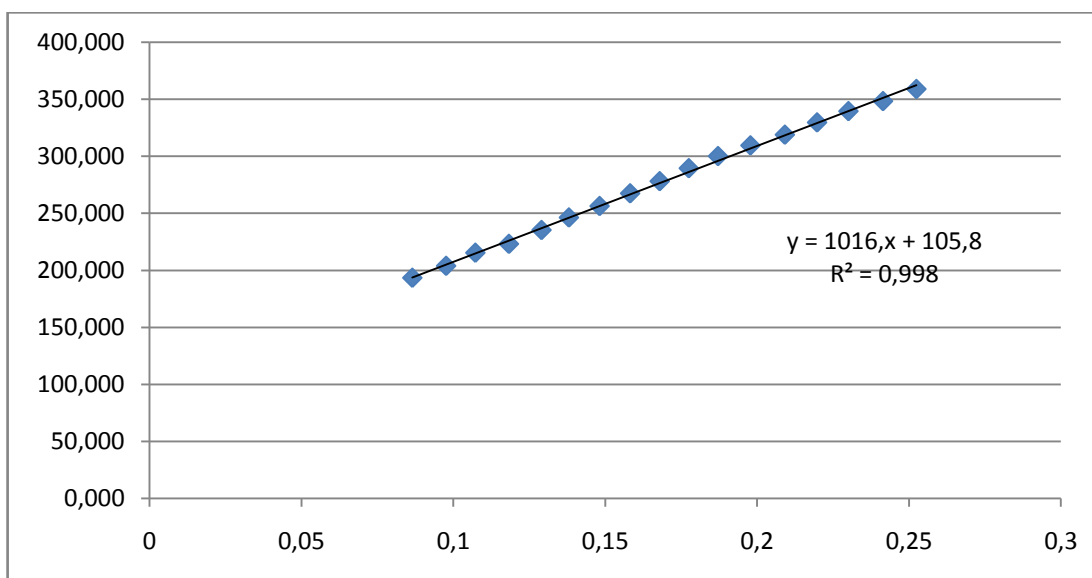
Obr. 17: Detail uchycení vzorku vlasu.

- 7) Od každého vlasu, který byl proměřen, byla v programu Nelinearita 3 získána tabulka hodnot. Jako příklad výstupu programu Nelinearita 3 je uveden vzorek vlasu č. 13, který je zde prezentován v Tab. 1. Výsledky pro další vzorky vlasů, včetně dat z dotazníkového průzkumu, jsou zpracovány v přehledových tabulkách (Tab. 2, Tab. 3, Tab. 4, Tab. 5, Tab. 6, Tab. 7, Tab. 8, Tab. 9, Tab. 10). Celkem bylo proměřeno 60 vlasů. Hodnoty napětí [MPa] získáme jako poměr síly F [N] a průřezu [mm^2]. Poslední hodnota napětí před přetržením, je označována jako maximální napětí.
- 8) Z hodnot platných pro prodloužení ε [%] a sílu F [N] sestojíme strain-stress křivku. Strain–stress křivka byla sestrojena zvlášť pro každý vlas. Na Obr. 18 je zobrazen graf zachycující naměřenou strain-stress křivku pro vzorek vlasu č 13.



Obr. 18: Vzorová strain-stress křivka.

9) Z každé naměřené strain-stress křivky, pokud to bylo možné, byla vybrána lineární část. Modul pružnosti E (Youngův modul) byl získán jako směrnice lineární části (Obr. 19).



Obr. 19: Vytyčení lineární části strain-stress křivky a odvození modulu pružnosti E.

Tab. 1: Vzorová tabulka naměřených hodnot, ze kterých je následně získána strain-stress křivka, modul elasticity E [MPa] a maximální napětí [MPa].

vzorek 13						
prodloužení	síla	(pro středy intervalů)	střed	průřez (mm ²)	E(MPa)	
epsilon %	F (N)	eps (%)	DF / Deps	epsilon	0,005	1016
				eps%/100	napětí (MPa)	
4,72	0,18	4,09	0,03	0,0409472	35,807	
4,88	0,27	4,80	0,55	0,0479937	54,234	
4,98	0,37	4,93	0,98	0,0493211	73,319	
5,00	0,47	4,99	4,26	0,0499256	93,101	
5,08	0,56	5,04	1,24	0,0504306	112,372	
5,12	0,66	5,10	2,45	0,0510194	131,997	
5,97	0,72	5,55	0,07	0,05548	144,011	
6,65	0,79	6,31	0,10	0,0631216	157,674	
7,21	0,86	6,93	0,13	0,0692957	172,438	
8,05	0,92	7,63	0,07	0,0762875	184,568	
9,25	0,97	8,65	0,04	0,0865052	193,286	
10,27	1,02	9,76	0,05	0,0976216	203,732	
11,18	1,08	10,72	0,06	0,1072475	215,244	
12,48	1,12	11,83	0,03	0,1182972	223,020	
13,32	1,18	12,90	0,07	0,12902	235,145	
14,28	1,23	13,80	0,06	0,1380276	246,131	
15,34	1,28	14,81	0,05	0,1481373	256,195	
16,29	1,34	15,82	0,06	0,1581896	267,294	
17,29	1,39	16,79	0,05	0,1679197	277,957	
18,21	1,45	17,75	0,06	0,1774976	289,341	
19,21	1,50	18,71	0,05	0,1871044	299,950	
20,35	1,55	19,78	0,04	0,1977867	309,318	
21,48	1,59	20,91	0,04	0,2091209	318,705	
22,46	1,65	21,97	0,05	0,219712	329,467	
23,54	1,70	23,00	0,05	0,230035	339,356	
24,74	1,74	24,14	0,04	0,2414124	348,141	
25,74	1,79	25,24	0,05	0,252399	358,763	
26,79	1,84	26,26	0,05	0,2626425	368,940	
27,47	1,91	27,13	0,10	0,2712864	382,560	
28,06	1,99	27,76	0,12	0,277644	397,024	
28,73	2,05	28,40	0,10	0,2839584	410,725	
29,33	2,13	29,03	0,12	0,2903095	425,119	
29,89	2,20	29,61	0,13	0,2960929	439,884	
30,51	2,27	30,20	0,11	0,3019988	454,049	
31,11	2,34	30,81	0,12	0,3080885	468,470	
31,53	2,42	31,32	0,19	0,3131964	484,475	
31,84	2,51	31,69	0,28	0,3168502	501,621	
32,07	2,60	31,95	0,39	0,3195181	519,474	
32,20	2,69	32,13	0,69	0,3213426	538,201	
32,23	2,79	32,22	3,81	0,3221514	557,958	
32,25	2,89	32,24	4,36	0,3223944	577,745	
32,45	2,98	32,35	0,46	0,3235031	595,880	
32,62	3,07	32,54	0,53	0,3253617	614,261	
33,02	3,15	32,82	0,20	0,3282362	630,492	
33,40	3,23	33,21	0,22	0,3321286	646,965	

10) Přehledy charakteristik vzorků vlasů získaných z dotazníkového průzkumu a následných výpočtů jsou shrnuty v tabulkách (Tab. 2, Tab. 3, Tab. 4, Tab. 5, Tab. 6, Tab. 7, Tab. 8, Tab. 9, Tab. 10).

Tab. 2: Charakteristiky vzorků 3 – 7.

číslo vzorku:	3	4	5	6	7
počáteční délka (mm)	26,01	27,92	15,74	12,88	14,96
plocha průřezu (mm ²)	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004
prodloužení (mm)	přetrženo	54,48	nezměřeno	přetrženo	přetrženo
věkový interval	(10 - 35)	(10 - 35)	(61 a více)	(61 a více)	(61 a více)
kouření	ne	ne	ne	ne	ne
četnost mytí	1x týdně	1x týdně	1x týdně	1x týdně	1x týdně
péče po mytí	kon	kon	žádný	žádný	žádný
barvení	ne	ne	ne	ne	ne
poslední barvení					
trvalá ondulace	ne	ne	ne	ne	ne
úprava vlasu	hor. vzduch	hor. vzduch	hor. vzduch	hor. vzduch	hor. vzduch
ochrana před UV	ne	ne	ne	ne	ne
rozčesávání	mokrý	mokrý	mokrý	mokrý	mokrý
E (MPa)	897				
Max napětí (MPa) pouze u přetržených	207			385	511

Tab. 3: Charakteristiky vzorků 8 a 13 – 16.

číslo vzorku:	8	13	14	15	16
počáteční délka (mm)	14,02	23,43	23,8	24,26	20,4
plocha průřezu (mm ²)	0,006	0,005	0,003	0,006	0,006
prodloužení (mm)	přetrženo	přetrženo	přetrženo	65,02	66,2
věkový interval	(36 - 60)	(36 - 60)	(36 - 60)	(10 - 35)	(10 - 35)
kouření	ne	ne	ne	ne	ne
četnost mytí	každý 2.	každý 2.	každý 2.	2x týdně	2x týdně
péče po mytí	žádný	žádný	žádný	kon	kon
barvení	ano	ano	ano	ne	ne
poslední barvení	6 měsíců	6 měsíců	6 měsíců		
trvalá ondulace	ne	ne	ne	ne	ne
úprava vlasu	hor. vzduch	hor. vzduch	hor. vzduch	st. vzduch	st. vzduch
ochrana před UV	ne	ne	ne	ne	ne
rozčesávání	mokrý	mokrý	mokrý	suchý	suchý
E (MPa)		1016	1985	1067	1039
Max napětí (MPa) pouze u přetržených	270	663	763		

Tab. 4: Charakteristiky vzorků 17, 22, 25 – 27.

číslo vzorku:	17	22	25	26	27
počáteční délka (mm)	24	27,37	47,38	24,63	37,74
plocha průřezu (mm ²)	0,015	0,004	0,005	0,005	0,003
prodloužení (mm)	66,22	nezměřeno	70,15	65,17	přetrženo
věkový interval	(10 - 35)	(10 - 35)	(10 - 35)	(10 - 35)	(10 - 35)
kouření	ne	ne	ne	ne	ne
péče po mytí	2x týdně	každý 2.	každý 2.	každý 2.	1x týdně
péče mokré	kon	kon	kon	kon	žádný
barvení	ne	ne	ne	ne	ne
poslední barvení					
trvalá ondulace	ne	ne	ne	ne	ne
úprava vlasu	st. vzduch	hor. vzduch	hor. vzduch	hor. vzduch	hor. vzduch
ochrana před UV	ne	ne	ne	ne	ne
rozčesávání	suché	mokré	mokré	mokré	mokré
E (MPa)	534		1220	744	1499
Max napětí (MPa) pouze u přetržených					721

Tab. 5: Charakteristiky vzorků 28 – 33.

