

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

EFEKTIVNÍ OBRÁBĚNÍ VLÁKNOVĚ VYZTUŽENÝCH KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ

EFFECTIVE MACHINING OF FIBER REINFORCED COMPOSITE MATERIALS

DISERTAČNÍ PRÁCE
PHD THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Ing. JAN SEDLÁČEK

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. ANTON HUMÁR, CSc.

BRNO 2010

Abstrakt

The objectives for this dissertation are to push forward the current state of knowledge in the area of machining fiber-reinforced plastic (FRP). The most common machining operation performed on these materials is drilling owing to the need for component assembly in mechanical pieces and structures. Among the defects caused by drilling, delamination appears as to be of the most critical and may occur at both the entrance and exit plane. A number of theoretical and experimental studies have been made to create an analytical model of delamination in composite laminates.

In this dissertation, the critical thrust force (force which initiates the delamination) is predicted using linear elastic fracture mechanics - assuming Mode I. Delamination is investigated by studying the evolution of feed force and torque applied by the tool on the workpiece. A four components piezoelectric dynamometer KISTLER 9272 with special PC-software is used for measuring and evaluating of torque and cutting forces, when drilling two different composite materials: carbon/epoxy laminate fabricated by hand lay-up technique and glass/polyester composite made by pultrusion. Wear mechanisms and location of the wear on the tool are also investigated (with respect to cutting material). The tool wear is measured with help of a common workshop microscope and recorded with scanning electron microscope PHILIPS XL30. Drilling experiments are performed to give complex technical information (i.e. cutting conditions, tool geometry, tool wear and so on) which enables efficient machining of composite materials. Delamination-free drilling is given special emphasis in the experiments. Methods of statistical analysis (DOE) are used to determine which factors have the most influence on delamination.

Abstract

K hlavním cílům disertační práce patří posunout aktuální stav znalostí v oblasti obrábění vláknově vyztužených kompozitů (FRP). Nejrozšířenější obráběcí operací při výrobě kompozitních dílců je vrtání, sloužící k výrobě děr pro různé spojovací součásti. Mezi nejzávažnější typy poškození vznikající při vrtání patří delaminace povrchových vrstev, ke které dochází jak při vstupu tak výstupu nástroje z obrobku. K vytvoření analytického modelu delaminace v kompozitních materiálech bylo provedeno několik teoretických a experimentálních studií.

V disertační práci je kritická tlaková síla (síla která způsobuje šíření trhliny) odvozena na základě lineární elastické mechaniky za předpokladu zatěžování Módem I. Vznik delaminace je vyšetřován (analyzován) z průběhu posuvové síly a kroučícího momentu. Pro měření posuvové síly a kroučícího momentu je využit čtyřsložkový piezoelektrický dynamometr KISTLER 9272, řízený osobním počítačem. Obráběnými materiály jsou uhlíkovo/epoxidový laminát vyrobený ruční laminací a sklo/polyesterový kompozit vyrobený pultruzí. Dále jsou zkoumány mechanismy a projevy opotřebení nástrojů a to vždy s ohledem na nástrojový materiál. Opotřebení je měřeno pomocí dílenského mikroskopu a snímky jsou pořízeny elektronovým mikroskopem PHILIPS XL30. Experimenty jsou navrženy za účelem získání systému vědeckotechnických informací (řezné podmínky, geometrie nástroje, opotřebení atd.), které umožní aplikovat optimální technologické postupy při zpracování kompozitních materiálů. Zvláštní důraz je kladen na vrtání bez vzniku delaminace. K vyhodnocení faktorů, které mají největší vliv na tvorbu delaminace jsou použity metody statistické analýzy (DOE).

Bibliografická citace

SEDLÁČEK, J. *Efektivní obrábění vláknově vyztužených kompozitních materiálů: Disertační práce*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie, 2010. 104 s, 7 příloh. Vedoucí disertační práce doc. Ing. Anton HUMÁR, CSc.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem disertační práci vypracoval samostatně a že všechny použité literární zdroje jsem správně a úplně citoval.

