

DEFINICE STRUKTURY TROJROZMĚRNÝCH TKANIN PRO BALISTICKOU OCHRANU

Bc. Anna Bartlová

Sekce - TEXTIL,

Fakulta textilní, 2. ročník

Navazující magisterský studijní program – TEXTILNÍ INŽENÝRSTVÍ

Abstrakt: Tato práce se zaměřuje na analýzu vnitřní struktury 3D tkaných textilií z para-aramidu a hodnocení mechanismů ovlivňujících jejich balistický potenciál. V rámci experimentu byla navržena a vyrobena sada 3D tkanin z kategorie neprotkávaných vrstev s vaznou a výplňovou soustavou a referenční 2D tkanina. U vzorků bylo provedeno měření tloušťky, plošné hmotnosti a statických tahových vlastností. K odhalení reálné vnitřní struktury a trajektorie nití byla aplikována rentgenová počítačová tomografie (CT). Výsledky potvrzují, že lineární vedení výplňových soustav zvyšuje koeficient využití pevnosti multifilu na 39,2 % oproti 32 % u 2D struktur, což umožňuje efektivnější absorpci energie bez předčasného selhání v ohybech nití. Práce v závěru definuje geometrické základy pro budoucí numerické simulace metodou konečných prvků.

Klíčová slova: 3D tkanina, para-aramid, balistická ochrana, struktura tkaniny, mechanické vlastnosti, CT analýza, metoda konečných prvků.

1 Úvod

Současné bezpečnostní hrozby kladou vysoké nároky na moderní systémy osobní ochrany, mezi nimiž hrají klíčovou roli balistické vesty a přídatné ochranné prvky. S rozvojem textilního inženýrství a materiálových věd se do popředí dostávají 3D tkaniny. Ty díky své prostorové struktuře nabízejí výrazně vyšší schopnost absorpce energie nárazu při zachování flexibility, která je kritická pro komfort nositele a ergonomii měkkých balistických ochranných prostředků. Tato práce tematicky navazuje na předchozí bakalářský výzkum autorky [1] a rozvíjí poznatky o analýze struktury 3D tkanin z pohledu prostorové geometrie a vnitřního uspořádání soustav nití ve výsledné textili.

Pozornost je věnována rozdílu mezi provázáním osnovních a útkových soustav u jednotlivých typů 3D struktur a jejich vlivu na mechanické vlastnosti [2], [3]. Cílem práce je poskytnout hlubší porozumění vztahu mezi strukturou 3D tkanin a jejich ochrannými vlastnostmi, a tím přispět k vývoji efektivnějších a lehčích prostředků balistické ochrany. Ty najdou uplatnění jak v lehké balistice při konstrukci vest, tak v aplikacích těžké balistiky.

2 Fyzikální podstata balistického zásahu a význam struktury

Při dopadu projektilu na prostředek balistické ochrany dochází k extrémně rychlému přenosu kinetické energie ze střely do materiálu ochranné vložky. Úspěšná eliminace této hrozby závisí na schopnosti textilie absorbovat kinetickou energii a co nejrychleji ji rozptýlit do co největší plochy, čímž se minimalizuje riziko penetrace a zároveň lokální dynamické deformace.

2.1 Kinetická energie a dynamika dopadu

Interakce projektilu s textilní strukturou je dynamický děj probíhající v řádu mikrosekund. Schopnost materiálu zachytit střelu je určena mechanickými vlastnostmi použitých vysokopevnostních vláken a způsobem, jakým jsou tato vlákna prostorově uspořádána. V okamžiku kontaktu hrotu střely s materiálem dochází k okamžitému lokálnímu přetížení primárních nití. Aby nedošlo k jejich předčasnému selhání, musí se energie začít šířit do nití sekundárních. U klasických 2D tkanin je tento přenos omezen plošným charakterem vazby [3], zatímco prostorová geometrie 3D struktur nabízí teoretický předpoklad pro zcela nové mechanismy distribuce napětí [2].

2.2 Mechanismus šíření rázových vln

Při balistickém nárazu se materiálem šíří dva typy rázových vln:

1. Podélná rázová vlna: Šíří se v ose jednotlivých nití rychlostí zvuku v daném materiálu (u para-aramidů přibližně 2000–2500 m/s). Tato vlna zapojuje do tahu podélné úseky vláken a aktivuje jejich pevnostní potenciál [4].
2. Příčná rázová vlna: Šíří se kolmo na směr nití a projevuje se vznikem deformačního kužele na zadní straně balistického panelu [4]. Tento dynamický průhyb (*Back Face Signature* – BFS) je podle normy NIJ 0101.06 [5] kritický z hlediska vzniku tzv. *blunt trauma* (tupého traumatu) – poranění vnitřních orgánů uživatele bez penetrace ochranné vrstvy. Maximální povolený limit BFS na plastelinovém bloku je stanoven na 44 mm [5].