číslo vzorku:	28	29	30	32	33
počáteční délka (mm)	29,12	29,52	29,08	23,93	22,49
plocha průřezu (mm ²)	0,005	0,009	0,007	0,005	0,006
prodloužení (mm)	přetrženo	přetrženo	přetrženo	přetrženo	47,96
věkový interval	(10 - 35)	(10 - 35)	(10 - 35)	(10 - 35)	(10 - 35)
kouření	ne	ne	ne	ne	ne
četnost mytí	1x týdně	1x týdně	každý 2.	každý 2.	každý 2.
péče po mytí	žádný	žádný	žádný	žádný	žádný
barvení	ne	ne	ne	ne	ne
poslední barvení					
trvalá ondulace	ne	ne	ne	ne	ne
úprava vlasu	hor. vzduch	hor. vzduch	volně	volně	volně
ochrana před UV	ne	ne	ne	ne	ne
rozčesávání	mokré	mokré	suché	suché	suché
E (MPa)	1071	563	779	686	639
Max napětí (MPa) pouze u přetržených	596	251	480	486	

Tab. 6: Charakteristiky vzorků 34 - 36, 38, 39.

číslo vzorku:	34	35	36	38	39
počáteční délka (mm)	25,73	25,71	23,81	32,22	30,46
plocha průřezu (mm ²)	0,01	0,012	0,011	0,007	0,008
prodloužení (mm)	49,63	50,59	45,95	54,45	54,88
věkový interval	(10 - 35)	(10 - 35)	(10 - 35)	(36 - 60)	(36 - 60)
kouření	ne	ne	ne	ne	ne
četnost mytí	2x týdně	2x týdně	2x týdně	každý 2.	každý 2.
péče po mytí	oba	oba	oba	kon	kon
barvení	ano	ano	ano	ano	ano
poslední barvení	3 měsíce	3 měsíce	3 měsíce	3 měsíce	3 měsíce
trvalá ondulace	ne	ne	ne	ne	ne
úprava vlasu	žehl. a kulm.	žehl. a kulm.	žehl. a kulm.	volně	volně
ochrana před UV	ne	ne	ne	ne	ne
rozčesávání	mokrě	mokrě	mokrě	mokrě	mokrě
E (MPa)	801	256	333	743	621
Max napětí (MPa) pouze u přetržených					

Tab. 7: Charakteristiky vzorků 40 – 44.

číslo vzorku:	40	41	42	43	44
počáteční délka (mm)	30,78	30,02	28,3	30,16	26,96
plocha průřezu (mm ²)	0,004	0,004	0,003	0,004	0,004
prodloužení (mm)	přetrženo	53,98	54,17	55,47	51,5
věkový interval	(36 - 60)	(36 - 60)	(36 - 60)	(36 - 60)	(36 - 60)
kouření	ne	ne	ne	ne	ne
četnost mytí	2x týdně	2x týdně	2x týdně	každý 2.	každý 2.
péče po mytí	kon	kon	kon	žádný	žáný
barvení	ano	ano	ano	ano	ano
poslední barvení	3 měsíce	3 měsíce	3 měsíce	3 měsíce	3 měsíce
trvalá ondulace	ne	ne	ne	ne	ne
úprava vlasu	hor. vzduch	hor. vzduch	hor. vzduch	volně	volně
ochrana před UV	ne	ne	ne	vyhýbám se	vyhýbám se
rozčesávání	mokrě	mokrě	mokrě	mokrě	mokrě
E (MPa)	959	960	1233	961	886
Max napětí (MPa) pouze u přetržených	562				

Tab. 8: Charakteristiky vzorků 45 – 49.

číslo vzorku:	45	46	47	48	49
počáteční délka (mm)	26,52	26,47	26,57	25,93	25,38
plocha průřezu (mm ²)	0,009	0,013	0,012	0,009	0,02
prodloužení (mm)	52,53	50,2	51,08	48,81	51,38
věkový interval	(36 - 60)	(36 - 60)	(36 - 60)	(36 - 60)	(36 - 60)
kouření	ne	ne	ne	ne	ne
četnost mytí	každý 2.	1x týdně	1x týdně	1x týdně	2x týdně
péče po mytí	žádný	žádný	žádný	žádný	masku
barvení	ano	ano	ano	ano	ano
poslední barvení	3 měsíce	týden	týden	týden	3 měsíce
trvalá ondulace	ne	ne	ne	ne	ne
úprava vlasu	volně	volně	volně	volně	volně
ochrana před UV	vyhýbám se	ne	ne	ne	ne
rozčesávání	mokrě	nerozčesávám	nerozčesávám	nerozčesávám	mokrě
E (MPa)	384	623	269	413	224
Max napětí (MPa) pouze u přetržených					

Tab. 9: Charakteristiky vzorků 50 – 54.

číslo vzorku:	50	51	52	53	54
počáteční délka (mm)	25,96	24,68	23,62	22,81	22,39
plocha průřezu (mm ²)	0,009	0,007	0,003	0,002	0,003
prodloužení (mm)	50,34	50,25	49,99	pře trže no	49,93
věkový interval	(36 - 60)	(36 - 60)	(36 - 60)	(36 - 60)	(36 - 60)
kouření	ne	ne	ne	ne	ne
četnost mytí	2x týdně	2x týdně	každý 2.	každý 2.	každý 2.
péče po mytí	masku	maska	žádný	žádný	žádný
barvení	ano	ano	ano	ano	ano
poslední barvení	3 měsíce	3 měsíce	3 měsíce	3 měsíce	3 měsíce
trvalá ondulace	ne	ne	ne	ne	ne
úprava vlasu	volně	volně	hor. vzduch	hor. vzduch	hor. vzduch
ochrana před UV	ne	ne	ne	ne	ne
rozčesávání	mokrě	mokrě	mokrě	mokrě	mokrě
E (MPa)	416	1058	1091	1727	1050
Max napětí (MPa) pouze u přetržených				1024	

Tab. 10: Charakteristiky vzorků 63, 73 - 75, 84.

číslo vzorku:	63	73	74	75	84
počáteční délka (mm)	38,57	19,71	18,02	17,66	12,4
plocha průřezu (mm ²)	0,004	0,009	0,006	0,007	0,009
prodloužení (mm)	83,94	přetrženo	39,64	přetrženo	33,99
věkový interval	(10 - 35)	(61 a více)	(61 a více)	(61 a více)	(61 a více)
kouření	ano	ne	ne	ne	ne
četnost mytí	každý den	1x týdně	1x týdně	1x týdně	2x týdně
péče po mytí	kon	žádný	žádný	žádný	žádný
barvení	ano	ano	ano	ano	ne
poslední barvení	6 měsíců	3 měsíce	3 měsíce	3 měsíce	
trvalá ondulace	ne	ano 3	ano 3	ano 3	ne
úprava vlasu	hor. vzduch	st. vzduch	st. vzduch	st. vzduch	hor. vzduch
ochrana před UV	ne	ne	ne	ne	ne
rozčesávání	suché	suché	suché	suché	mokré
E (MPa)	1864			146	
Max napětí (MPa) pouze u přetržených		229		293	

3.4 Výsledky měření

V úvodu je třeba sdělit, že celé měření bylo provázeno problémy s přístrojem, které mohly mít vliv na výsledné hodnoty. Problémy s přístrojem byly pravděpodobně způsobeny špatným kontaktem na spoji čidla dynamického viskoelastometru a počítače, na kterém probíhalo vyhodnocení. Některé křivky tak nemohly být zpracovány při závěrečném vyhodnocení. Jako obtížné se ukázalo i uchycení vlasu, který v některých případech při vyšší síle namáhání prokluzoval.

Při vyhodnocení byly porovnány hodnoty modulu pružnosti E (Youngova modulu). Na základě charakteristik získaných z dotazníkového průzkumu byly porovnávány lidské vlasy s ohledem na věkové skupiny: (10 – 35), (36 – 60) a (61 a více), používání/nepoužívání kondicionálních přípravků po umytí vlasů, barvení vlasů, způsobu sušení vlasů (volně na vzduchu/jiným způsobem) a četnosti mytí (1-2 týdny) a (1-2 dny). Pro každou charakteristiku byl vypočítán aritmetický průměr \bar{X} hodnot modulu elasticity a směrodatná odchylka $S_{\bar{X}}$.

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_1^n X_i \qquad S_{\bar{X}} = \sqrt{\frac{\sum_1^n (X_i - \bar{X})^2}{n(n-1)}} \qquad (8, 9)$$

Kde X_i jsou výsledky jednotlivých měření, n je celkový počet měření [65].

Při statistickém zpracování výše zmíněných charakteristik použitím nepárového t-testu bylo zjištěno, že žádný z uvedených rozdílů mezi aritmetickými průměry modulu pružnosti není statisticky významný. Důvodem, proč nebylo dosaženo statisticky významného rozdílu mezi porovnávanými skupinami, byl hlavně nízký počet změřených vzorků, s ohledem na zmíněné problémy. Dále ještě značná část naměřených vzorků musela být vyřazena, protože nebylo možno získat lineární část, která je nezbytná pro výpočet modulu pružnosti. Naměřená data vykazují velkou variabilitu u jednotlivců, tj. velké směrodatné odchylky. Tato vlastnost je obecnou charakteristikou všech biologických materiálů.

V Tab. 11 jsou prezentovány aritmetické průměry modulu pružnosti E a směrodatné odchylky v závislosti na věku. Z dat vyplývá, že mezi jednotlivými skupinami není statisticky významný rozdíl. U Skupiny 61 a více let byl použitelný pouze jeden graf, proto tato skupina není vhodná pro srovnání.

Tab. 11: Výsledný aritmetický průměr a směrodatná odchylka porovnávací vzorky vlasů na základě věkové odlišnosti.

stáří	(10 - 35)	(36 - 60)	(61 a více)
průměr E	874,5	874,7	146
sm.odch.	416,6	461,9	n=1

V Tab. 12 jsou uvedeny výsledky pro používání kondicionálních přípravků. Opět je zřejmé, že zde není statisticky významný rozdíl.

Tab. 12: Výsledný aritmetický průměr a směrodatná odchylka porovnávací vzorky vlasů na základě používání a nepoužívání kondicionálních přípravků.

přípravky	žádný	kondicionér
průměr E	877,1	990,1
sm.odch.	491,4	351,7

V Tab. 13 jsou shrnuty hodnoty pro barvené a nebarvené vlasy. Mechanické vlastnosti vlasů by mohly být ovlivněny jak způsobem barvení, tak i předchozím odbarvováním. Ovšem ani zde nedošlo k výraznému rozdílu naměřených hodnot.

Tab. 13: Výsledný aritmetický průměr a směrodatná odchylka porovnávací vzorky barvených a nebarvených vlasů.

barvení	ano	ne
průměr E	834,1	894,8
sm.odch.	510,4	292

V Tab. 14 jsou shrnuty hodnoty pro vlasy, které byly vysušeny bez použití fénu a pro vlasy sušené fénováním teplým i studeným vzduchem. Takto sušené vlasy, vykazují vyšší hodnotu modulu pružnosti E, čili vyšší tuhost a nižší pružnost. Rozdílné hodnoty zde uvedené nejsou též statisticky významné, ale naznačují, že vzhledem k výše uvedeným důvodům, by pravidelné fénování mohlo zvyšovat modul pružnosti E.