V Brně dne 15.3.2010

.....
Ing. Jan SEDLÁČEK

Poděkování

Děkuji tímto svému školiteli doc. Ing. Antonu Humárovi, CSc. za odborné vedení, množství cenných rad a připomínek při vypracování disertační práce. Dále prof. Ing. Miroslavu Píškovi, CSc. za vynikající zabezpečení mého doktorského studia a doc. Ing. Josefu Klementovi, CSc. za odbornou pomoc při volbě a výrobě uhlíkového laminátu. Současně chci poděkovat své ženě za podporu a trpělivost, kterou mi věnovala v průběhu celé doby postgraduálního studia.

Klíčová slova

Obrábění kompozitních materiálů, vrtání, delaminace, opotřebení nástroje, řezné síly, DOE

Key words

Composite machining, drilling, delamination, tool wear, cutting forces, DOE

Obsah

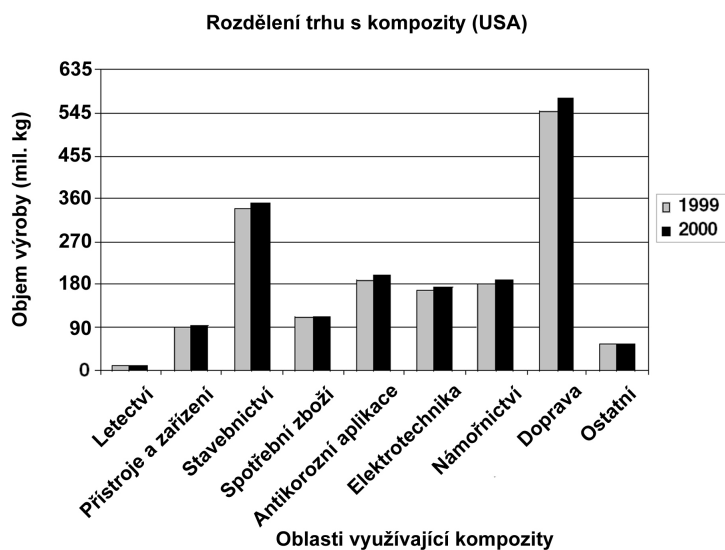
Obsah	7
1. Úvod	9
1.1 Analýza současného stavu	9
1.2 Cíle disertační práce	10
2. Kompozitní materiály	11
2.1 Definice a klasifikace	11
2.2 Historie a aplikace mikrokompozitních materiálů	12
2.3 Matrice	15
2.3.1 Nenasycené polyestery (UP)	16
2.3.2 Vinylesterové pryskyřice (VE)	17
2.3.3 Epoxidové pryskyřice (EP)	18
2.4 Vlákná	19
2.4.1 Skleněná vlákna	19
2.4.2 Uhlíková vlákna	21
2.4.3 Aramidová vlákna	23
2.4.4 Mechanismus porušení vláken	26
3. Řezné materiály a nástroje pro vrtání kompozitních materiálů	28
3.1 Rychlořezná ocel	29
3.2 Slinuté karbidy	30
3.3 Polykrystalický diamant (PKD)	31
4. Fyzikální podstata procesu řezání kompozitních materiálů	33
5. Specifikace obráběných materiálů	37
5.1 Mechanické vlastnosti	38
5.2 Měření lomové houževnatosti G_{IC}	39
6. Rozbor řezných sil při vrtání	41
6.1 Časový průběh posuvové síly a kroutícího momentu	42
6.2 Vliv opotřebení vrtáků na posuvovou sílu a kroutící moment	44
7. Lomová mechanika	50
7.1 Griffithovo kritérium (energetická bilance)	51
7.2.1 Rychlost uvolňování energie (hnací síla trhliny)	51
7.3 Napěťová analýza okolí trhliny	52
7.3.1 Součinitel (faktor) intenzity napětí	53