Analytické modely balistického impaktu dokazují, že klíčovým faktorem pro minimalizaci BFS a zachycení střely je rychlost, s jakou textilní vrstvy dokáží kinetickou energii transformovat do deformační práce. Explicitně definují, že celková absorbovaná energie textilním systémem je sumou energie spotřebované na deformační protažení primárních nití, kinetické energie odlesku materiálu a energie zmařené třením v nitných kříženích [4].

2.3 Význam vnitřní struktury a geometrie 3D tkanin (Teoretické předpoklady)

Vnitřní struktura tkaniny zásadně modifikuje deformační chování a transformuje energii nárazu. Z hlediska textilní geometrie existují klíčové strukturální faktory, které teoreticky definují balistický potenciál 3D vícenásobných tkanin:

- Eliminace vazebních ohybů (Lineární vedení): Na rozdíl od 2D tkanin, kde vysoký počet křížení způsobuje vyosení multifilamentu a pokles využitelné pevnosti [3], 3D vícenásobné tkaniny využívají konstrukční rozdělení funkcí. Výplňkové soustavy mohou být vedeny přímo, bez výrazného zakřivení, což zachovává maximální pevnostní potenciál nití přímo v ose balistického zatížení, neboť multifilamenty dosahují nejvyšší pevnosti právě tehdy, když si uchovávají lineární tvar.
- Deformace průřezu a nárůst tření: Při provázání prostorových struktur dochází v důsledku vnitřních tlaků k deformačnímu zploštění průřezů nití, což zvyšuje kontaktní plochy mezi nitěmi v místech jejich křížení [3]. Výsledný zvýšený třecí odpor brání rozestupování nití při kontaktu s hrotem projektilu.
- Diferenciace tažnosti a setkání nití: Vazná soustava vykazuje vysoké setkání nití (geometrickou naddodávku), což jí dává strukturální tažnost potřebnou k pohlcování energie deformací. Naproti tomu přímé výplňkové nitě fungují jako okamžitá mechanická brzda, což teoreticky umožňuje zastavit projektil na kratší dráze a omezit velikost BFS [4].

3 Konstrukční parametry a příprava experimentální sady

Pro splnění cílů práce byla navržena a na jehlovém tkacím stroji CCI s listovým prošlupným mechanismem v laboratořích KTT FT TUL vyrobena experimentální sada tkanin. Jako vstupní materiál byl zvolen para-aramidový multifil Twaron Next® o jemnosti $T = 1610$ dtex. Tento specifický materiál představuje novou, ekologicky šetrnou generaci vysoce výkonných aramidových vláken od společnosti Teijin, která se vyrábí s využitím recyklovaných aramidových produktů a technologického odpadu. Tento recyklovaný multifil si však plně uchovává extrémní pevnost v tahu, vysoký modul pružnosti a schopnost efektivní absorpce rázové energie, čímž ideálně odpovídá náročným požadavkům na materiály pro balistické aplikace a zároveň reflektuje moderní požadavky na udržitelnost.

Příprava osnovy probíhala na vzorovacím snovadle CCI na principu přímého snování na buben. Vzhledem k odlišnému setkání vazných a výplňkových soustav u pokročilých 3D struktur byly jednotlivé vrstvy následně navinuty na samostatné osnovní vály (přívod ze tří samostatných váľů). Byla zvolena stabilní čtvercová konstrukce tkaniny s dostavou osnovy

Do = 8 nití/cm a dostavou útku Du = 8 nití/cm. Čtvercová struktura zajišťuje symetrický přenos energie střely do obou směrů hlavních soustav, což je z balistického hlediska optimální.

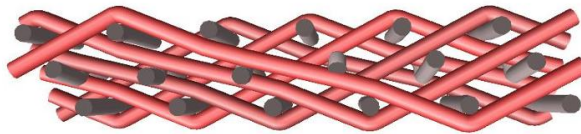
Sadu tvořily tři základní strukturální varianty:

- **2D struktura (Referenční vzorek):** Jednovrstvá tkanina v plátňové vazbě reprezentující standardní materiál užívaný v současných balistických vložkách. Vykazuje maximální počet vazných bodů.
- **3D struktura A (Neprotkávané vrstvy se šikmou vaznou soustavou a výplňkovými nitěmi):** Vícenásobná prostorová struktura, kde jsou v osnově vkládány přímé výplňkové soustavy a vazná soustava vedená pod úhlem která provazuje skrz celou tloušťku tkaniny a zajišťuje její soudržnost.