Tab. 14: Výsledný aritmetický průměr a směrodatná odchylka porovnávací metody sušení vlasů.

schnutí	volně	jinak
průměr E	599,8	1032,4
sm.odch.	284,6	582,2

Jako poslední z faktorů péče o vlasy, které byly při práci pozorovány, je uvedena četnost mytí vlasů. Výsledky v Tab. 15 naznačují, že čtenější mytí vlasů zvyšuje modul pružnosti vlasu, čili zvyšuje jejich pevnost a snižuje elasticitu. Při porušení a následném odchlípnutí kutikulární vrstvy, může dojít i k ovlivnění korové vrstvy, kterému odpovídají i získané hodnoty, z nichž lze odhadovat možnost zvýšení pevnosti vlasů a snížení jejich pružnosti, právě z důvodu četnosti mytí.

Tab. 15: Výsledný aritmetický průměr a směrodatná odchylka porovnávající četnost mytí vlasů.

mytí	1-2 týdny	1-2 dny
průměr E	718,1	1024,8
sm.odch.	389,4	464,9

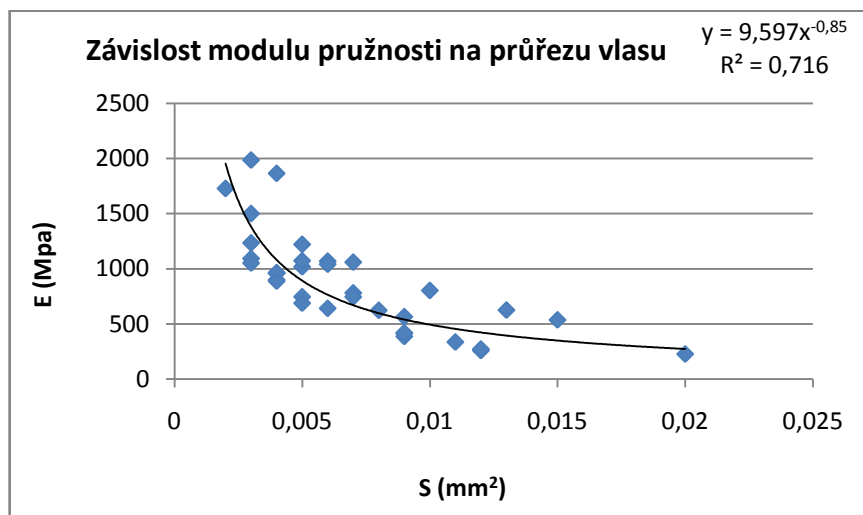
U vzorků měřených do přetržení bylo možné určit maximální napětí (MPa), které vlas ještě vydržel. Výsledky, které byly zjištěny při porovnávání velikosti maximálního napětí u odlišných věkových skupin, jsou uvedeny v Tab. 16. Výsledky pouze naznačují, s ohledem na malý počet vzorků, že ve středním věku (36 – 60 let) jsou vlasy nejtuzší, tedy nejméně pružné. Podobné závěry jsou zveřejněny i v knize Biomechanika, J. Valenta a kol., kde zmiňují práci H. Yamady (1970), který uvádí nejvyšší pevnost vlasu v rozmezí 30 – 59 let. Závěry z této práce jsou uvedeny v diskuzi práce.

Tab. 16: Výsledný aritmetický průměr a směrodatná odchylka velikosti maximálního napětí [MPa] v závislosti na věkové skupině.

max.napětí	(10 - 35)	(36-60)	(61 a více)
průměr E	456,8	656,4	354,5
sm.odch.	197,6	276	122,4

Další uvedené výsledky, jsou závislost modulu pružnosti E [MPa] na průřezu vlasu S [mm²] a závislost maximálního napětí σ [MPa] před přetržením vlasu na průřezu vlasu S [mm²]. V těchto dvou parametrech je zřejmá statisticky významná závislost.

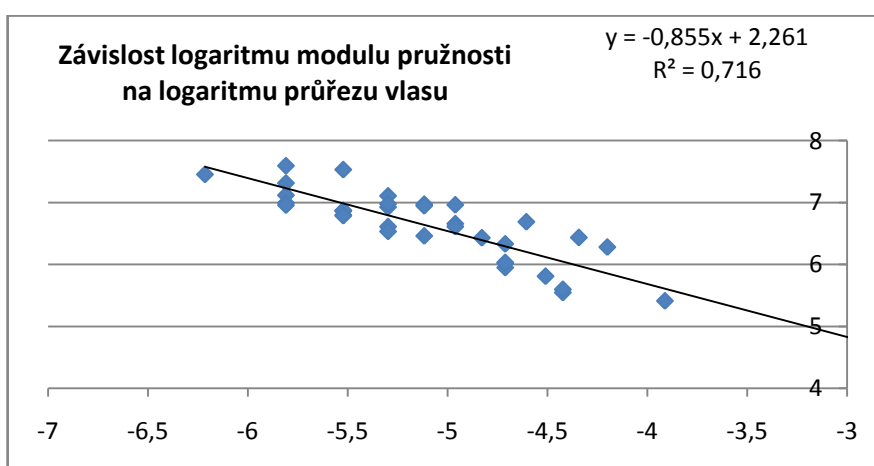
Závislost modulu pružnosti E na průřezu vlasu S . Při zpracování byl vyloučen odlehlý bod $S = 0,007$ $E = 146$ MPa.



Obr. 20: Závislost modulu pružnosti na průřezu vlasu.

Jedná se o mocninovou funkci, v logaritmických souřadnicích se jeví jako lineární.

$$E = 9,60 * S^{-0,855} \quad \ln E = -0,855 * \ln S + 2,26 \quad (10, 11)$$



Obr. 21: Linearizace mocninové funkce. Závislost logaritmu modulu pružnosti na logaritmu průřezu vlasu.

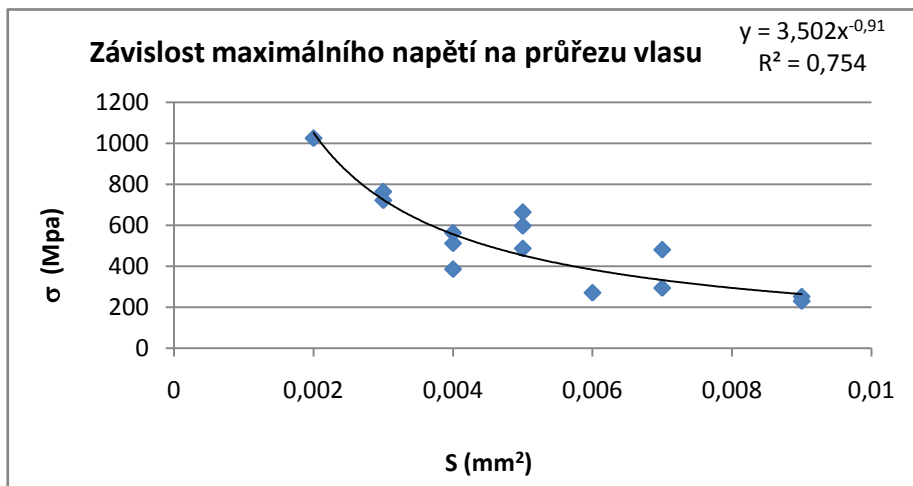
Tab. 17: Hodnoty pro výpočet závislosti modulu pružnosti E na ploše průřezu.

S	E	ln S	ln E		R2	0,716	
0,004	897	-5,52146	6,799056		R	0,846	
0,005	1016	-5,29832	6,923629		R0,01	0,43	Pro n = 35
0,003	1985	-5,80914	7,593374		R>>R0,01		
0,006	1067	-5,116	6,972606		Hladina významnosti p<0,01		
0,006	1039	-5,116	6,946014		(závislost je vysoce významná)		
0,015	534	-4,19971	6,280396				
0,005	1220	-5,29832	7,106606				
0,005	744	-5,29832	6,612041				
0,003	1499	-5,80914	7,312553				
0,005	1071	-5,29832	6,976348				
0,009	563	-4,71053	6,33328				
0,007	779	-4,96185	6,658011				
0,005	686	-5,29832	6,530878				
0,006	639	-5,116	6,459904				
0,01	801	-4,60517	6,685861				
0,012	256	-4,42285	5,545177				
0,011	333	-4,50986	5,808142				
0,007	743	-4,96185	6,610696				
0,008	621	-4,82831	6,431331				
0,004	959	-5,52146	6,865891				
0,004	960	-5,52146	6,866933				
0,003	1233	-5,80914	7,117206				
0,004	961	-5,52146	6,867974				
0,004	886	-5,52146	6,786717				
0,009	384	-4,71053	5,950643				
0,013	623	-4,34281	6,434547				
0,012	269	-4,42285	5,594711				
0,009	413	-4,71053	6,023448				
0,02	224	-3,91202	5,411646				
0,009	416	-4,71053	6,030685				
0,007	1058	-4,96185	6,964136				
0,003	1091	-5,80914	6,99485				
0,002	1727	-6,21461	7,454141				
0,003	1050	-5,80914	6,956545				
0,004	1864	-5,52146	7,53048				
Vyloučen odlehlý bod							
0,007	146						

Z výsledných grafů (Obr. 20, Obr. 21) a naměřených hodnot (Tab. 17) vyplývá, že vlasy s největší plochou průřezu mají největší modul pružnosti E, tudíž nejvyšší

tuhost. Proto k jejich přetržení je zapotřebí nejnižší síla. Vlasy s menšími průměry jsou více elastické, a tudíž odolají větší síle namáhání v tahu.

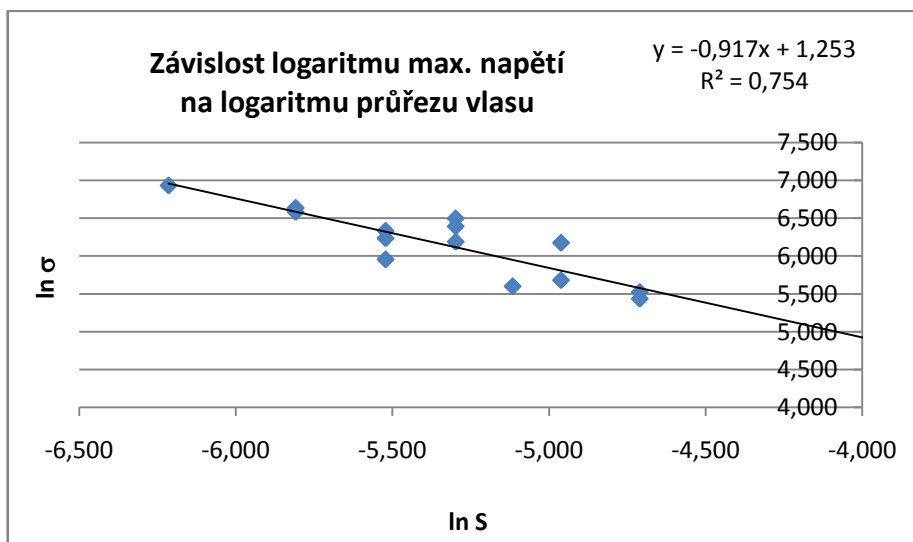
Závislost maximálního napětí σ [MPa] před přetržením vlasu na ploše průřezu vlasu S [mm²]. Jedná se o statisticky významnou závislost. Při zpracování byl vyloučen odlehlý bod č. 3 $S=0,004$ $\sigma_{\max}=207$ MPa



Obr. 22: Závislost maximálního napětí na průřezu vlasu.

