

Ing. Stefan Krebs

Školitel : doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D., IWE

Ústav strojírenské technologie, Fakulta strojní, České vysoké učení technické v Praze

Anotace

Disertační práce se zabývá vstřikováním termoplastů vyztužených krátkými skleněnými vlákny. Zaměřuje se na analýzu a vyhodnocení orientace a homogenizace vláken ve výstřiku. Ačkoli výraz „krátká skleněná vlákna“ budí dojem, že orientace a homogenita vláken ve složce nehrají zvláštní roli, předložená disertační práce ukazuje, že tyto faktory jsou pro mechanické vlastnosti výrobků vyrobených vstřikováním velmi důležité.

Disertační práce se zabývá příčinami praskání zkušebních těles při axiálním zatížení na příkladu polyamidu PA66+PA6, který je vyztužen krátkými skleněnými vlákny (s 30 hmot. %), tzv. PA-GF. K praskání dochází opakovaně na atypickém místě. Toto pozorování nebylo dosud zdokumentované a prozkoumané. Je to dobrý příklad důležitosti orientace vláken a homogenity ve výstřiku. Pro tento účel byly v práci definovány koeficienty pevnosti a použity vhodné zkušební metody: zkouška tahem, plastografie, analýza spalování plastu (tzv. "ash test") a konfokální laserová mikroskopie.

Disertační práce se dále zabývá stávajícími analytickými modely pro tok taveniny v dutině a pokouší se je prokázat analýzou orientace vláken. Analytické modely, zkušební metody a numerické simulace shromážděné v práci mohou být přínosným prvkem pro průmyslovou praxi a přispět k optimalizaci mechanických vlastností a řešení chyb v návrhu vstřikovaných součástí.

Klíčová slova: vstřikování termoplastů, vyztužené termoplasty, plasty vyztužené vlákny, PA6, orientace vláken, homogenita vláken, tokové chování, zkouška tahem

Publikace z vlastního výzkumu:

[K1] Krebs, S.; Kolařík, L. a Skočilas, J. Short glass fibre reinforced thermoplastics – a look deep inside. In: Kudláček, Jan. *Technological forum 2021: 12th International Technical Conference*. I. Jaroměř: CTU in Prague, Faculty of Mechanical Engineering, 2021, s. 138-142. ISBN ISBN 978 -80 -87583 -33 - 3.

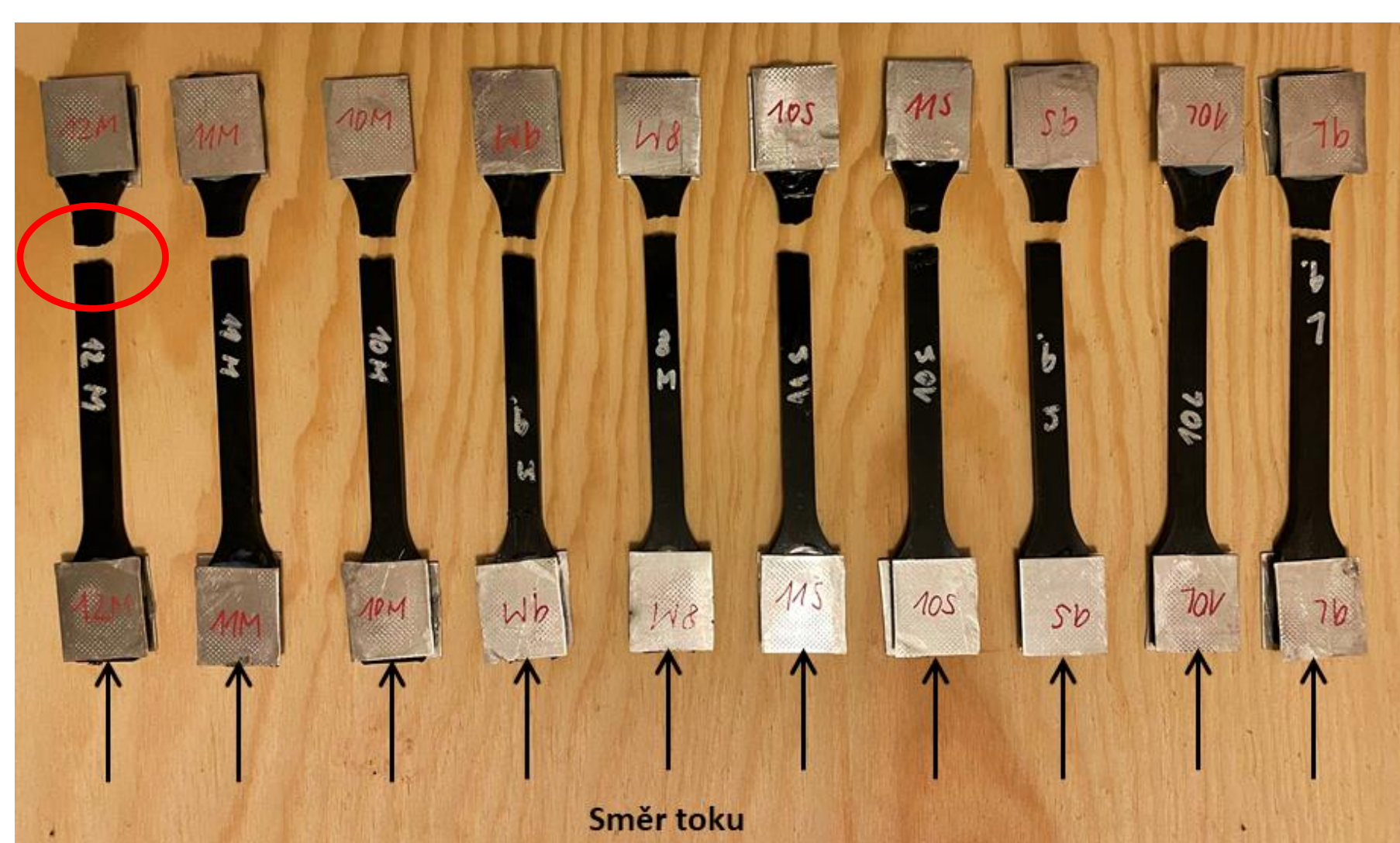
[K2] Krebs, S.; Kolařík, L. a Skočilas, J. Short glass fibre reinforced thermoplastics – Orientation of fibres along the flow. *Manufacturing technology: Engineering Science and Research Journal*. J. E. Purkyně University in Ústí nad Labem, Czech Republic, 2022, ISSN 1213-2489, (submitted)