Obr. 1 Podélný řez – vícenásobná tkanina s provázáním vazné osnovy pod úhlem

- **3D struktura B (Neprotkávané vrstvy pod úhlem – všechny soustavy vazné):** Vícenásobná prostorová struktura, kde jsou všechny zapojené osnovní soustavy vzájemně provázané skrz celou tloušťku tkaniny a zajišťuje její soudržnost.



Obr. 2 Podélný řez – vícenásobná tkanina s provázáním pod definovaným úhlem se všemi osnovami vaznými

Všechny vzorky byly utkány technikou plno-zvedání s využitím jednoho podavače útku, což zaručuje materiálovou homogenitu celé balistické struktury.

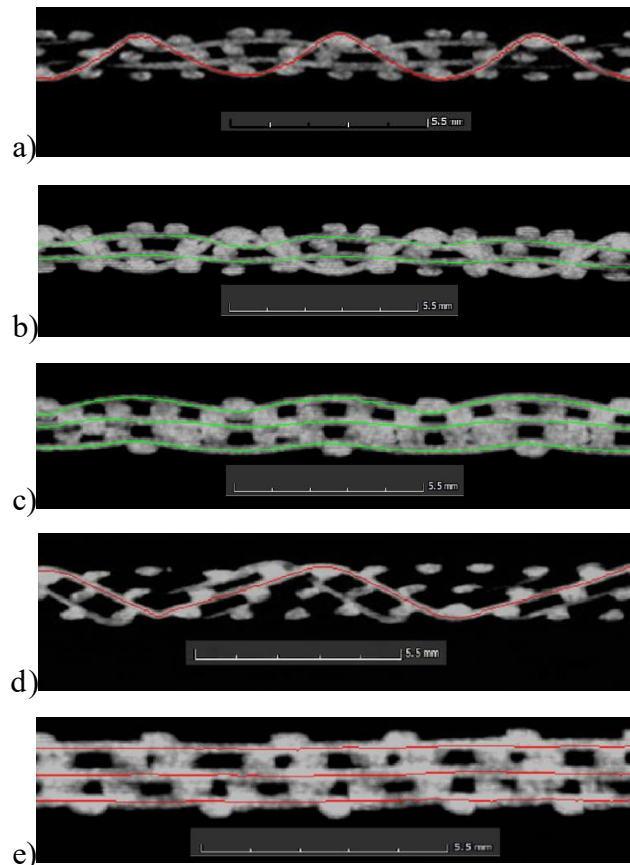
4 Nedestruktivní CT strukturní analýza

Klasické destruktivní metody, jako je mechanické řezání a následná optická mikroskopie, vedou k nežádoucímu ovlivnění vzorku a deformaci nití v místě řezu. Jako optimální nástroj pro stanovení reálné vnitřní geometrie byla proto využita nedestruktivní rentgenová počítačová tomografie (CT). Tato metoda je založena na měření zeslabení intenzity rentgenového záření při průchodu materiálem, což kvantitativně popisuje Beer-Lambertův zákon vyjadřující závislost zeslabení na hustotě a tloušťce vzorku:

$$I = I_0 * e^{(-\mu x)}$$

Kde I je výsledná intenzita, I_0 původní intenzita záření, μ lineární součinitel zeslabení a x tloušťka absorbující vrstvy. Během procesu skenování rotoval vzorek para-aramidové tkaniny mezi zdrojem záření a detektorem. Proud byl stanoven na 325 A s velikostí ohniska (spotu) 46 m pro zajištění maximální ostroty hran. Rekonstrukce snímků do 3D obrazu zahrnovala prahování na základě analýzy histogramu k oddělení polymerních vláken od okolního vzduchu. Tímto způsobem vzniklo digitální dvojče reálného vzorku tvořené voxely a následně exportované do formátu STL.

Analýza virtuálních řezů v rovinách XY, XZ a YZ umožnila detailně sledovat vertikální trajektorii nití skrze tloušťku tkaniny a provést přesné trasování os nití (viz Obr. 3). Hlavním přínosem bylo určení reálné délky nitě ve vazné vlně, která se vlivem stlačení a materiálových deformací během tkaní liší od zjednodušených lineárních matematických modelů. Na získaných digitálních řezech byly exaktně měřeny hodnoty parametrů deformace průřezu nitě v místě křížení (Tabulka 1).