Opět jde o mocninnou funkci, která se v logaritmických souřadnicích jeví jako lineární.

$$E = 3,50 * \sigma^{-0,918} \quad \ln E = -0,918 * \ln \sigma + 1,25 \quad (12, 13)$$



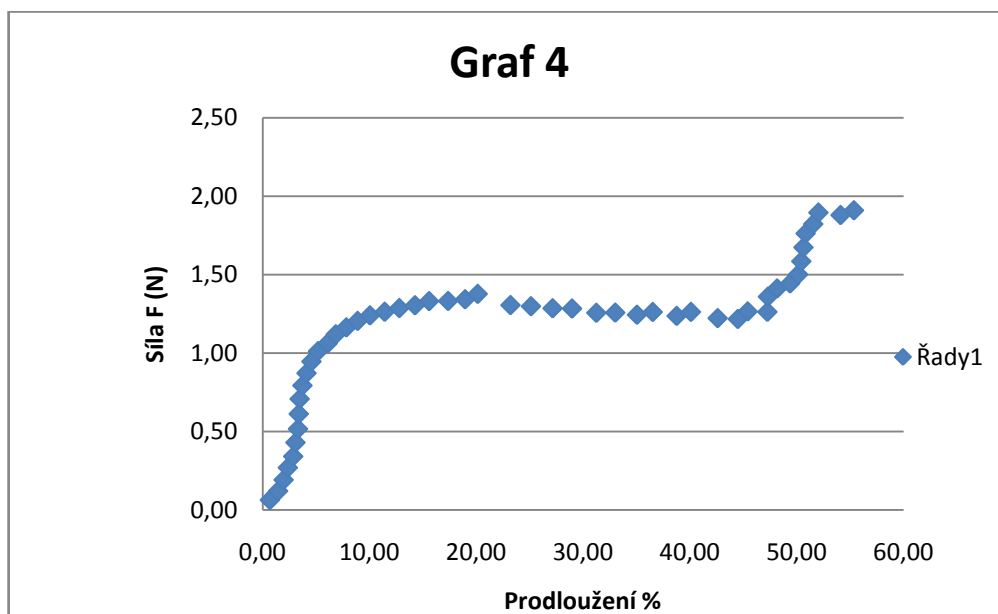
Obr. 23: Linearizace mocninné funkce. Závislost logaritmu maximálního napětí σ_{\max} [MPa] na logaritmu průřezu vlasu S [mm²].

Tab. 18: Hodnoty pro výpočet závislosti maximálního napětí σ_{\max} [MPa] na ploše průřezu S [mm²].

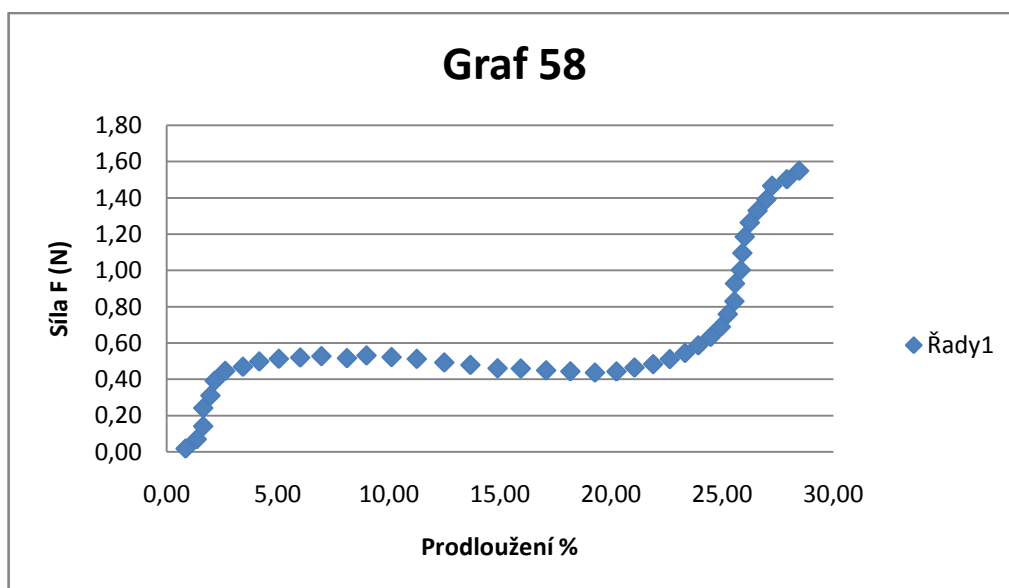
vzorky, u kterých došlo k přetržení						R2	0,7548	
přetržení	průřez	max napětí	ln S	ln s		R	0,869	
6	0,004	385	-5,521	5,953		R0,01	0,661	Pro n = 14
7	0,004	511	-5,521	6,236		R>>0,01		
8	0,006	270	-5,116	5,598		vysoce významná závislost		
13	0,005	663	-5,298	6,497				
14	0,003	763	-5,809	6,637				
27	0,003	721	-5,809	6,581				
28	0,005	596	-5,298	6,390				
29	0,009	251	-4,711	5,525				
30	0,007	480	-4,962	6,174				
32	0,005	486	-5,298	6,186				
40	0,004	562	-5,521	6,332				
53	0,002	1024	-6,215	6,931				
73	0,009	229	-4,711	5,434				
75	0,007	293	-4,962	5,680				

Z výsledných grafů (Obr. 22, Obr. 23) a naměřených hodnot (Tab. 18) je zřejmá skutečnost, že vlasy s menší plochou průřezu odolávají vyšším hodnotám maximálního napětí než vlasy s větší plochou průřezu.

Jako poslední jsou uvedeny příklady obrázků grafů (Obr. 24 Obr. 25), které musely být vyřazeny z vyhodnocování, protože neobsahovaly vyhodnotitelný lineární úsek, ze kterého by bylo možno směrnicí získat modul pružnosti E a byly měřeny pouze do prodloužení, ne do přetržení. Proto nebyly získány ani údaje o maximálním napětí σ_{\max} .



Obr. 24: Nepoužitelný graf, který bylo nutné z vyhodnocení vyřadit. Př. 1.



Obr. 25: Nepoužitelný graf, který bylo nutné z vyhodnocení vyřadit. Př. 2.

3.5 Diskuze

Práce se zabývala namáháním vlasů v tahu a následně porovnávala získané strain-stress křivky lidských vlasů, ze kterých byly určovány mechanické parametry modul pružnosti v tahu E (Youngův modul) [MPa] a maximální napětí U_{\max} [MPa], které vlas ještě vydržel. V průběhu měření se jako problematické ukázalo uchycení vlasu, který při vyšších hodnotách namáhání prokluzoval. Celé měření bylo navíc provázeno problémy s přístrojem. Jako nejpravděpodobnější se jeví, že byly způsobeny opotřebením kontaktů na spoji čidla měřidla a počítače. Proto došlo ke zkreslení řady výsledků, některé křivky dokonce musely být vyřazeny z vyhodnocení. Výsledky pak byly ovlivněny malým počtem vzorků pro zpracování dat. Dalšími důvody, které mohly stát za zkreslenými výsledky, byly lidská chyba, chyba softwaru a špatný kvalitativní stav vzorků, které v některých případech nebyly odstříženy, ale pouze vybrány z hřebene nebo kartáče, takže mohly být mechanicky poškozeny.

Z charakteristik vzorků byly porovnávány biomechanické vlastnosti na základě věkového rozložení (10-35), (36 – 60) a (61 a více). Vzorky byly porovnávány na základě aritmetického průměru hodnot modulu pružnosti E [MPa] (Tab. 11). Skupina 61 let a více obsahovala pouze jednu použitelnou křivku, proto nemohla být do srovnání použita. Mezi skupinami (10 – 35) a (36 – 60) let nebyl statisticky významný rozdíl.

Deformabilitou lidské vlasové tkáně a měřením mechanických vlastností v tahu v závislosti na věku se zabývá J. Valenta a kol. V knize Biomechanika uvádí hodnoty měření H. Yamady, Strength of Biological materials (1970). Uvádějí hodnoty mechanických parametrů, jako je průměrná síla potřebná k přetržení vlasů, pevnost v tahu a maximální protažení právě v závislosti na věku jedince. V Tab. 19 je uvedena nejvyšší síla potřebná k přetržení vlasů ve věkové skupině 20 – 29 let a pro mladší i starší osoby klesá pod 50 % nejvyšší hodnoty. Maximální pevnost v tahu vykazují vlasy z hlavy ve věku od 30 do 59 let. Její pokles se vzrůstajícím, ale i se snižujícím se věkem klesá asi na 65 % nejvyšší pevnosti [66][67].

Erik a kol., měřili vzorky vlasů na základě věkových skupin (16 – 30), (31 – 45) a (46 – 62). Na základě věku nezaznamenali žádný rozdíl v mechanickém chování lidských vlasů [27].

Při porovnávání hodnoty maximálního napětí, které vlas ještě vydržel v závislosti na věku (Tab. 16), naše výsledky naznačují, že by vlas mohl být nejtuzší ve

středním věku (36 – 60) let. Určení jasné závislosti mechanických vlastností na věku by vyžadovalo přesnější a spolehlivější aparaturu a větší počet měřených vzorků. S ohledem na namáhání vlasů v průběhu celého života a na rozdílnou péči bude možná obtížné najít jasnou souvislost, zda se dá určit přibližný věk člověka na základě biomechanických vztahů.

Tab. 19: Mechanické vlastnosti v tahu lidských vlasů [66][67].

Věk (roky)	(0 - 9)	(10 - 19)	(20 -29)	(30 - 39)	(40 - 49)	(50 - 59)	(60 - 69)	(70 - 79)	(80 - 89)
Průměrná síla potřebná k přetržení vlasů 10-2 N	84 +/-2	160	172	155	138	119	94 +/-2	80 +/-3	78 +/-1
Pevnost v tahu [Mpa]	145 +/-3	213 +/-1	223 +/-1	230 +/-1	230 +/-1	230 +/-1	174 +/-1	151 +/-5	144 +/-3
Maximální protažení (%)	40 +/-1	46 +/-1	43 +/-1	43 +/-1	39 +/-1	39 +/-1	39 +/-1	39 +/-1	39 +/-1

Dalším parametrem, který nevykazoval statisticky významný rozdíl, bylo používání kondicionálních přípravků. Výsledky jsou uvedeny v Tab. 12. Vzhledem k tomu, že kondicionální přípravky jsou určeny k aplikování na povrch vlasu a neprostupují do jeho hlubších vrstev a na mechanické vlastnosti vlasu má vliv hlavně korová vrstva, jsou tyto hodnoty v souladu s naším očekáváním [51][68].