7.3.2 Vztah mezi K a globálními vlastnostmi součásti	54
7.4 Křivkový J integrál	56
8. Delaminace kompozitních materiálů	57
8.1 Kvantifikace delaminace	57
8.2 Fyzikální model delaminace při výstupu nástroje	59
8.3 Fyzikální model delaminace při vstupu nástroje	61
8.4 Verifikace navrženého modelu delaminace	62
9. Vliv řezných podmínek na delaminaci	66
9.1 Návrh experimentu (DOE)	66
9.2 Posuv a geometrie vrtáku vs. delaminace	72
9.3 Opatření vrtáku vs. delaminace	81
10. Shrnutí dosažených výsledků	85
11. Perspektiva dalších výzkumných prací	87
Seznam použité literatury	88
Seznam tabulek	93
Seznam použitých symbolů	95
Publikační činnost	98
Přílohy	99
Seznam příloh	99

1. Úvod

1.1 Analýza současného stavu

Spotřeba kompozitních materiálů v průmyslově vyspělých krajinách celého světa je velmi vysoká (16 mil. tun) a ročně se zvětšuje o více než 10%.¹⁶ První místo patří jednoznačně USA, kde v roce 2000 dosáhla celková odhadovaná spotřeba výše 1,779 mil. tun, rozdělení jednotlivých oblastí je na obrázku 1.1. Pro porovnání např. v roce 1996 dosáhla celková odhadovaná spotřeba 1,471 mil. tun (v ceně 116 miliard dolarů), z toho nejvíce v oblasti výroby dopravních zařízení (432 tisíce tun/22 miliard USD), při stavbě budov (287 tisíc tun/17 miliard USD), v antikoročních aplikacích (182 tisíce tun/15 miliard USD), při stavbě lodí (169 tisíc tun /14 miliard USD), při výrobě spotřebního zboží (121 tisíc tun/11 miliard USD), atd. Největší jednorázovou stavební aplikací tažených vláknově vyztužených kompozitních profilů v Evropě bylo jejich použití při stavbě tunelu pod kanálem La Manche (3 500 tun).



Obr.1.1³

V ČR je odhadována spotřeba nejrůznějších typů dlouhvláknových kompozitů pouze na 10 000 tun ročně (největší využití je ve výrobě malých sportovních letounů, asi 350 kusů ročně). V přepočtu na jednoho obyvatele je to tedy zhruba 10krát méně než v USA a 5-8krát méně než v Japonsku a dalších zemích EU. Většina vláknových kompozitů produkovaných v ČR má formu ručně kladených laminátů na bázi skleněných výztuží s polyesterovými pojivy, i když se i zde začínají objevovat modernější technologie. Je tedy nasnadě, že i u nás je třeba pro příští léta očekávat výrazný nárůst objemu výroby těchto materiálů, včetně nárůstu požadavků na zavádění nových technologií jejich výroby, zpracování i obrábění.

K nejrozšířenějším obráběcím operacím při výrobě dílců z vláknově vyztužených kompozitů patří soustružení, frézování, řezání (dělení), broušení (dokončování ploch různého tvaru), výroba závitů a zejména vrtání, sloužící k výrobě děr pro různé spojovací součásti (šrouby, nýty, kolíky, atd.). Celkový počet děr zhotovených při výrobě stíhacího letounu se pohybuje v rozmezí 250 000 až 400 000 děr a v případě bombardéru, nebo dopravního letounu dokonce 1 000 000 až 2 000 000 děr.³ Náklady na obrábění tak v leteckém a kosmickém průmyslu, ale i v mnoha dalších kompozitní materiály využívajících odvětvích, tvoří významný podíl z celkových výrobních nákladů.