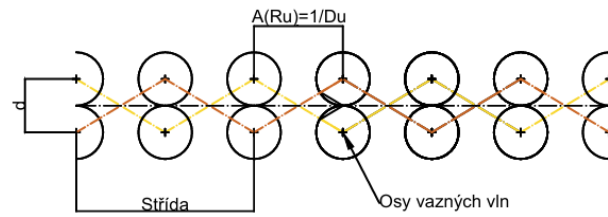
Obr. 3 Demonstrace metody trasování trajektorie nitě v řezech CT modelu pro určení její reálné délky: a) 3D struktura A podélný pohled vazná soustava, b) 3D struktura A podélný pohled výplňková soustava, c) 3D struktura A příčný pohled, d) 3D struktura B podél Tabulka 1 Statistické vyhodnocení deformace průřezu nití z CT analýzy

Sledovaný parametr	Průměrná hodnota	Směrodatná odchylka
Průměrné zploštění [μm]	351,22	75,99
Max. zploštění / Max. průmět v 90° [μm]	361,97	79,02
Min. zploštění / Min. průmět [μm]	340,48	74,35
Max. rozšíření / Max. průmět [μm]	868,81	167,42
Plocha průřezu [μm^2]	232 745,05	86 076,77
Ekvivalentní průměr [μm]	534,58	103,38
Kruhovitost [-]	0,69	0,07

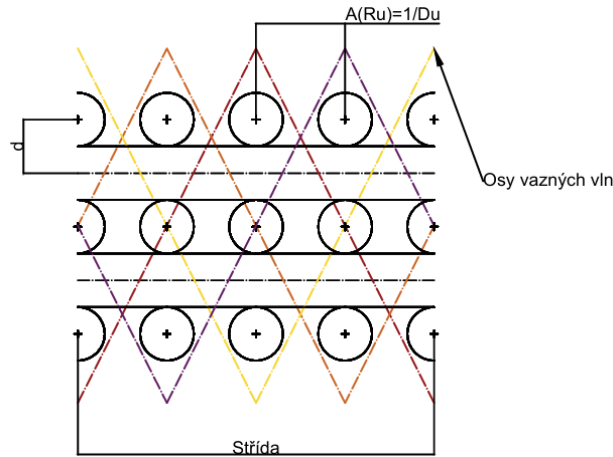
Data jasně potvrzují, že se nitě vlivem mechanického tlaku při tkaní mění z původně uvažovaného kruhového tvaru na eliptický. Průměrná kruhovitost 0,69 a značný rozdíl mezi naměřeným rozšířením (868,81 μm) a zploštěním (351,22 μm) dokládají vysokou míru této deformace. Znalost skutečné délky a tvaru průřezu je kritická pro správné nastavení deformační kapacity v numerických simulacích, neboť definuje okamžik, kdy se vazebná vlna vyčerpá a nit začne plně přenášet tahové síly.

5 Analytická predikce délky nitě vs. reálná CT data

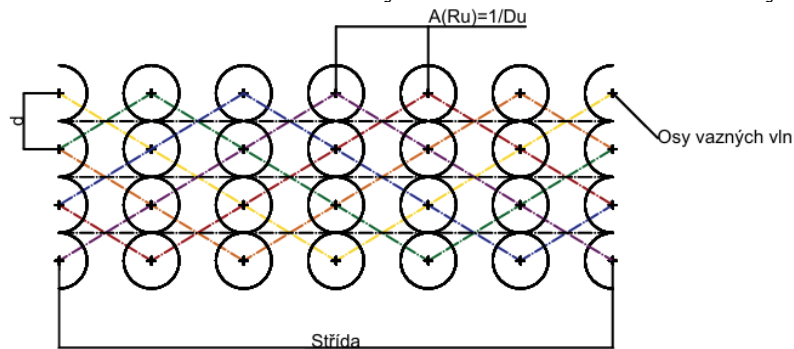
Před samotným měřením byl sestaven geometrický lineární model (viz Obr. 4-6), který představuje základní popis vazebné buňky bez ohledu na skutečný tvar vazné vlny v příčném řezu. Tento model nahrazuje provázání nití v zakřivení úsečkou definovanou jako přepona pravoúhlého trojúhelníku.