[K3] Krebs, S. Methode zur Messung der Entmischung von Glasfasern in faserverstärkten Thermoplasten. *Kunststoffe*. Carl Hanser Verlag, 2022, ISSN 0023-5563, (submitted)

[K4] Krebs, S.; Kap. 2.1.7. Orientace molekul v plastech a anizotropie, In: Krebs, S.; Brzski Stunova, B.; Kolařík, L. *Technologie zpracování plastů a kompozitů*, Nakladatelství ČVUT, Praha 2020, ISBN 978-80-01-06722-2

Atypické praskání zkušebních těles z PA-GF

Při zkoušce tahem je tahová síla aplikována rovnoměrně z obou stran. Dalo by se očekávat přerušení ve středu nebo na dalších různých místech zkušebních těles. To však není tento případ, jak ukazuje Obr. 1. K praskání dochází opakovaně na konci zúžené části zkušebních těles. To platí pro různé rychlosti tahu a pro zkušební tělesa, která byla vyrobena různými vstřikovacími rychlostmi.



Obr. 1 - Atypické praskání zkušebních těles ze PA-GF

Cíle disertační práce

Hlavním cílem disertační práce je vysvětlit příčinu praskání výstřiku kompozitu z polyamidu a krátkých skleněných vláken.

Dílčí cíle:

1. Nalezení kvalitativních podmínek pro prasknutí výstřiků kompozitních částí z polyamidu vyztuženého krátkými skleněnými vlákny.
2. Experimentální analýza stavů výstřiků při nalezených podmínkách prasknutí.
3. Návrh výpočetního postupu pro určení podmínek stavů výstřiků z dílčího cíle 1, které vedou k prasknutí.
4. Určení velikosti významu podmínek z dílčího cíle 1 pro prasknutí kompozitních výstřiků z polyamidu a krátkých skleněných vláken.