Vysoké požadavky při obrábění kompozitních materiálů jsou v mnoha případech kladeny především na jakost, což je dáno aplikací těchto materiálů v odvětvích vyžadujících vysokou spolehlivost (letadla, raketoplány, lodě, mosty, ...). Pro dokonalé pochopení a dosažení požadované jakosti obrábění je nutné znát zákonitosti řezání, tj. mechanismy procesu tvorby třísky a jejich vlivů na vlastnosti dokončeného povrchu. Zatímco problematika obrobitelnosti kovových materiálů byla především díky intenzivnímu bádání postupně objasněna, informace týkající se obrobitelnosti kompozitních materiálů jsou doposud poněkud nedostatečné. Navíc většina poznatků z obrábění kovových materiálů je na kompozitní materiály (díky jejich specifickým vlastnostem) v praxi jen ztěží aplikovatelná.

1.2 Cíle disertační práce

Hlavní úkoly a cíle disertační práce lze shrnout do následujících bodů:

Cíle teoretické části:

- rozbor problematiky obrábění vláknově vyztužených kompozitních materiálů z dostupné odborné literatury a vědeckých článků,
- návrh mechanismu vzniku a oddělování třísky s ohledem na orientaci vyztužujících vláken,
- detailní rozbor delaminace povrchových vrstev při vrtání kompozitních materiálů,
- odvození kritické delaminační síly při které nastane šíření trhliny,
- rozbor možných metod pro kvantitativní vyhodnocení delaminace obrobeného povrchu,
- rozbor řezných sil, mechanismů a forem opotřebení nástroje při vrtání.

Cíle experimentální části:

- realizace experimentálních zkoušek zaměřených na trvanlivost nástroje a tvorbu delaminace,
- vzájemné posouzení trvanlivosti řezných nástrojů na základě velikosti jejich silového zatížení a rozvoje opotřebení funkčních ploch při zvolených řezných podmínkách,
- stanovení lomové houževnatosti obráběných kompozitních materiálů,
- verifikace navrženého fyzikálního modelu delaminace z hlediska porovnání vypočtených a naměřených sil
- verifikace skutečné a vypočtené hloubky poškození,
- analýza vlivu geometrie nástroje, řezných podmínek a velikosti opotřebení nástroje na kvalitu obrobeného povrchu,
- stanovení faktorů s největším vlivem na delaminaci za pomoci statistického nástroje plánování experimentu (DOE).

Vědecký a praktický přínos:

- k hlavním cílům disertační práce patří vytvoření systému konkrétních vědeckotechnických informací, které umožní aplikovat optimální technologické postupy při zpracování kompozitních materiálů,
- poskytnutí informací o vhodné geometrii břitu, nástrojovém materiálu a především řezných podmínkách, které vedou ke snížení vícenákladů spojených s další úpravou, nebo opravou okolí vrtaných děr,
- přínos pro praxi v podobě optimální volby nástrojového materiálu a geometrie za účelem zvýšení životnosti nástroje a následně vyšší produktivity.