Při zkoumání vlivu barvení na mechanické vlastnosti vlasu (Tab. 13), jsme taktéž nedospěli k statisticky významným rozdílům. Ovšem i barvení vlasů se týká převážně povrchu vlasu, proto se domníváme, že důvody shody výsledných parametrů mohou být stejné, jako u používání kondicionálních přípravků. Mechanické vlastnosti vlasů by mohly být ovlivněny jak způsobem barvení, tak i předchozím odbarvováním. Platí, že čím více byl vlas poškozen před barvením, tím více jím barva prostupuje a dostává se do hlubších vrstev [55]. Toto je nejvíce zřejmé u odbarvovaných vlasů, které jsou méně elastické a více porézní [69].

Data, získaná při porovnávání vlivu fénování a volného sušení na vlasy, jsou statisticky málo významná, ale naznačují jisté zvýšení modulu pružnosti E u vlasů fénovaných horkým vzduchem (Tab. 14). Rebenfeld a kol., ve své práci uvádějí, že

hodnoty modulu elasticity a modulu meze pevnosti se snižují se zvyšující se teplotou, zatímco roztažnost vlákna začíná růst při teplotě 85,5°C. U poškozených vlasů tyto změny nastávají už při 66°C [59]. Změřené hodnoty, prezentovány v této práci nebyly měřeny přímo při fénování, tedy modul elasticity nebyl významně ovlivněn. Ale lze uvažovat, že změny, které nastaly opakovaným vystavováním vlasů při vyšších teplotách v průběhu fénování mohou způsobovat vyšší tuhost a snižující se pružnost vlasů za normálních podmínek.

Při pozorování vlivu četnosti mytí vlasů na jejich pružnost (Tab. 15), získaná data naznačují, že častější mytí vlasů snižuje jejich pružnost a zvyšuje pevnost. Při častém mytí vlasů se značně porušuje mazová vrstva chránící povrch vlasu. Pro mechanickou odolnost je podstatná celistvost kutikuly jako ochranné vrstvy. Maz usazující se na vlasech slouží jako přirozená ochrana, která zabraňuje odchlípnutí šupinek kutikuly [68]. Při porušení a následném odchlípnutí kutikulární vrstvy, může dojít i k ovlivnění korové vrstvy, kterému odpovídají i výše uvedené výsledky a tudíž dojde ke snížení pružnosti vlasu.

Modul pružnosti E byl kromě výše uvedených charakteristik dáván do souvislosti i s plochou průřezu vlasu. Zde byla určena statisticky významná závislost, kdy s klesající plochou průřezu vlasu [mm²] roste modul pružnosti E [MPa]. (Obr. 20, Obr. 21, Tab. 17).

Erik a kol., porovnávali sílu nutnou k přetržení vlasu v závislosti na průměru [27].

Vzhledem k platnosti vztahu, napětí σ [Pa] je poměr síly F [N] a plochy S [mm²].

$$\sigma = \frac{F}{S} \quad (14)$$

Dále platí, že napětí je součin modulu pružnosti E [MPa] a deformace ε [%].

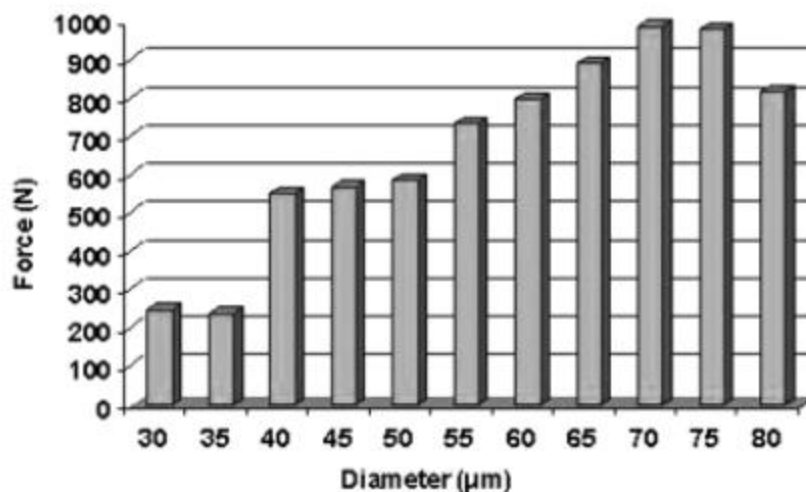
$$\sigma = E * \varepsilon \quad (15)$$

Tak pro výpočet síly získáme úpravou vztah:

$$F = S * E * \varepsilon \quad (16)$$

Tedy závěr získaný z práce Biomechanical properties of human hair with different parameters (Erik a kol.), kteří uvedli přímou souvislost mezi vzrůstajícím průměrem vlasu a rostoucí silou potřebnou k jeho přetržení (Obr. 26) [27], můžeme vztáhnout i k našim výsledkům, kdy největší modul pružnosti E vykazují vlasy s nejmenší plochou průřezu a naopak nejnižší modul pružnosti je u vlasů s největší plochou průměru. Tedy mechanické vlastnosti vlasu jsou přímo úměrné povrchu průřezu vlasu.

Stejného závěru bylo dosaženo i v případě, kdy bylo porovnáváno maximální napětí, které vlas vydrží σ_{\max} [MPa] a plocha průřezu vzorku [mm²]. Kdy jsme z našich výsledků měření (Obr. 22, Obr. 23, Tab. 18) došli k závěru, že vlasy s nejmenším průměrem vydrží největší napětí a naopak nejsilnější vlasy při přetržení odolaly napětí nejmenšímu, což nám dává neúměrný vztah mezi průměrem vlasu a napětím. Což je v souladu s teoretickými předpoklady.



Obr. 26: Sloupcový graf zobrazující závislost síly, potřebné k přetržení vlasu na průměru vlasu [27].

Budoucí výzkum lidských vlasů, ať už z biomechanického hlediska, ale i z dalších pohledů, např. zkoumání lidských vlasů na základě změny aminokyselinového složení nebo pomocí skenovacích metod, by mohl být přínosným vzhledem ke snaze o neinvazivní medicínu. Vlas je velice snadno dostupný zdroj informací o stavu lidského těla. Vzhledem k rychlosti růstu vlasu, přibližně 1 cm za měsíc, odráží celkový stav lidského organismu. Tato skutečnost se již využívá při testech na přítomnost návykových látek [70]. Už dlouho se spekuluje o možnosti použití při diagnostice, případně jako neinvazivní screeningová metoda pro odhalení rakovinného bujení [71][72].

Přínos vypracování své diplomové práce vidím hlavně v otevření možnosti zkoumání vlasů na Katedře biofyziky a fyzikální chemie FaF UK. Ačkoli se problémy s přístrojem a uchycením vzorku projevily na výsledku práce, v průběhu měření se metoda uchycování vzorku zdokonalovala a věřím, že při další práci by se způsob uchycení ještě zdokonalil.

4. Závěr

V práci bylo cílem proměřit statické charakteristiky (strain-stress) křivky vlasů a zjistit jejich závislost na věku. Dále byly zkoumány vztahy mezi nejčastěji používanými kosmetickými a hygienickými procesy (četnost mytí, používání kondičních přípravků, barvení vlasů a fénování vlasů). Hodnoty se porovnávaly pomocí aritmetického průměru naměřených hodnot modulů pružnosti E (Youngova modulu) a maximálního napětí, které vlas ještě snesl.

V otázce závislosti věku na mechanických parametrech jsme nenašli žádnou statisticky významnou vazbu mezi věkem a modulem pružnosti E. Hodnoty maximálního napětí pouze naznačují, že vlas by mohl mít nejvyšší tuhost v střední věkové skupině (36 – 60).

Při porovnávání vlivu kosmetických a hygienických procesů jsme opět nezjistili žádnou statisticky významnou závislost. Dospěli jsme pouze k výsledkům, které naznačují, že časté mytí (1 – 2) dny a sušení vlasů pomocí fénu, může zvyšovat modul pružnosti vlasu E, tedy zvyšovat tuhost vlasu. Vliv používání/nepoužívání kondičních přípravků a barvení vlasů neměl dle našeho měření vliv na hodnoty modulu pružnosti E.

Významnou statistickou závislost jsme prokázali pouze u hodnot modulu pružnosti E, které klesají se zvětšující se plochou průřezu vlasu. Stejnou závislost jsme prokázali i u maximálního napětí, kdy k přetržení nejsilnějšího vlasu je třeba nejmenší maximální napětí.

5. Seznam použité literatury

- [1] *Přehled výzkumné činnosti - Farmaceutická fakulta UK v Hradci Králové* [online]. [vid. 2016-08-23]. Dostupné z: <http://www.faf.cuni.cz/Fakulta/Organizacni-struktura/Katedry/Katedra-biofyziky-a-fyzikalni-chemie/Vyzkum/>
- [2] ČIHÁK, Radomír. *Anatomie 3*. Praha: Grada, 1997. ISBN 80-7169-140-2.
- [3] LAI-CHEONG, Joey E. a John A. MCGRATH. Structure and function of skin, hair and nails. *Dermatology Part 1 of 2* [online]. 2009, roč. 37, č. 5, s. 223–226. ISSN 1357-3039. Dostupné z: doi:10.1016/j.mpmed.2009.03.002
- [4] TOBIN, Desmond J. Biochemistry of human skin-our brain on the outside. *Chemical Society Reviews* [online]. 2006, roč. 35, č. 1, s. 52–67. ISSN 0306-0012. Dostupné z: doi:10.1039/B505793K
- [5] TERZINI, Mara, Cristina BIGNARDI, Carlotta CASTAGNOLI, Irene CAMBIERI, Elisabetta M. ZANETTI a Alberto L. AUDENINO. Dermis mechanical behaviour after different cell removal treatments. *Medical Engineering & Physics* [online]. 2016 [vid. 2016-06-29]. ISSN 13504533. Dostupné z: doi:10.1016/j.medengphy.2016.02.012
- [6] KITTNAR, Otomar. *Lékařská fyziologie*. Praha: Grada, 2011. ISBN 978-80-247-3068-4.
- [7] STRELKOV, Sergei V., Harald HERRMANN a Ueli AEBI. Molecular architecture of intermediate filaments. *BioEssays* [online]. 2003, roč. 25, č. 3, s. 243–251. ISSN 0265-9247, 1521-1878. Dostupné z: doi:10.1002/bies.10246
- [8] LEE, Chang-Hun, Min-Sung KIM, Byung Min CHUNG, Daniel J LEAHY a Pierre A COULOMBE. Structural basis for heteromeric assembly and perinuclear organization of keratin filaments. *Nature Structural & Molecular Biology* [online]. 2012, roč. 19, č. 7, s. 707–715. ISSN 1545-9993, 1545-9985. Dostupné z: doi:10.1038/nsmb.2330
- [9] CHOU, Chia-Ching a Markus J. BUEHLER. Structure and Mechanical Properties of Human Trichocyte Keratin Intermediate Filament Protein. *Biomacromolecules* [online]. 2012, roč. 13, č. 11, s. 3522–3532. ISSN 1525-7797, 1526-4602. Dostupné z: doi:10.1021/bm301254u
- [10] WANG, Bin, Wen YANG, Joanna MCKITTRICK a Marc André MEYERS. Keratin: Structure, mechanical properties, occurrence in biological organisms, and efforts at bioinspiration. *Progress in Materials Science* [online]. 2016, roč. 76, s. 229–318. ISSN 0079-6425. Dostupné z: doi:10.1016/j.pmatsci.2015.06.001