Obr. 4 Lineární model 2D struktury rozkreslení os všech vazných vln



Obr. 5 Lineární model 3D struktury A rozkreslení os všech vazných vln



Obr. 6 Lineární model 3D struktury A rozkreslení os všech vazných vln

Výpočet délky vazné vlny navržených struktur C^0 je pak získán jako:

$$C^0 = \sqrt{(n \cdot A)^2 + (n \cdot d)^2}$$

Délka vazné vlny ve střídě L_t je následně určena součtem délek vazných vln v jednotlivých typech vazných buněk na základě vazby konkrétního experimentálního vzorku:

$$L_t = C_1^0 + \dots + C_n^0$$

Teoretická délka nitě L_t byla predikována na základě rozteče nití odvozené z dostavy a efektivního průměru kruhového průřezu [2].

Srovnání výsledků teoretického lineárního modelu a reálných hodnot získaných z prostorového trasování CT tomografie uvádí Tabulka 2 a 3.

Tabulka 2 Srovnání experimentálních a teoretických délek vazné vlny nití v podélném směru pro vybrané 2D a 3D struktury (přepočteno na 100 cm).

Podélný směr						
	2D struktura		3D struktura A		3D struktura B	
	Vazná soustava	Výplňková soustava	Vazná soustava	Výplňková soustava	Vazná soustava	Výplňková soustava

Experimentální délka vazné vlny [cm]	103,28	0	112,24	101,78	108,98	0
Teoretická délka vazné vlny [cm]	104,46	0	135,85	100	104,46	0

Tabulka 3 Srovnání experimentálních a teoretických délek vazné vlny nití v příčném směru pro vybrané 2D a 3D struktury (přepočteno na 100 cm).

Příčný směr						
	2D struktura		3D struktura A		3D struktura B	
	Vazná soustava	Výplňková soustava	Vazná soustava	Výplňková soustava	Vazná soustava	Výplňková soustava
Experimentální délka vazné vlny [cm]	102,43	0	0	101,66	0	100,45
Teoretická délka vazné vlny [cm]	104,46	0	0	100	0	100

Z výsledků vyplývá, že zjednodušené geometrické výpočty bez uvážení zploštění a stlačení nití vedou k mírně nadhodnoceným výsledkům (odchylka až 5,96 % u komplexní struktury B). V reálné textilií dochází ke zvlnění multifilu, což zkracuje trajektorii osy nitě. Z hlediska balistické odolnosti a analytického popisu impaktu [4] jsou tyto prostorové parametry klíčové, neboť vyšší reálná délka nitě u vazných soustav 3D struktur indikuje vyšší geometrickou naddodávku, a tím i odlišnou časovou konstantu pro rozvinutí deformačního kužele [4].

6 Hodnocení užitných a mechanických vlastností

Hodnocení mechanických vlastností vyrobených vzorků bylo rozděleno do dvou fází: stanovení základních užitných parametrů a statické tahové zkoušky na trhacím stroji pro zjištění mechanických vlastností.

Je zřejmé, že statický test na trhacím stroji přímo neodpovídá dynamickému namáhání při balistickém ději. V laboratorní praxi se k simulaci rázového zatížení často užívá zkouška průtlaku kuličkou. Nicméně ani ta reálný balistický impakt nereflektuje kvůli extrémnímu rozdílu v rychlosti děje. Zatímco laboratorní průtlaky probíhají v řádu metrů za sekundu, při balistickém zásahu se rázová vlna šíří mnohonásobně rychleji, což zásadně mění viskoelastické chování para-aramidových řetězců.

I přes tato kinetická omezení je statická zkouška plně dostačující pro určení základního materiálového potenciálu tkaniny. Poskytuje exaktní data o pevnosti, tažnosti a počátečním modulu tuhosti. Tyto hodnoty jsou klíčové pro komparativní analýzu struktur (2D vs. 3D) a slouží jako primární kalibrační vstup pro materiálové modely v numerických simulacích (viz Kapitola 7).

6.1 Stanovení tloušťky a plošné hmotnosti

Měření tloušťky probíhalo dle normy ČSN EN ISO 5084 [6] na deseti náhodných místech každého vzorku. Plošná hmotnost byla určena vážením vzorků o rozměru 10 cm² na laboratorních vahách v pěti opakováních dle normy ČSN EN 12127 [7]. Výsledné hodnoty jsou shrnuty v Tabulce 4.