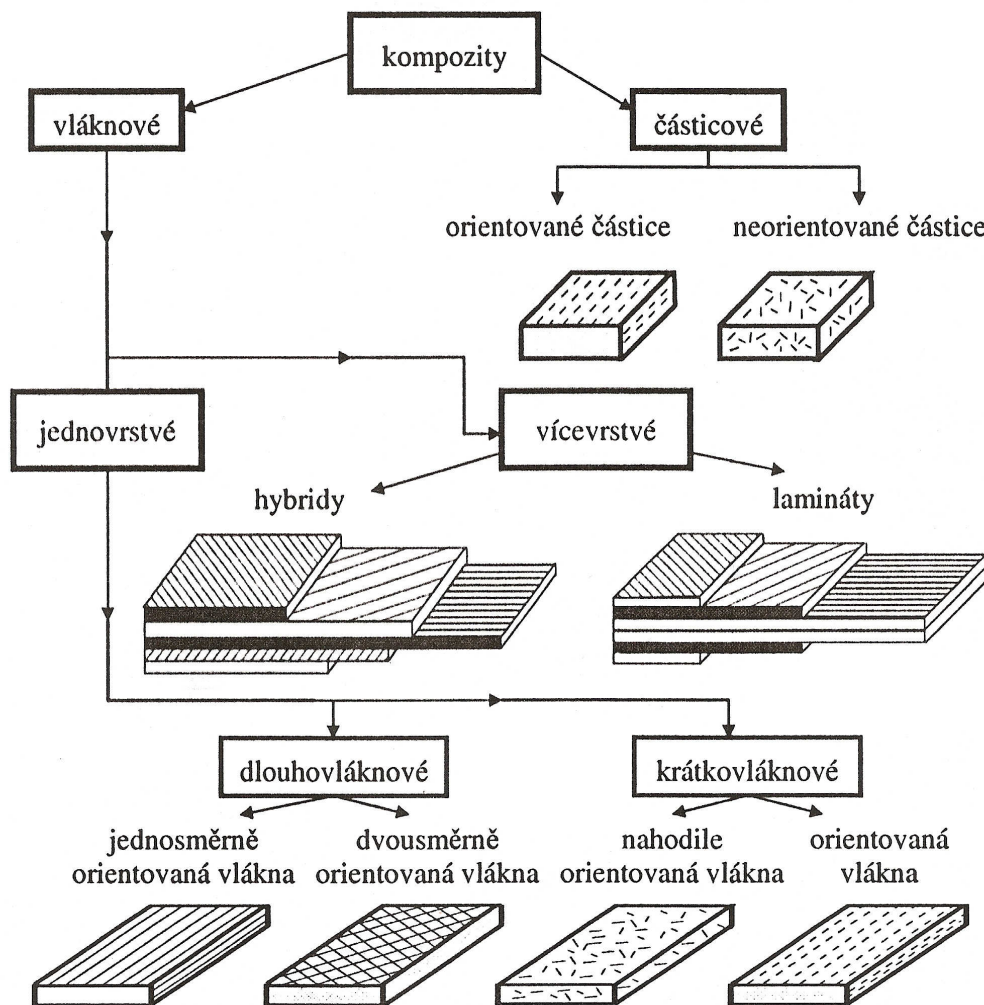
2. Kompozitní materiály

2.1 Definice a klasifikace

Kompozitní materiály jsou složeny ze dvou nebo více chemických složek (fází). Tvrďší, tužší a pevnější nespojitá složka se nazývá výztuž, spojitá a obvykle poddajnější složka, která zastává funkci pojiva výztuže, se nazývá matrice.²⁷

Kompozitní materiály mohou obsahovat vyztužující fáze různých rozměrů. Ve strojírenství mají největší význam mikrokompozitní materiály, u kterých se největší příčné rozměry výztuže pohybují v rozmezí 10^0 až 10^2 μm .^{27,28} Makrokompozity jsou používány především ve stavebnictví (železobeton vyztužený ocelovými pruty, polymerbetony obsahující drcené kamenivo a písek, atd.). Nanokompozity obsahují částice, jejichž rozměr (průměr nebo délka) je v jednotkách nm, tzn. menší než 1 μm .^{27,28}

Na obr. 2.1 je uvedena obecně přijatá klasifikace kompozitních materiálů. Je zřejmé, že základním hlediskem dělení je tvar prvků vyztužující fáze, podle kterého jsou kompozity rozdělovány na vláknové a částicové. Vláknové kompozity jsou vyztuženy vlákny, která mají délkové rozměry podstatně větší než průřezové. Ty se dále dělí na dlouhovláknové (poměr délky vlákna k jeho průměru je větší než 100 nebo je délka vlákna totožná s délkou dílce) a krátkovláknové (poměr délky vlákna k jeho průměru je menší než 100).⁵ Částicové kompozity jsou plněny částicemi, které jsou definovány jako nevláknový útvar ve tvaru koule, krychle, kvádru, popř. jiného tvaru. Částice se mohou rovněž podílet na přenosu namáhání, ale v mnohem menším měřítku než vlákna. Hlavní význam částic je zlepšení mechanických vlastností materiálu, např. úprava elektrické a tepelné vodivosti, zvýšení odolnosti proti opotřebení, snížení koeficientu tření, apod.⁴¹ Částice mohou mít v matici náhodnou orientaci, nebo přednostní orientaci z důvodu dosažení požadovaných mechanických vlastností.