Podmínky praskání

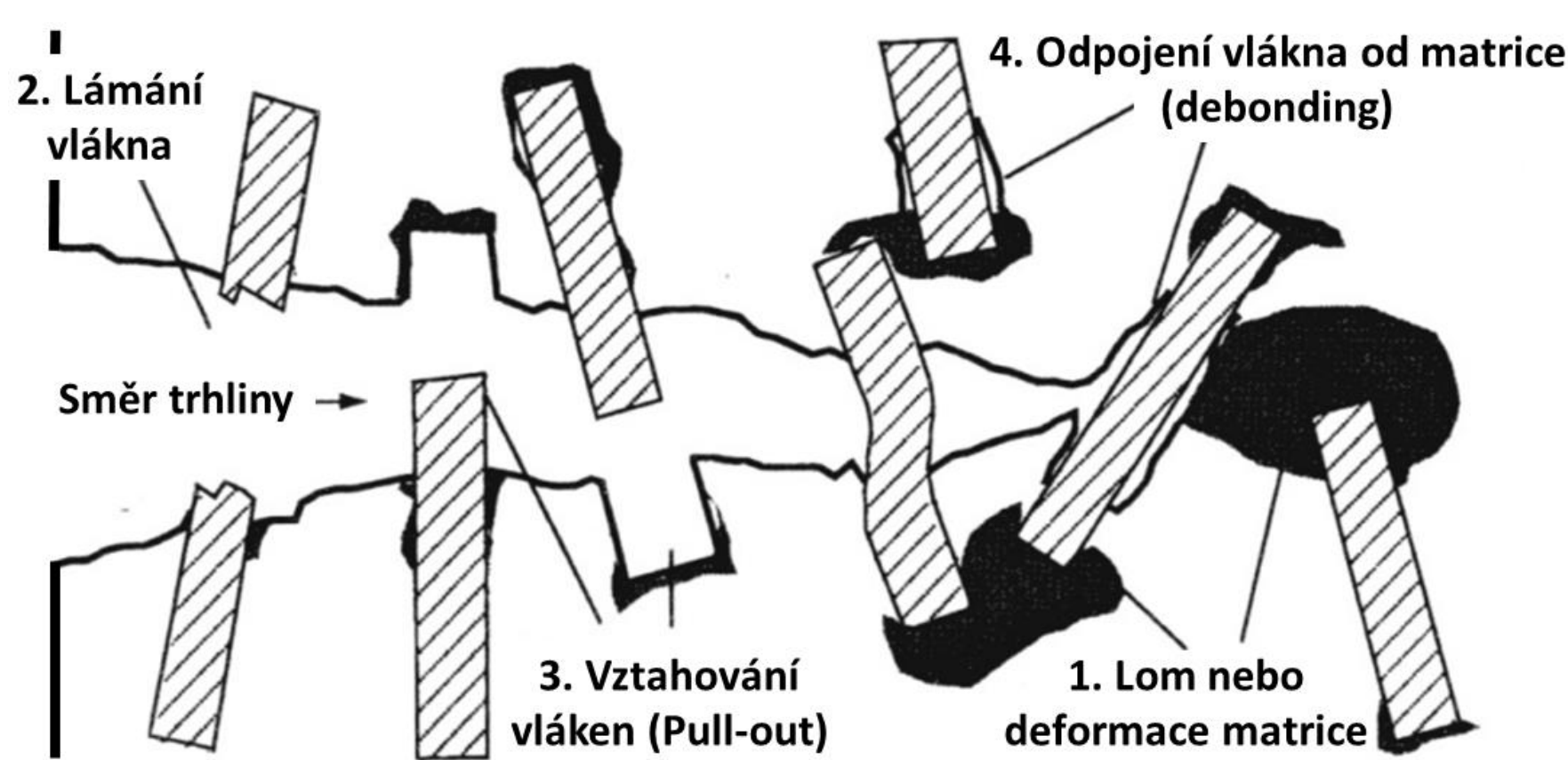
Kvalitativní podmínky pro praskání výstřiků jsou:

1. Podmínky, které vychází z podstaty taveného kompozitu:
 - a. Tavenina matrice kompozitu má ne-newtonovskou podstatu. V důsledku toho dochází k nadprůměrnému smykovému napětí blízko stěn formy.
 - b. Vlákna se mohou v tavenině vyrovnat (orientace):
 - c. Vlákna mají poměr délky k průměru (AR), který vytváří anizotropii
 - d. Tavenina kompozitu a vlákna je suspenze. Vlákna se mohou na některých místech hromadit (segregace).
2. Podmínky, které pochází z geometrie výlisku:
 - a. Průřez povrchu, kterým protéká tavenina kompozitu se zvětšuje. To vede k dekompresi taveniny, tzv. dekompresnímu toku (expanzní tok).
 - b. Průřez povrchu, kterým protéká tavenina kompozitu se zmenšuje. To vede ke stlačení taveniny, tzv. kompresnímu toku.
3. Podmínky, které pochází z charakteristiky lomu výstřiku: existuje mechanismus, který vede k prasknutí materiálu.

Čtyři mechanismy lomu kompozitu

V literatuře byly identifikovány čtyři různé mechanismy pro vznik a šíření trhlin ve výstřiku:

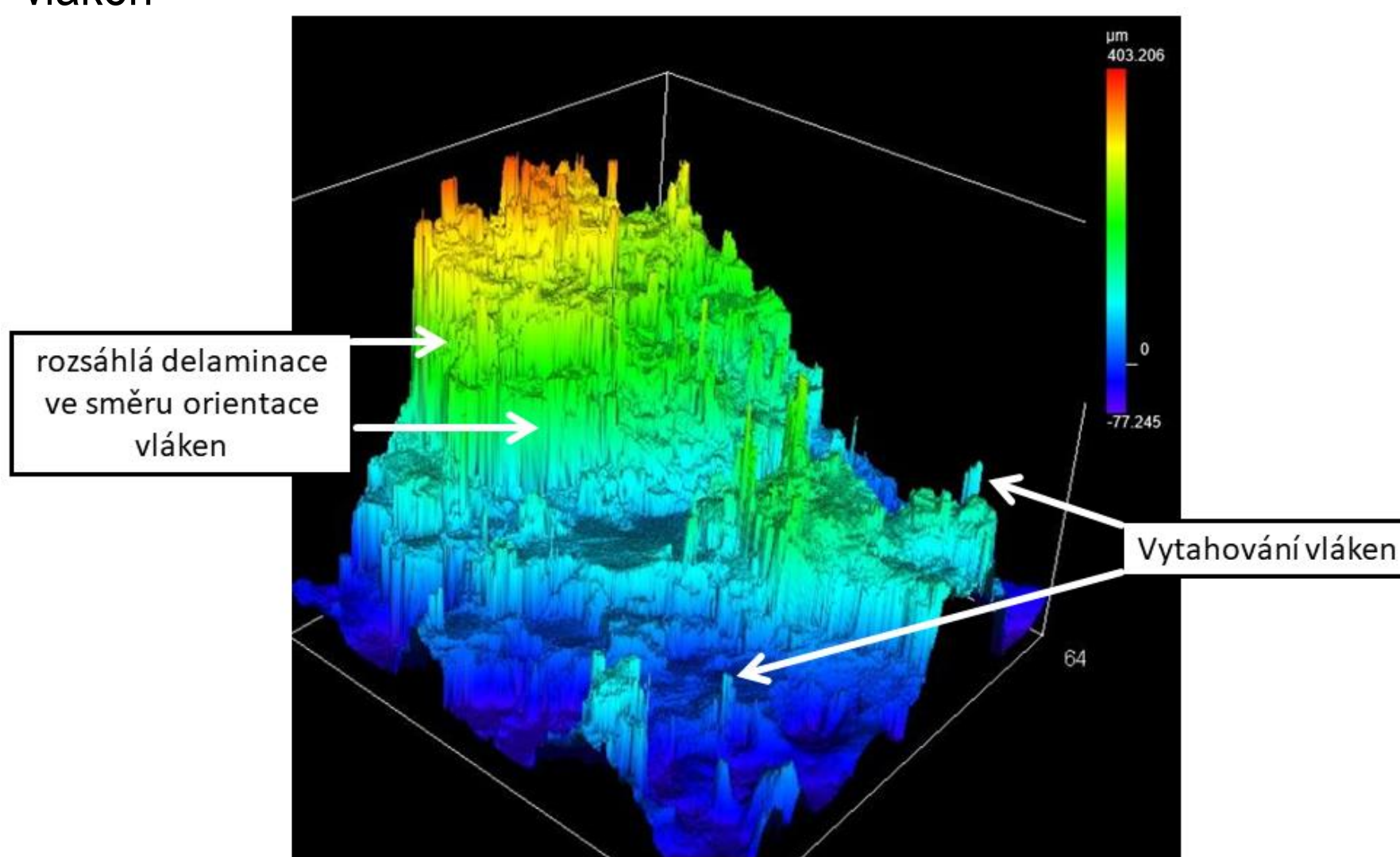
1. Lom nebo deformace matrice (Matrix fracture): materiál matrice podléhá zatížení, láme se nebo se deformuje.
2. Lámání vláken (Fibre fracture): vlákno, které je pevnější než matrice, ale také křehčí, se láme
3. Vytahování vláken (Pull-out): konec vlákna se oddělí od matrice a vyčnívá z povrchu lomu
4. Odpojení vlákna od matrice (De-bonding): vlákno se odděluje od matrice podél povrchu vlákna



Obr. 2 - Schematické znázornění čtyř mechanismů, které mohou vést k prasknutí kompozitu

Analýza lomu konfokální laserovou mikroskopií

Analýza lomu konfokální laserovou mikroskopií poskytuje vysvětlení pro spontánní křehký lom: rozsáhlá delaminace ve směru orientace vláken