Tabulka 4 Naměřené hodnoty tloušťky a plošné hmotnosti vzorků

Vzorek	Průměrná tloušťka [mm]	Směrodatná odchylka [mm]	Plošná hmotnost [g/m ²]	Směrodatná odchylka [g/m ²]
2D struktura (jedna vrstva)	0,447	0,013	280,140	4,428
2D struktura (tři vrstvy nad sebou)	1,380	0,019	841,020	7,286
3D struktura A (vazná + výplňková)	1,514	0,040	822,620	8,346
3D struktura B (všechny vazné)	2,011	0,067	854,680	10,732

Při vyhodnocení je nutné uvážit, že testované 3D tkaniny jsou konstrukčním a materiálovým ekvivalentem tří vrstev standardního 2D plátna. Z hlediska plošné hmotnosti jsou 3D struktury plně konkurenceschopné – varianta A je dokonce o 2,19 % lehčí než třívrstvý 2D ekvivalent. Zásadní rozdíl však nastává v parametru tloušťky. V porovnání s vrstveným 2D systémem vykazuje 3D struktura A nárůst tloušťky o 9,71 % a 3D struktura B dokonce o 45,72 %. Tento nárůst tloušťky při zachování stabilní hmotnosti je pro balistickou ochranu žádaný, neboť zvětšuje brzdnou dráhu projektilu a tlumí trauma efekt (BFS), musí se však brát v potaz, aby celková tloušťka balistického panelu nepřekročila normu. U 3D tkanin se však předpokládá, že balistická odolnost bude stejná ne-li lepší i při sníženém počtu vrstev v balistickém panelu.

6.2 Tahové vlastnosti a koeficient využití pevnosti

Tahové zkoušky byly realizovány na trhacím stroji podle metodiky ČSN EN ISO 13934-1 [8]. Pro posouzení efektivity konstrukce byl stanoven koeficient využití pevnosti nitě ve tkanině (η), který definuje vztah mezi reálnou pevností tkaniny zjištěnou trhací zkouškou a součtovou teoretickou pevností všech nosných nití v daném průřezu podle Kovářova vztahu [3]:

$$\eta = \frac{P_{tk,ex}}{P_{n,ex} * D}$$

Při srovnání struktur vykazujících ekvivalentní teoretickou součtovou pevnost (39,18 kN) byly identifikovány výrazné rozdíly ve využití pevnosti multifilu u experimentálních hodnot (Tabulka 5).

Tabulka 5 Výsledky statických tahových zkoušek a využití pevnosti materiálu

Vzorek	Teoretická pevnost (součtová) [kN/5cm]	Experimentální pevnost [kN/5cm]		koeficient využití pevnosti multifilu ve tkanině [%]	
	osnova = útek	osnova	útek	osnova	útek
2D struktura	13,06	7,59	7,61	58,1	58,3
2D struktura (tři vrstvy)	39,18	12,71	12,93	32,4	33,0
3D struktura A	39,18	15,35	13,59	39,2	34,7
3D struktura B	39,18	14,26	14,19	36,4	36,2

U vrstveného 2D systému koeficient využití pevnosti vykazuje nejnížší úroveň (kolem 31,5–32 %). Maximální hustota vazných bodů vyvolává výrazné vyosení filamentů a lokální přetížení vláken v ohybech. Výpočty pro vyšší počet vrstev navíc ukazují, že u pouhého

vrstvení 2D tkanin efektivita s rostoucím počtem vrstev drasticky klesá (u 6 vrstev až na 24 %).

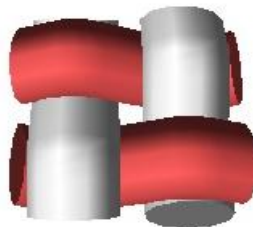
Naproti tomu 3D struktura A dosáhla nejvyššího koeficientu využití 39,2 %. Lineární vedení výplňových nití bez zvlnění odstraňuje ohyby, což multifilu dovoluje pracovat v ose vláken velmi blízko jeho plné kapacitě. Přímá výplňková osnova navíc funguje jako mechanická brzda – přebírá zatížení okamžitě, zamezuje narovnání vazné vlny a udržuje tahovou křivku strmou (vysoká tuhost od počátku namáhání), což je kritické pro zachycení balistického rázového impulsu.

7 Návrh geometrie pro numerické modelování (MKP)

Cílem této výzkumné fáze bylo využití získaných exaktních parametrů pro sestavení pokročilého digitálního modelu struktury v prostředí Ansys, který poslouží jako základ pro budoucí predikce bez nutnosti nákladné fyzické výroby [9]. Na rozdíl od běžných analytických modelů, které pracují s nití pouze jako s jednorozměrnou přímkou (prutem s nulovým objemem), byl v této práci navržen model definující nit jako plnohodnotné trojrozměrné objemové těleso.