Obr.2.1 ⁴¹

V praxi se nejčastěji používají vícevrstvé kompozity, které se skládají z několika tenkých různě orientovaných jednosměrných vláknových kompozitů – lamin. Jsou-li materiály v každé vrstvě stejné, např. skleněná vlákna v epoxidové pryskyřici, nazývá se tento kompozit laminát. V případě, že jsou vrstvy vyrobeny z různých materiálů, například jedna vrstva je vyztužena skleněnými vlákny a druhá uhlíkovými, jedná se o tzv. hybridní lamináty.

2.2 Historie a aplikace mikrokompozitních materiálů

Koncepce vyztužování pryskyřice je stejně stará jako první skutečně realizovaná syntetická pryskyřice a datuje se do roku 1908, kdy chemik Baekeland objevil, že fenolickou pryskyřici (PF) lze naplnit dřevěnými vlákny (moučkou), zpracovat do požadovaného tvaru a vyrobit z ní elektrické izolátory.^{5,46}

Vývoj vyztužených plastů, které jsou používány v dnešní době, souvisí s rozvojem letecké výroby na začátku 20. let našeho století a intenzivnějším tempem pokračoval zejména ve 40. letech (období druhé světové války a těsně po ní). První zájem v oblasti vývoje kompozitů v období druhé světové války byl zaměřen zejména na kryty radarových zařízení letadel, protože bylo prokázáno, že tyto materiály vykazují nulový útlum elektromagnetických vln. Později začaly být v leteckém průmyslu z kompozitů vyráběny motorové gondoly a přídatné palivové nádrže.

Stručný historický vývoj nejznámějších kompozitních materiálů lze popsat následovně:

Sklolamináty (skleněná vlákna + polymer) ^{5,46}

- 1930 - začátek výroby skleněných vláken v USA
- 1942 - radomy (kryty radarů letadel) s reaktoplastickou matricí vyztuženou skleněnou tkaninou
- 1943 - Spitfire – sklolaminátová konstrukce trupu vojenského letounu
- 1945 - B-15 tréninkové letadlo – sklolaminátový sendvič
- 1952 - čluny (skleněné rohože ze sekaných vláken)
- 1950 - protikorozní aplikace laminátů – fumarové, chlorované a izoftalové polyestery
- 1956 - automobily Citroen – střecha
- 1957 - začátky RTM technologie, dnes trupy člunů, kabiny a spojery nákladních automobilů, díly karosérií osobních automobilů, sanitární výrobky (nenasycená polyesterová pryskyřice (UP)), výztužné prvky vojenských letadel (epoxidové (EP) pryskyřice)
- 1966 - lisování prepregu (SMC technologie s UP), např. spojler u automobilu Chrysler Estate
- 1970 - nárazník osobního vozu Citroen R5
- 1972 - minolovky – celokompozitové, 170 m dlouhé trupy