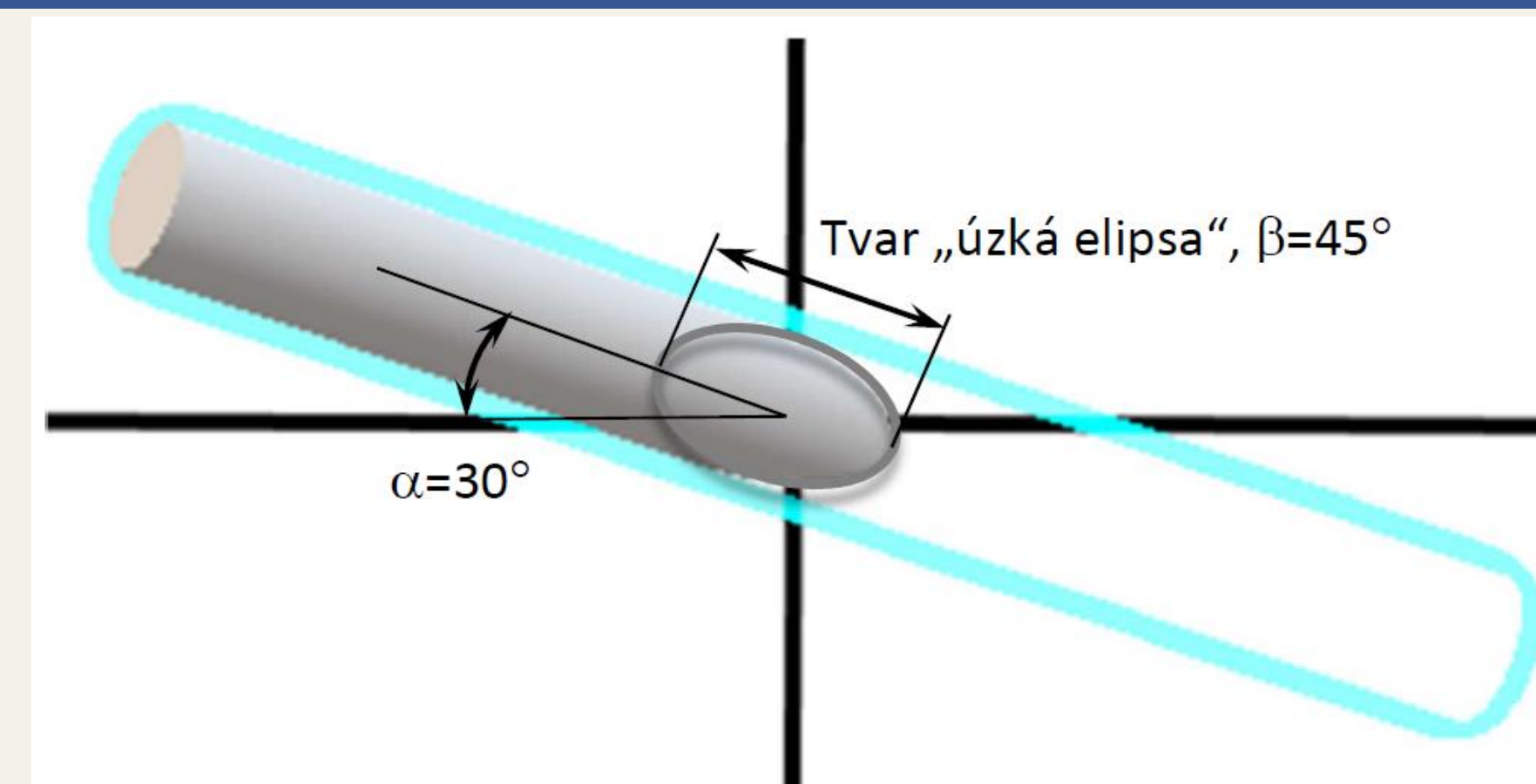


Obr. 3 - Snímek části lomu - metodou „3D model“ s barevným zdůrazněním výšky (zvětšení 20x)

Orientace vláken a mechanické vlastnosti

Orientace vláken je důležitá pro mechanické vlastnosti výstřiku. Orientace vláken určuje účinnost vyztuže. Vlákno, které bylo během fáze vstřikování orientováno ve směru toku, funguje dobře. Vlákno, které je kolmé na směr toku, je neúčinné a je možným důvodem delaminace.