Klíčovým aspektem pro věrohodnost simulace je způsob definice geometrie prvků, který v této práci nebyl založen na teoretických předpokladech, ale na datech z reálné struktury získaných v několika navazujících krocích. Celý proces začal analýzou reálného vzorku, kdy byly nejprve utkány fyzické vzorky a následně nasnímány pomocí počítačové tomografie.

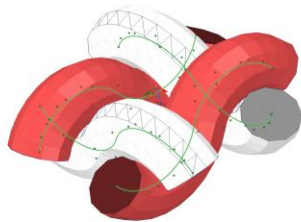
Pomocí obrazové analýzy byla z těchto snímků získána exaktní data o vnitřní struktuře, konkrétně o parametrech deformace průřezů nití, skutečné velikosti střídy a reálných rozstupech nití vzniklých během procesu tkaní. Tato naměřená data byla následně implementována do softwarového prostředí EAT CAD určeného pro tvorbu vazebného schématu. Výsledkem byl model respektující reálnou dráhu nitě i její skutečný tvar v místech křížení, který byl v nadstavbě CAD 3DWEAVER vygenerován jako objemové těleso (viz Obr. 7) a exportován ve formátu vhodném pro metodu konečných prvků.



Obr. 7 Geometrie v CAD 3DWEAVER

Do preprocessoru MKP (Ansys) pak byly z tohoto reálného základu integrovány následující specifické charakteristiky:

- **Geometrické deformace průřezů:** Implementace eliptických průřezů se zohledněním zploštění a rozšíření nití v místech křížení, což přesně definuje reálné kontaktní plochy.
- **Nelineární elasto-plastické materiálové chování:** Elastická část definuje modul pružnosti a počáteční tuhost para-aramidu, plastická část simuluje fázi poškození po dosažení meze pevnosti [9].
- **Kontaktní mechanika a tření:** Mezi elementy byl definován kontakt s koeficientem tření $f = 0,2$. To umožňuje exaktně sledovat přenos a maření energie třením, které v analytických modelech impaktu hraje kritickou stabilizační úlohu proti rozestupování nití [9].



Obr. 8 Prutový model / FE model

Pro reprezentaci tkaniny o rozměrech 50 x 200 mm zahrnoval FE model 2D struktury celkem 42 240 elementů a 84 680 uzlů [9]. Tento geometrický základ byl ověřován simulací statického jednoosého namáhání s cílem přiblížit se reálným tahovým křivkám z trhacího stroje. Takto nastavený modul by mohl sloužit jako výchozí bod pro budoucí simulace dynamického balistického testu a predikci limitní rychlosti V50 po doplnění chybějících experimentálních dat z balistických zkoušek.

8. Balistika a princip testování V50

Základním kritériem pro hodnocení balistické odolnosti materiálů podle mezinárodních norem je stanovení mezní rychlosti V50. Jedná se o statistickou rychlost, při které má projektil přesně 50% pravděpodobnost úplného průniku a 50% pravděpodobnost zachycení materiálem.

Pro praktické ověření teoretických předpokladů o vyšším balistickém limitu 3D struktur byl realizován řízený experiment, v jehož rámci byla navržena sada prototypů balistických panelů o celkovém počtu 18 vrstev v souladu s normou NIJ STD 0101.06 [5]. Experimentální sada zahrnovala pět specifických variant složení balistických panelů: referenční sestavu (18× 2D) a panely využívající vyrobené 3D struktury v čistých (6× 3D struktura A; 6× 3D struktura B) i hybridních konfiguracích. Samotné testování probíhalo v expertním pracovišti společnosti TEIJIN ve Wuppertalu.

Výsledek experimentu však nepřinesl očekávanou validaci navržených 3D struktur. Ze strany externí testovací laboratoře partnerské firmy byly zpět zaslány pouze fyzické vzorky prototypů složených z 2D struktur, přičemž k navrženým 3D strukturám nebyly poskytnuty domluvené datové výsledky z reálných střeleckých zkoušek ani zasláné prototypy.

Z tohoto důvodu nemohla být balistická odolnost 3D struktur experimentálně potvrzena. Vzhledem k této absenci experimentálních balistických dat získává kritický význam navržený trojrozměrný objemový model pro metodu konečných prvků (MKP) popsany v Kapitole 7. Tento model (digitální dvojče) představuje klíčový predikční aparát. Po budoucím vložení chybějících střeleckých dat je schopen simulovat dynamický balistický test a spolehlivě predikovat limitní rychlost V50 i rozsah traumatického průhybu (BFS) čistě na základě zjištěné vnitřní geometrie textilie.