- [11] CRICK, F. H. C. Is α -Keratin a Coiled Coil? *Nature* [online]. 1952, roč. 170, č. 4334, s. 882–883. ISSN 0028-0836. Dostupné z: doi:10.1038/170882b0
- [12] CRICK, F. H. C. The packing of α -helices: simple coiled-coils. *Acta Crystallographica* [online]. 1953, roč. 6, č. 8, s. 689–697. ISSN 0365110X. Dostupné z: doi:10.1107/S0365110X53001964
- [13] ER RAFIK, Mériem, Jean DOUCET a Fatma BRIKI. The Intermediate Filament Architecture as Determined by X-Ray Diffraction Modeling of Hard α -Keratin. *Biophysical Journal* [online]. 2004, roč. 86, č. 6, s. 3893–3904. ISSN 0006-3495. Dostupné z: doi:10.1529/biophysj.103.034694
- [14] *Český lékopis 2009. Díl 1: Evropská část, národní část*. Praha: Grada Publ, 2009. ISBN 978-80-247-2994-7.
- [15] SCHWEIZER, Jürgen, Paul E. BOWDEN, Pierre A. COULOMBE, Lutz LANGBEIN, E. Birgitte LANE, Thomas M. MAGIN, Lois MALTAIS, M. Bishr OMARY, David A.D. PARRY, Michael A. ROGERS a Mathew W. WRIGHT. New consensus nomenclature for mammalian keratins. *The Journal of Cell Biology* [online]. 2006, roč. 174, č. 2, s. 169–174. ISSN 0021-9525, 1540-8140. Dostupné z: doi:10.1083/jcb.200603161
- [16] FUDGE, D. S. a J. M. GOSLINE. Molecular design of the -keratin composite: insights from a matrix-free model, hagfish slime threads. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences* [online]. 2004, roč. 271, č. 1536, s. 291–299. ISSN 0962-8452, 1471-2954. Dostupné z: doi:10.1098/rspb.2003.2591
- [17] MILITKÝ, Jiří, TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI a KATEDRA TEXTILNÍCH MATERIÁLŮ. *Textilní vlákna: klasická a speciální*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2002. ISBN 978-80-7083-644-6.
- [18] KASAPI, M. A. a J. M. GOSLINE. Strain-rate-dependent mechanical properties of the equine hoof wall. *The Journal of Experimental Biology*. 1996, roč. 199, č. Pt 5, s. 1133–1146. ISSN 0022-0949.
- [19] BERTRAM, J. E. a J. M. GOSLINE. Functional design of horse hoof keratin: the modulation of mechanical properties through hydration effects. *The Journal of Experimental Biology*. 1987, roč. 130, s. 121–136. ISSN 0022-0949.
- [20] SHIMOMURA, Yutaka a Angela M. CHRISTIANO. Biology and Genetics of Hair. *Annual Review of Genomics and Human Genetics* [online]. 2010, roč. 11, č. 1, s. 109–132. ISSN 1527-8204, 1545-293X. Dostupné z: doi:10.1146/annurev-genom-021610-131501
- [21] BAZZI, Hisham, Alison GETZ, My G. MAHONEY, Akemi ISHIDA-YAMAMOTO, Lutz LANGBEIN, James K. WAHL a Angela M. CHRISTIANO. Desmoglein 4 is expressed in

- highly differentiated keratinocytes and trichocytes in human epidermis and hair follicle. *Differentiation* [online]. 2006, roč. 74, č. 2–3, s. 129–140. ISSN 03014681. Dostupné z: doi:10.1111/j.1432-0436.2006.00061.x
- [22] BAZZI, Hisham, Shadmehr DEMEHRI, Christopher S. POTTER, Alison G. BARBER, Alexander AWGULEWITSCH, Raphael KOPAN a Angela M. CHRISTIANO. Desmoglein 4 is regulated by transcription factors implicated in hair shaft differentiation. *Differentiation* [online]. 2009, roč. 78, č. 5, s. 292–300. ISSN 0301-4681. Dostupné z: doi:10.1016/j.diff.2009.06.004
- [23] SIMON, Michel, Nathalie JONCA, Marina GUERRIN, Marek HAFTEK, Dominique BERNARD, Cécile CAUBET, Torbjörn EGELRUD, Rainer SCHMIDT a Guy SERRE. Refined Characterization of Corneodesmosin Proteolysis during Terminal Differentiation of Human Epidermis and Its Relationship to Desquamation. *Journal of Biological Chemistry* [online]. 2001, roč. 276, č. 23, s. 20292–20299. ISSN 0021-9258, 1083-351X. Dostupné z: doi:10.1074/jbc.M100201200
- [24] DUVEL, L., H. CHUN, D. DEPPA a P. W. WERTZ. Analysis of hair lipids and tensile properties as a function of distance from scalp. *International Journal of Cosmetic Science* [online]. 2005, roč. 27, č. 4, s. 193–197. ISSN 0142-5463, 1468-2494. Dostupné z: doi:10.1111/j.1467-2494.2005.00236.x
- [25] LEE, Won-Soo, Tak Heon OH, Seung Hyun CHUN, Soo Young JEON, Eun Young LEE, Sanghoon LEE, Won-Seok PARK a Sungjoo HWANG. Integral Lipid in Human Hair Follicle. *Journal of Investigative Dermatology Symposium Proceedings* [online]. 2005, roč. 10, č. 3, s. 234–237. ISSN 10870024. Dostupné z: doi:10.1111/j.0022-202X.2005.10113.x
- [26] MANELI, M. H., K. MKENTANE a N. P. KHUMALO. Lipid distribution and influence on hair structure. *International Journal of Cosmetic Science* [online]. 2013, roč. 35, č. 5, s. 523–523. ISSN 01425463. Dostupné z: doi:10.1111/ics.12070
- [27] ERIK, Berivan, Hasan HAVITCIOGLU, Sebnem AKTAN a Nuriye KARAKUS. Biomechanical properties of human hair with different parameters. *Skin Research and Technology* [online]. 2008, roč. 14, č. 2, s. 147–151. ISSN 1600-0846. Dostupné z: doi:10.1111/j.1600-0846.2007.00268.x
- [28] PAULSEN, Douglas F, Václava KONRÁDOVÁ, Jiří UHLÍK a Luděk VAJNER. *Histologie a buněčná biologie: opakování a příprava ke zkouškám*. Jinočany: H & H, 2004. ISBN 978-80-7319-024-8.
- [29] KLIKA, Eduard, ed. *Histologie pro stomatology: učebnice pro lékařské fakulty*. Praha: Avicenum, 1988.
- [30] PLOWMAN, Jeffrey E., Duane P. HARLAND, Sivasangary GANESHAN, Joy L. WOODS, Bede VAN SHAIJK, Santanu DEB-CHOUDHURY, Ancy THOMAS, Stefan CLERENS a

- David R. SCOBIE. The proteomics of wool fibre morphogenesis. *Journal of Structural Biology* [online]. 2015, roč. 191, č. 3, s. 341–351. ISSN 10478477. Dostupné z: doi:10.1016/j.jsb.2015.07.005
- [31] MARTÍNEK, Jindřich a Zdeněk VACEK. *Histologický atlas*. Praha: Grada, 2009. ISBN 978-80-247-2393-8.
- [32] BHUSHAN, Bharat. Nanoscale characterization of human hair and hair conditioners. *Progress in Materials Science* [online]. 2008, roč. 53, č. 4, s. 585–710. ISSN 00796425. Dostupné z: doi:10.1016/j.pmatsci.2008.01.001
- [33] RICHENA, M. a C.A. REZENDE. Morphological degradation of human hair cuticle due to simulated sunlight irradiation and washing. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology* [online]. 2016, roč. 161, s. 430–440. ISSN 10111344. Dostupné z: doi:10.1016/j.jphotobiol.2016.06.002
- [34] TANG, W., S.G. ZHANG, J.K. ZHANG, S. CHEN, H. ZHU a S.R. GE. Ageing effects on the diameter, nanomechanical properties and tactile perception of human hair. *International Journal of Cosmetic Science* [online]. 2016, roč. 38, č. 2, s. 155–163. ISSN 01425463. Dostupné z: doi:10.1111/ics.12269
- [35] ARENBERGER, Petr a Iva OBSTOVÁ. *Obecná dermatovenerologie*. Praha: Czechopress Agency, 2001. ISBN 978-80-902632-4-6.
- [36] BRYCHTA, Pavel, Jan J STANEK a Yvonne BERGEROVÁ. *Estetická plastická chirurgie a korektivní dermatologie*. Praha: Grada, 2014. ISBN 978-80-247-0795-2.
- [37] HERTEL, Johannes, Nele FRIEDRICH, Katharina WITTFELD, Maik PIETZNER, Kathrin BUDDE, Sandra VAN DER AUWERA, Tobias LOHMANN, Alexander TEUMER, Henry VÖLZKE, Matthias NAUCK a Hans Jürgen GRABE. Measuring Biological Age via Metabonomics: The Metabolic Age Score. *Journal of Proteome Research* [online]. 2016, roč. 15, č. 2, s. 400–410. ISSN 1535-3893, 1535-3907. Dostupné z: doi:10.1021/acs.jproteome.5b00561
- [38] TRUEB, Ralph M. Aging of hair. *Journal of Cosmetic Dermatology* [online]. 2005, roč. 4, č. 2, s. 60–72. ISSN 1473-2130, 1473-2165. Dostupné z: doi:10.1111/j.1473-2165.2005.40203.x
- [39] TAKAHASHI, Toshie, Akira MAMADA, Steven BREAKSPEAR, Takashi ITOU a Noriyuki TANJI. Age-dependent changes in damage processes of hair cuticle. *Journal of Cosmetic Dermatology* [online]. 2015, roč. 14, č. 1, s. 2–8. ISSN 14732130. Dostupné z: doi:10.1111/jocd.12129