Metoda měření orientace



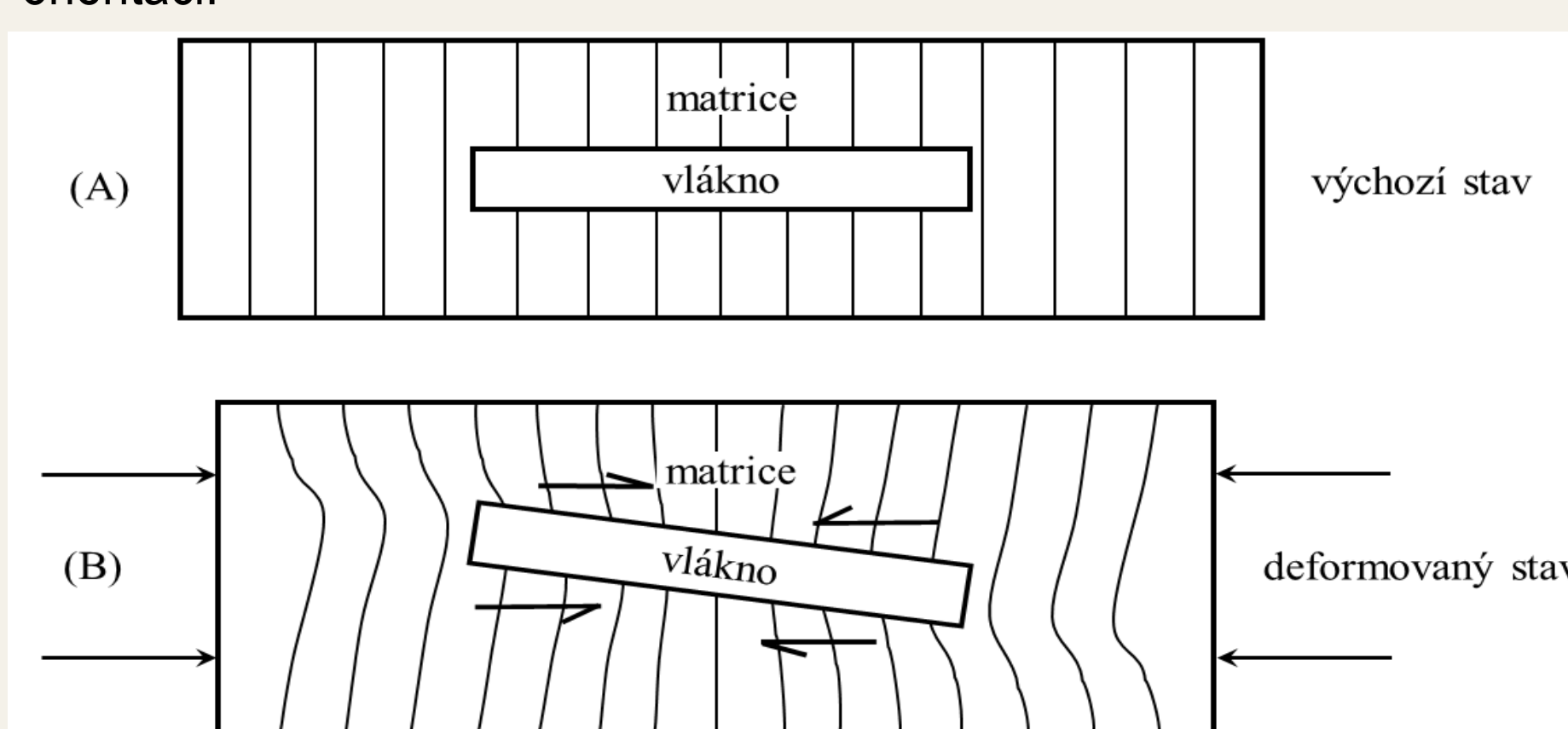
Obr. 4 Příklad: orientovaná vlákna: úhel natočení vlákna v rovině příčného řezu $\alpha=30^\circ$, v rovině kolmé a míra natočení vlákna $\beta=45^\circ$

Pro určení natočení vlákna jsou potřeba dva hodnotící parametry:

- a) Úhel natočení vlákna – α (viz Obr. 4)
- b) Míra natočení vlákna (v AJ: „aspect ratio“ AR). Z toho lze vypočítat úhel β .

Orientace vláken v kompresním toku

V místě praskání dochází ke kompresnímu toku, které oslabuje orientaci:

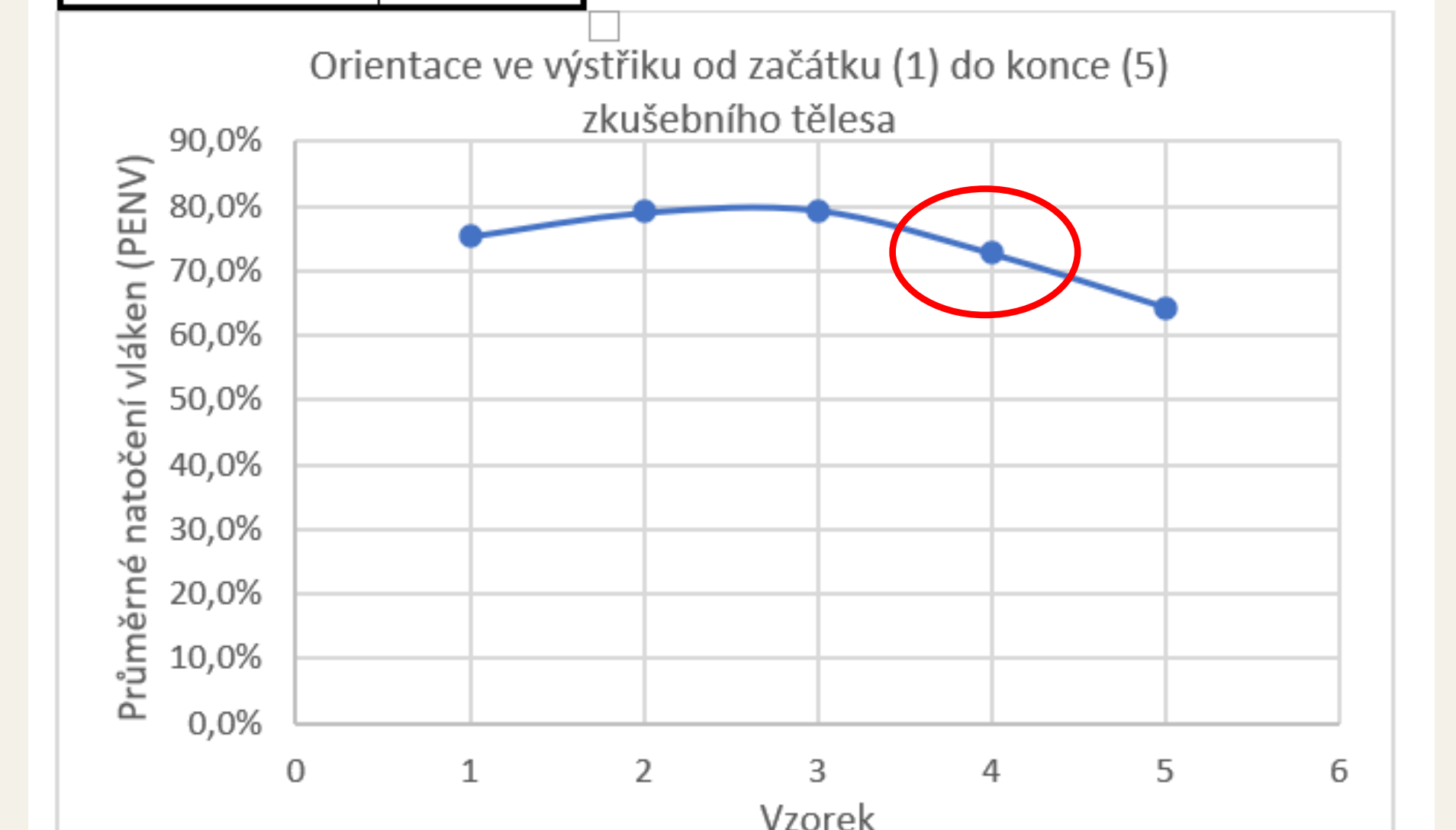


Obr. 5 - Analytický model chování orientovaného vlákna v kompresivním toku

Analýza orientace ve směru toku

Analýza orientace ve směru toku byla provedena plastografií. Za tímto účelem bylo analyzováno 8800 vláken s elektronickým vyhodnocením obrazu. Výsledky ukazují, že orientace v místě atypického praskání výrazně klesá.