8 Závěr

Předložená práce popsala komplexní vztahy mezi vnitřní prostorovou geometrií trojrozměrných tkanin z neprotkávaných vrstev a jejich mechanickým chováním. Na základě syntézy teoretických předpokladů, nedestruktivní strukturní analýzy a výsledků statických mechanických zkoušek bylo možné formulovat ucelený pohled na balistický potenciál zkoumaných 3D struktur, a to i přes absenci exaktních experimentálních dat z dynamického testování mezní rychlosti V50 ze strany externího dodavatele.

Pomocí rentgenové počítačové tomografie (CT) byly odhaleny reálné vnitřní trajektorie a eliptické deformace průřezů para-aramidových nití, které se zásadně liší od idealizovaných geometrických modelů. CT analýza reálné struktury potvrdila teoretickou hypotézu o deformačním zploštění nití, kdy naměřená průměrná hodnota zploštění v místech křížení činila 351,22 μm . Tento jev zvětšuje kontaktní plochy a zvyšuje třecí odpor v místech křížení, což brání nežádoucímu rozestupování nití při kontaktu s hrotem projektilu.

Statické tahové zkoušky jednoznačně validovaly teoretický předpoklad o negativním vlivu vysokého počtu zakřížení u tradičních 2D vrstvených struktur, kde koeficient využití pevnosti při hromadném namáhání drasticky klesá (u šesti vrstev až na úroveň 24 %). Naproti tomu experimentálně ověřená vnitřní struktura 3D tkanin tento negativní vliv tradičního provázání účinně odstraňuje. Zkoumané 3D struktury vykázaly díky lineárnímu, nezvlněnému vedení výplňkových nití významně vyšší koeficienty využití pevnosti (v rozmezí 34,7 % až 39,2 %), což představuje nárůst o přibližně 7 % oproti standardnímu vrstvenému 2D materiálu. Výplňkové soustavy navíc fungují jako efektivní strukturní brzda, která zvyšuje počáteční tuhost tkaniny, zamezuje narovnání vazné vlny a zrychluje aktivaci pevnostního potenciálu materiálu.

Výsledná kombinace výrazně vyšší tloušťky, efektivnějšího přenosu napětí přímo v ose vláken a vysoké počáteční tuhosti indikuje mimořádný balistický potenciál navržených 3D struktur. Tyto vlastnosti jsou klíčové zejména pro eliminaci dynamického průhybu a sekundárních traumatických zranění uživatele (tzv. blunt trauma neboli Back Face Signature – BFS).

Vzhledem k chybějícím datům z balistické střelnice získávají vytvořené MKP modely zásadní význam. Představují exaktní, na základě tahových zkoušek zkalibrované „digitální dvojče“ reálné textilie, které tvoří spolehlivý základ pro pokročilé numerické simulace metodou konečných prvků a budoucí teoretickou predikci chování struktur při dynamickém rázovém zatížení.

Odkaz na použitou literaturu

- [1] BARTLOVÁ, Anna. *Návrh konstrukčního řešení trojrozměrných tkaných struktur pro balistickou ochranu*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, Bakalářská práce, 2024.
- [2] KOLČAVOVÁ SIRKOVÁ, Brigita. *Struktura a vlastnosti listových a žakárských tkanin*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2025.
- [3] KOVÁŘ, Radko. *Struktura a vlastnosti plošných textilií*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2003.
- [4] LI, Y., Y. WANG, X. ZHANG a X. ZHANG, 2013. *Analytical model for ballistic impact on textile body armour*. Composites Part B: Engineering. 45(1), 1508–1514. ISSN 1359-8368. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2012.08.005>
- [5] NIJ Standard 0101.06, 2008. *Ballistic Resistance of Body Armor*. Washington, DC: National Institute of Justice, U.S. Department of Justice.
- [6] ČSN EN ISO 5084, 1997. *Textilie - Zjišťování tloušťky textilií a textilních výrobků*. Praha: Český normalizační institut.
- [7] ČSN EN 12127, 1999. *Textilie - Tkaniny - Zjišťování plošné hmotnosti pomocí malých vzorků*. Praha: Český normalizační institut.
- [8] ČSN EN ISO 13934-1, 2013. *Textilie - Tahové vlastnosti textilií - Část 1: Zjišťování maximální síly a tažnosti při maximální síle pomocí metody proužku*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví.
- [9] ŘÍDKÝ, Radek. *Simulace tahové zkoušky tkaniny*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, Výzkumná zpráva, 2026.