- [40] TAKAHASHI, T., R. HAYASHI, M. OKAMOTO a S. INOUE. Morphology and properties of Asian and Caucasian hair. *Journal of Cosmetic Science*. 2006, roč. 57, č. 4, s. 327–338. ISSN 1525-7886.
- [41] ROBBINS, Clarence. The cell membrane complex: three related but different cellular cohesion components of mammalian hair fibers. *Journal of Cosmetic Science*. 2009, roč. 60, č. 4, s. 437–465. ISSN 1525-7886.
- [42] OKAMOTO, Masayuki, Kazutaka ISHIKAWA, Noriyuki TANJI a Satoka AOYAGI. Investigation of the damage on the outermost hair surface using ToF-SIMS and XPS: Damage on the outermost hair surface using ToF-SIMS and XPS. *Surface and Interface Analysis* [online]. 2012, roč. 44, č. 6, s. 736–739. ISSN 01422421. Dostupné z: doi:10.1002/sia.3878
- [43] *Vlasový aktivátor pro ženy Spectral CSF* / www.biome.cz [online]. [vid. 2016-08-12]. Dostupné z: <http://www.biome.cz/vlasovy-aktivator-pro-zeny-spectral-csf>
- [44] SHIN, Hyoseung, Hyeong Ho RYU, Junghee YOON, Seongmoon JO, Sihyeok JANG, Mira CHOI, Ohsang KWON a Seong Jin JO. Association of premature hair graying with family history, smoking, and obesity: A cross-sectional study. *Journal of the American Academy of Dermatology* [online]. 2015, roč. 72, č. 2, s. 321–327. ISSN 01909622. Dostupné z: doi:10.1016/j.jaad.2014.11.008
- [45] DARIO, Michelli F., André R. BABY a Maria Valéria R. VELASCO. Effects of solar radiation on hair and photoprotection. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology* [online]. 2015, roč. 153, s. 240–246. ISSN 10111344. Dostupné z: doi:10.1016/j.jphotobiol.2015.09.025
- [46] NARAYANAN, Deevya L., Rao N. SALADI a Joshua L. FOX. Review: Ultraviolet radiation and skin cancer: UVR and skin cancer. *International Journal of Dermatology* [online]. 2010, roč. 49, č. 9, s. 978–986. ISSN 00119059. Dostupné z: doi:10.1111/j.1365-4632.2010.04474.x
- [47] KOJIMA, Toru, Hiromi YAMADA, Mitsuru ISOBE, Toshihiko YAMAMOTO, Miyuki TAKEUCHI, Dan AOKI, Yasuyuki MATSUSHITA a Kazuhiko FUKUSHIMA. Compositional changes of human hair melanin resulting from bleach treatment investigated by nanoscale secondary ion mass spectrometry. *Skin Research and Technology* [online]. 2014, roč. 20, č. 4, s. 416–421. ISSN 0909752X. Dostupné z: doi:10.1111/srt.12133
- [48] ITO, Shosuke, Yukiko NAKANISHI, Robert K. VALENZUELA, Murray H. BRILLIANT, Ludger KOLBE a Kazumasa WAKAMATSU. Usefulness of alkaline hydrogen peroxide oxidation to analyze eumelanin and pheomelanin in various tissue samples: application to chemical analysis of human hair melanins: Alkaline hydrogen peroxide oxidation of melanin. *Pigment Cell & Melanoma Research* [online]. 2011, roč. 24, č. 4, s. 605–613. ISSN 17551471. Dostupné z: doi:10.1111/j.1755-148X.2011.00864.x

- [49] SIGNORI, V. Review of the current understanding of the effect of ultraviolet and visible radiation on hair structure and options for photoprotection. *International Journal of Cosmetic Science* [online]. 2004, roč. 26, č. 4, s. 219–219. ISSN 0142-5463, 1468-2494. Dostupné z: doi:10.1111/j.0142-5463.2004.00223_7.x
- [50] FERNÁNDEZ, Estibalitz, Blanca MARTÍNEZ-TEIPEL, Ricard ARMENGOL, Clara BARBA a Luisa CODERCH. Efficacy of antioxidants in human hair. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology* [online]. 2012, roč. 117, s. 146–156. ISSN 10111344. Dostupné z: doi:10.1016/j.jphotobiol.2012.09.009
- [51] ZHANG, Yuchen, Richard J. ALSOP, Asfia SOOMRO, Fei-Chi YANG a Maikel C. RHEINSTÄDTER. Effect of shampoo, conditioner and permanent waving on the molecular structure of human hair. *PeerJ* [online]. 2015, roč. 3, s. e1296. ISSN 2167-8359. Dostupné z: doi:10.7717/peerj.1296
- [52] KOCH, J., K. AITZETMULLER, G. BITTORF a J. WAIBEL. Hair lipids and their contribution to the perception of hair oiliness. Part I: surface and internal lipids in hair. 1982, roč. 33, č. 7, s. 317–326. ISSN 00379832.
- [53] GOULD, Jacalyn G. a Raymond L. SNEATH. Electron microscopy-image analysis: Quantification of ultrastructural changes in hair fiber cross sections as a result of cosmetic treatment - Abstract. 1985, roč. 36, č. 1, s. 53–59.
- [54] DRAELOS, Zoe Kececioglu. Cosmetics: An overview. *Current Problems in Dermatology* [online]. 1995, roč. 7, č. 2, s. 45–64. ISSN 10400486. Dostupné z: doi:10.1016/S1040-0486(09)80017-3
- [55] BOLDUC, Chantal a Jerry SHAPIRO. Hair care products: waving, straightening, conditioning, and coloring. *Clinics in Dermatology* [online]. 2001, roč. 19, č. 4, s. 431–436. ISSN 0738081X. Dostupné z: doi:10.1016/S0738-081X(01)00201-2
- [56] NISHIKAWA, Naoki, Yoshiaki TANIZAWA, Shoichi TANAKA, Yasunobu HORIGUCHI a Tetsuo ASAKURA. Structural change of keratin protein in human hair by permanent waving treatment¹This work was presented at the 44th Annual Meeting of the Society of Polymer Science, Japan; 1996, Nagoya, Japan.1. *Polymer* [online]. 1998, roč. 39, č. 16, s. 3835–3840. ISSN 00323861. Dostupné z: doi:10.1016/S0032-3861(97)10299-3
- [57] YANG, Fei-Chi, Yuchen ZHANG a Maikel C. RHEINSTÄDTER. The structure of people's hair. *PeerJ* [online]. 2014, roč. 2, s. e619. ISSN 2167-8359. Dostupné z: doi:10.7717/peerj.619
- [58] LEE, Yoonhee, Youn-Duk KIM, Hye-Jin HYUN, Long-quan PI, Xinghai JIN a Won-Soo LEE. Hair Shaft Damage from Heat and Drying Time of Hair Dryer. *Annals of Dermatology* [online]. 2011, roč. 23, č. 4, s. 455. ISSN 1013-9087, 2005-3894. Dostupné z: doi:10.5021/ad.2011.23.4.455

- [59] REBENFELD, Ludwig, Hans Dietrich WEIGMANN a Cornelia DANSIZER. Temperature Dependence of the Mechanical Properties of Human Hair in Relation to Structure. *Journal of the Society of Cosmetic Chemists*. nedatováno, roč. 17, č. 9, s. 525. ISSN 00378932.
- [60] NIKIFORIDIS, G, C BALAS a D TSAMBAOS. Mechanical parameters of human hair: possible application in the diagnosis and follow-up of hair disorders. *Clinical Physics and Physiological Measurement* [online]. 1992, roč. 13, č. 3, s. 281–290. ISSN 0143-0815. Dostupné z: doi:10.1088/0143-0815/13/3/008
- [61] DANILATOS, G. a M. FEUGHELMAN. The Microfibril-Matrix Relationships in the Mechanical Properties of Keratin Fibers: Part II: The Mechanical Properties of the Matrix During the Extension of an -Keratin Fiber. *Textile Research Journal* [online]. 1980, roč. 50, č. 9, s. 568–574. ISSN 0040-5175. Dostupné z: doi:10.1177/004051758005000908
- [62] BENZARTI, Meriem, Mohamed Ben TKAYA, Cyril Pailler MATTEI a Hassan ZAHOUANI. Hair Mechanical Properties Depending on Age and Origin. *World Academy of Science, Engineering and Technology*. 2011, roč. 5, č. 2, s. 471–477.
- [63] VESELEŇÁKOVÁ, Eva. *Vliv přepětí na změnu mechanických vlastností aorty: diplomová práce*. Hradec Králové: Univerzita Karlova v Praze, Farmaceutická fakulta v Hradci Králové, Katedra biofyziky a fyzikální chemie, Vedoucí diplomové práce: Kuchařová, Monika, 2016.
- [64] KUCHAROVÁ, Monika. *Metodika měření biomechanických vlastností biologických materiálů: disertační práce*. Hradec Králové: Univerzita Karlova v Praze, Farmaceutická fakulta v Hradci Králové, Katedra biofyziky a fyzikální chemie, Školitel: Ďoubal, Stanislav, 2010.
- [65] ĎOUBAL, Stanislav a Iveta HORÁČKOVÁ. *Biofyzika pro studenty farmacie*. Praha: Karolinum, 2000. ISBN 978-80-246-0170-0.
- [66] YAMADA, Hiroshi a F. Gaynor EVANS. *Strength of biological materials*. Baltimore: Williams & Wilkins, 1970. ISBN 978-0-683-09323-0.
- [67] VALENTA, Jaroslav a Jaroslav NĚMEC. *Biomechanika*. Praha: Academia, 1985.
- [68] DAWBER, R. Hair: its structure and response to cosmetic preparations. *Clinics in Dermatology*. 1996, roč. 14, č. 1, s. 105–112. ISSN 0738-081X.
- [69] GRAY, John. Hair care and hair care products. *Clinics in Dermatology* [online]. 2001, roč. 19, č. 2, s. 227–236. ISSN 0738081X. Dostupné z: doi:10.1016/S0738-081X(00)00133-4

- [70] TASSONI, Giovanna, Marta CIPPITELLI, Dora MIRTELLA, Rino FROLDI, Giovanni OTTAVIANI, Massimiliano ZAMPI a Mariano CINGOLANI. DRIVING UNDER THE EFFECT OF DRUGS: HAIR ANALYSIS IN ORDER TO EVALUATE RECIDIVISM. *Forensic Science International* [online]. 2016 [vid. 2016-09-03]. ISSN 03790738. Dostupné z: doi:10.1016/j.forsciint.2016.08.022
- [71] HOWELL, A., J. G. GROSSMANN, K. C. CHEUNG, L. KANBI, D. G. EVANS a S. S. HASNAIN. Can hair be used to screen for breast cancer? *Journal of Medical Genetics*. 2000, roč. 37, č. 4, s. 297–298. ISSN 0022-2593.
- [72] JAMES, V. The importance of good images in using hair to screen for breast cancer. *Journal of Medical Genetics* [online]. 2001, roč. 38, č. 5, s. 16e–16. ISSN 14686244. Dostupné z: doi:10.1136/jmg.38.5.e16