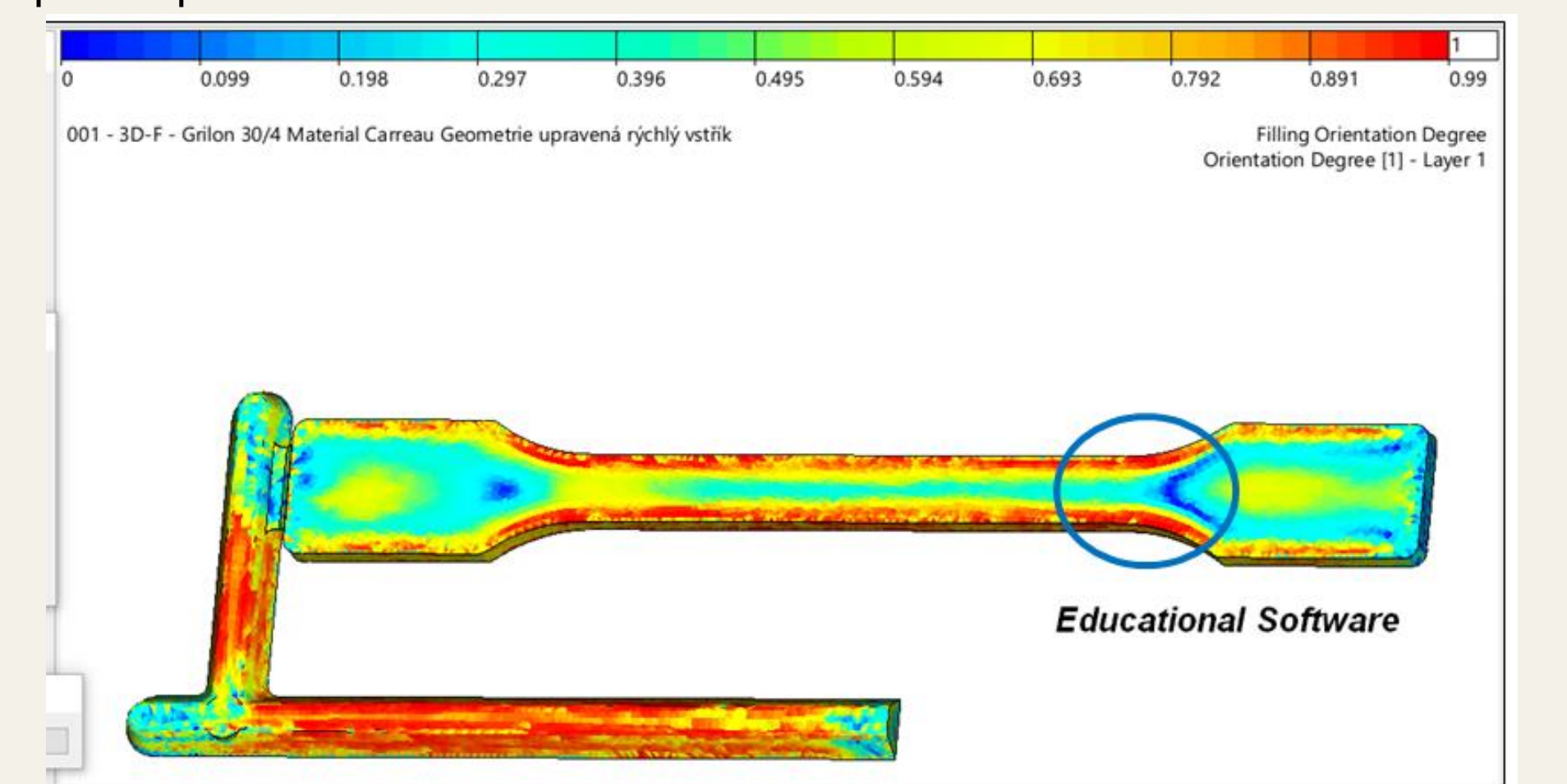
(viz schéma vpravo)	[%] ²
1	75,3 %
2	79,0 %
3	79,4 %
4	72,7 %
5	64,3 %
Max. odchylka	15,1 %



Obr. 6 – Plastografie: grafické znázornění průměrné efektivní natočení vláken podle směru toku taveniny

Analýza atypického praskání pomocí simulace

Kritické místo na Obr. 7 také vyniká v simulaci (označeno modrým kroužkem). V tomto místě je v modrém kruhu orientace nejnižší (tyrkysová a modrá barva). Vzhledem k tomu, že orientace v výstřiku je v tomto místě nejvyšší, je zde také nejslabší místo. Proto se lisovaný díl poruší právě tam.



Obr. 7 – Numerická simulace, stupeň orientace vláken

Závěr

Plastografické zkoumání i numerická simulace ukazují, že k lomu dochází v důsledku poklesu orientace v kompresním toku.

To vysvětluje atypické umístění místa porušení při tahové zkoušce. Následující tabulka zahrnuje velikosti významu podmínek z dílčího cíle 1 pro prasknutí kompozitních výstřiků z polyamidu a krátkých skleněných vláken.

Tab. 2 - Určení velikosti významu podmínek pro prasknutí výstřiků kompozitních částí z polyamidu vyztuženého krátkými skleněnými vlákny

Podmínky pro prasknutí výstřiků (viz 6.1.4)	Velikost významu podmínek*
1. Podmínky, které pochází z podstaty taveného kompozitu:	
a. Tavenina matrice kompozitu má ne-newtonovskou podstatu. V důsledku toho dochází k nadprůměrnému smykovému napětí blízko stěn formy.	++
b. Vlákna se mohou v tavenině vyrovnat (orientace):	++
c. Vlákna mají poměr délky k průměru (AR), který vytváří anizotropii	++
d. Tavenina kompozitu a vlákna jsou suspenze. Vlákna se mohou na některých místech hromadit (segregace).	+
2. Podmínky, které pochází z geometrie výlisku:	
a. Průřez povrchu, kterým protéká tavenina kompozitu se zvětšuje. To vede k dekompresi taveniny, tzv. dekompresnímu toku (expanzní tok).	+
b. Průřez povrchu, kterým protéká tavenina kompozitu se zmenšuje. To vede ke stlačení taveniny, tzv. kompresnímu toku.	-
3. Podmínky, které pochází z charakteristiky lomu výstřiku: existuje mechanismus, který vede k prasknutí materiálu.	+

* Velikost významu: ++ riziko se významně zvýší, + riziko se významně zvýší, - riziko prasknutí se sníží

Všechny cíle disertační práce byly splněny.

Kontakty

Autor:
Ing. Stefan Krebs
stefan.krebs@fs.cvut.cz
Školitel :
doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D., IWE
ladislav.kolarik@fs.cvut.cz