Seznam obrázků

OBR. 1: SNÍMEK ZE SVĚTELNÉHO MIKROSKOPU S VYSOKÝM ROZLIŠENÍM ZOBRAZUJÍCÍ JEDNOTLIVÉ VRSTVY EPIDERMIS A DERMIS (D), S. CORNEUM (SC), S. GRANULOSUM (SG), S. SPINOSUM (SS), S. BASALE (SB), MĚŘÍTKO 30 μ M[4].	- 12 -
OBR. 2: VYOBRAZENÍ LIDSKÉ KŮŽE ZACHYCUJÍCÍ EPIDERMIS (E), DERMIS (D), PODKOŽNÍ TUKOVOU VRSTVU (SCFL), A KOŽNÍ ADNEXA ZAHRNÚJÍCÍ VLASOVÝ FOLIKUL (HF) A VLASOVOU POCHVU (HS), MAZOVOU ŽLÁZU (SG), EKRINNÍ POTNÍ ŽLÁZKU (ESG), MEISSNEROVO TĚLÍSKO (MC) A PACCINIHO TĚLÍSKA (PC) (SENZORICKÁ NERVOVÁ ZAKONČENÍ), KREVNÍ VLÁSEČNICE (BV), VYÚSTĚNÍ POTNÍCH ŽLÁZ (P), NERVOVÉ VLÁKNO (NF) A VOLNÉ NERVOVÉ ZAKONČENÍ (NFE) [4].	- 14 -
OBR. 3: DETAILNÍ MOLEKULÁRNÍ STRUKTURA: INTERMEDIÁRNÍ FILAMENTUM SE SKLÁDÁ Z C- A N- KONCE, KTERÉ NEJSOU SOUČÁSTÍ CENTRÁLNÍ SPIRÁLOVITÉ STRUKTURY. C- A N- KONCE SPOJUJÍ IF VZÁJEMNĚ A S MATRIX. CENTRÁLNÍ ČÁST (46 NM NA DÉLKU) OBSAHUJE 4 A-HELIKÁLNÍ COILED-COIL SPIRÁLOVITÉ STRUKTURY (1A,1B,2A, 2B) A 3 NESPIRÁLOVITÉ SPOJOVACÍ SEKVENCE (L1, L12, L2) [10].	- 16 -
OBR. 4: SCHEMATICKÉ ZNÁZORNĚNÍ TVORBY INTERMEDIÁRNÍCH FILAMENT: A-HELIXOVÉ ŠROUBOVICE SE STÁČEJÍ A FORMUJÍ DIMERY, KTERÉ SE NÁSLEDNĚ SHLUKUJÍ A FORMUJÍ PROTOFILAMENTA. ZE 4 PROTOFILAMENT, KTERÁ SE BOČNĚ SPOJÍ, VZNIKÁ PROTOFIBRILA. SPOJENÍM 4 PROTOFIBRIL SE STÁVÁ INTERMEDIÁRNÍ FILAMENTUM [10].	- 17 -
OBR. 5: KŘIVKA ZÁVISLOSTI TAHOVÉ SÍLY NA DEFORMACI [9].	- 19 -
OBR. 6: SCHEMATICKÉ ZNÁZORNĚNÍ ZMĚNY USPOŘÁDÁNÍ Z KONFORMACE A-HELIX NA B-SKLÁDANÝ LIST V PRŮBĚHU PROTAHOVÁNÍ. ŠIPKY UKAZUJÍ SMĚR PROTAHOVÁNÍ. STRAIN-STRESS KŘIVKA S VYZNAČENÍM HOOKEOVA REGIONU, OBLASTI KLUZU A MEZE PEVNOSTI [10].	- 20 -
OBR. 7: ZNÁZORNĚNÍ MORFOGENEZE VLASOVÉHO FOLIKULU A RŮSTOVÉHO CYKLU VLASU [20].	- 26 -
OBR. 8: SCHEMATICKÉ ZNÁZORNĚNÍ SUBLAMELÁRNÍ STRUKTURY KUTIKULY LIDSKÉHO VLASU [32]. ..	- 29 -
OBR. 9: VLAS - SCHEMATICKÝ VERTIKÁLNÍ ŘEZ (PODLE P. ARENBERGERA) [35][36].	- 30 -
OBR. 10: MALOÚHLÝ RENTGENOVÝ ROZPTYL ZNÁZORŇUJÍCÍ ROZDÍL ZÍSKANÝ Z NEUPRAVENÝCH VLASŮ A TRVALE ONDULOVANÝCH VLASŮ [57].	- 38 -
OBR. 11: UKÁZKA POŠKOZENÍ KUTIKULÁRNÍ VRSTVY FÉNOVÁNÍM HORKÝM VZDUCEM PŘI TEPLOTĚ 95°C. MĚŘENO TRANSMISNÍM ELEKTRONOVÝM MIKROSKOPEM [58].	- 40 -
OBR. 12: KŘIVKA ZÁVISLOSTI NAPĚTÍ NA DEFORMACI [62].	- 42 -
OBR. 13: POSTUPNÉ PROTAHOVÁNÍ VLASU PRO EXPERIMENTÁLNÍ ČÁSTEČNOU LINEARIZACI [60]. ...	- 43 -
OBR. 14: ODHADOVANÉ KŘIVKY NAPĚŤOVÉ REAKCE Σ (ϵ, T) SPOLU S ELASTICKOU $T(\epsilon)$ A VISKÓZNÍ $K(\epsilon, T)$ SLOŽKOU V PRŮBĚHU POSTUPNÉHO PROTAHOVÁNÍ [60].	- 43 -
OBR. 15: VLIV ZVLNĚNÍ V ÚVODNÍ ELASTICKÉ ČÁSTI \uparrow (ϵ); PROPOJENÍ UPRAVENÉHO HOOKEOVA REGIONU S PROTAŽENÍM OSY URČUJÍCÍ PRAVOU POČÁTEČNÍ DÉLKU VZORKU VLASU [60].	- 44 -
OBR. 16: FOTOGRAFIE DYNAMICKÉHO VISKOELASTOMETRU S UCHYCENÝM VZORKEM VLASU.	- 51 -
OBR. 17: DETAIL UCHYCENÍ VZORKU VLASU.	- 53 -

OBR. 18: VZOROVÁ STRAIN-STRESS KŘIVKA	- 54 -
OBR. 19: VYTYČENÍ LINEÁRNÍ ČÁSTI STRAIN-STRESS KŘIVKY A ODVOZENÍ MODULU PRUŽNOSTI E	- 54 -
OBR. 20: ZÁVISLOST MODULU PRUŽNOSTI NA PRŮŘEZU VLASU	- 64 -
OBR. 21: LINEARIZACE MOCNINNÉ FUNKCE. ZÁVISLOST LOGARITMU MODULU PRUŽNOSTI NA LOGARITMU PRŮŘEZU VLASU.....	- 64 -
OBR. 22: ZÁVISLOST MAXIMÁLNÍHO NAPĚTÍ NA PRŮŘEZU VLASU	- 66 -
OBR. 23: LINEARIZACE MOCNINNÉ FUNKCE. ZÁVISLOST LOGARITMU MAXIMÁLNÍHO NAPĚTÍ Σ_{MAX} [MPA] NA LOGARITMU PRŮŘEZU VLASU S [MM ²].....	- 66 -
OBR. 24: NEPOUŽITELNÝ GRAF, KTERÝ BYLO NUTNÉ Z VYHODNOCENÍ VYŘADIT. PŘ. 1.	- 68 -
OBR. 25: NEPOUŽITELNÝ GRAF, KTERÝ BYLO NUTNÉ Z VYHODNOCENÍ VYŘADIT. PŘ. 2.	- 68 -
OBR. 26: SLOUPCOVÝ GRAF ZOBRAZUJÍCÍ ZÁVISLOST SÍLY, POTŘEBNÉ K PŘETRŽENÍ VLASU NA PRŮMĚRU VLASU [27].	- 72 -

Seznam tabulek

TAB. 1: VZOROVÁ TABULKA NAMĚŘENÝCH HODNOT, ZE KTERÝCH JE NÁSLEDNĚ ZÍSKÁNA STRAIN-STRESS KŘIVKA, MODUL ELASTICITY E [MPA] A MAXIMÁLNÍ NAPĚTÍ [MPA].	- 55 -
TAB. 2: CHARAKTERISTIKY VZORKŮ 3 – 7.	- 56 -
TAB. 3: CHARAKTERISTIKY VZORKŮ 8 A 13 – 16.	- 56 -
TAB. 4: CHARAKTERISTIKY VZORKŮ 17, 22, 25 – 27.	- 57 -
TAB. 5: CHARAKTERISTIKY VZORKŮ 28 – 33.	- 57 -
TAB. 6: CHARAKTERISTIKY VZORKŮ 34 - 36, 38, 39.	- 58 -
TAB. 7: CHARAKTERISTIKY VZORKŮ 40 – 44.	- 58 -
TAB. 8: CHARAKTERISTIKY VZORKŮ 45 – 49.	- 59 -
TAB. 9: CHARAKTERISTIKY VZORKŮ 50 – 54.	- 59 -
TAB. 10: CHARAKTERISTIKY VZORKŮ 63, 73 - 75, 84.	- 60 -
TAB. 11: VÝSLEDNÝ ARITMETICKÝ PRŮMĚR A SMĚRODATNÁ ODCHYLKA POROVNÁVAJÍCÍ VZORKY VLASŮ NA ZÁKLADĚ VĚKOVÉ ODLIŠNOSTI.	- 62 -
TAB. 12: VÝSLEDNÝ ARITMETICKÝ PRŮMĚR A SMĚRODATNÁ ODCHYLKA POROVNÁVAJÍCÍ VZORKY VLASŮ NA ZÁKLADĚ POUŽÍVÁNÍ A NEPOUŽÍVÁNÍ KONDICIONAČNÍCH PŘÍPRAVKŮ.	- 62 -
TAB. 13: VÝSLEDNÝ ARITMETICKÝ PRŮMĚR A SMĚRODATNÁ ODCHYLKA POROVNÁVAJÍCÍ VZORKY BARVENÝCH A NEBARVENÝCH VLASŮ.	- 62 -
TAB. 14: VÝSLEDNÝ ARITMETICKÝ PRŮMĚR A SMĚRODATNÁ ODCHYLKA POROVNÁVAJÍCÍ METODY SUŠENÍ VLASŮ.	- 62 -
TAB. 15: VÝSLEDNÝ ARITMETICKÝ PRŮMĚR A SMĚRODATNÁ ODCHYLKA POROVNÁVAJÍCÍ ČETNOST MYTÍ VLASŮ.	- 63 -
TAB. 16: VÝSLEDNÝ ARITMETICKÝ PRŮMĚR A SMĚRODATNÁ ODCHYLKA VELIKOSTI MAXIMÁLNÍHO NAPĚTÍ [MPA] V ZÁVISLOSTI NA VĚKOVÉ SKUPINĚ.	- 63 -
TAB. 17: HODNOTY PRO VÝPOČET ZÁVISLOSTI MODULU PRUŽNOSTI E NA PLOŠE PRŮŘEZU.	- 65 -
TAB. 18: HODNOTY PRO VÝPOČET ZÁVISLOSTI MAXIMÁLNÍHO NAPĚTÍ Σ_{MAX} [MPA] NA PLOŠE PRŮŘEZU S [MM ²].	- 67 -
TAB. 19: MECHANICKÉ VLASTNOSTI V TAHU LIDSKÝCH VLASŮ [66][67].	- 70 -