Uhlíkové kompozity ⁴⁶

- 1957 - první uhlíkové vlákno z viskózy v USA (Union Carbide)
- 1961 - první uhlíkové vlákno z polyakrylonitrilu (PAN) v Japonsku (společnost Toray)
- 1971 - komerční výroba uhlíkových vláken z PAN (Toray), výroba 12 tun/rok
- 1972 - počátek výroby uhlíkových vláken u firmy Aldila na golfové hole
- 1976 - počátek výroby uhlíkových vláken z mezofázových smol
- 1978 - export technologie Toray (Japonsko) do Union Carbide (USA)
- 1986 - počátek výroby velmi pevného „středněmodulového“ (IM) vlákna u firmy Toray (Torayca[®]T1000)
- 1990 - prepreg Torayca[®] (vlákna T800H a T800S + houževnatá EP)
- 1992 - počátek výroby uhlíkových vláken z PAN firmy Zoltek Co.
- 1992 - spojení firem SIGRI GmbH (Německo) a Great Lakes Carbon (USA) do firmy SGL Carbon AG
- 1998 - firma Hercules prodala výrobu společnosti Hexcel
- 1999 - spojení firmy Aldila Inc.(USA) a firmy SGL Carbon AG
- 2000 - Toho Tenax získal firmu Fortafil Fibers
- 2000 - založení firmy Cytec Industries
- 2000 - společnost Teijin (Japonsko) převzala kontrolu nad Toho Tenax (Japonsko a Evropa)
- 2001 - BP Amoco prodalo výrobu a obchod firmě Cytec
- 2006 - počátek výroby přetržených kontinuálních uhlíkových vláken “SBCF” (společnost Hexcel)
- 2006 - vlákno z uhlíkových nanotubiček (patent Los Alamos National Laboratory, založena firma CNT Technologies, Inc., Seattle, USA)
- 2007 - vznik firmy SGL Group – The Carbon Company

Polymerní vlákna ⁴⁶

- 1960 - meta-aramid Nomex[®] (E. I. DuPont de Nemours, USA)
- 1965 - patent S. L. Kwolek (E. I. DuPont de Nemours, USA) – para-aramidové vlákno Kevlar[®]
- 1985 - UHMW PE vlákno, firma DSM (Holandsko) - značka Dyneema[®] a firma Allied Signal (dnes Honeywell Int., USA) – značka Spectra[®] 900, 1000, 2000

- 1998 - PBO vlákno, značka Zylon[®], firma Toybo (Japonsko)
- 2000 - vlákno M5[®], firma Magellan Systems International (USA)
- 2000 - firma Teijin převzala výrobu Twaronu (Teijin Aramid)
- 2006 - HMPP Innegra[™] (vlákna polypropylenu s vysokým modulem pružnosti, firma Innegrity (USA))

Je zřejmé, že oblasti použití vláknově vyztužených kompozitů jsou určeny především vlastnostmi těchto materiálů. K největším uživatelům kompozitních materiálů patří:

- stavebnictví (železniční a lehké konstrukce, ekologické a chemické stavby, papírenské provozy, stavby pro rozvod energie, telekomunikační stavby, nástavby na výškové budovy, pláště budov, okenní rámy, shrnovací vrata, pracovní a obslužné plošiny, lávky a přechody v provozech s agresivnějším prostředím, rošty pro chemické provozy, čističky a úpravy vod, potravinářské provozy, rozvodná zařízení, atd.),
- nákladní doprava (kontejnery, nákladní návěsy, ramena hydraulických zvedáků, výsuvné plošiny, přívěsy za nákladní i osobní automobily),
- výroba prostředků pozemní hromadné dopravy (interiéry kolejových vozidel, součásti karosérií kolejových vozidel, trolejbusy, autobusy),
- výroba osobních automobilů,
- letecký a kosmický průmysl,
- výroba vojenské techniky,
- rozvod elektrické energie (rozdávěče, izolátory, sloupy elektrického osvětlení, kabelové tratě, manipulační tyče, nevodivé obslužné žebříky, atd.),
- výroba sportovních potřeb (golfové hole, luky, hokejky),
- oblast reklamy (billboardy).

Jeden z příkladů typického stavebního užití kompozitních výrobků je uveden na obrázku 2.2, další na obr. 2.3. Jedná se o kompozitní nosné konstrukce lávky a můstku, které vyrobila a dodala firma PREFA Brno, a.s., Závod kompozity. Matrice je standardně z izoftalického polyesteru, pro speciální aplikace z vinylesterové pryskyřice. Výztuhu tvoří skleněná vlákna ve formě přímých rovingů a plošných rohoží. Těsně pod povrchem profilu je polyesterová rouška, která brání degradaci materiálu vlivem UV záření. Jako přísada se používá UV inhibitor a retardér hoření (přísada patřící do skupiny prostředků snižujících hořlavost polymerů).



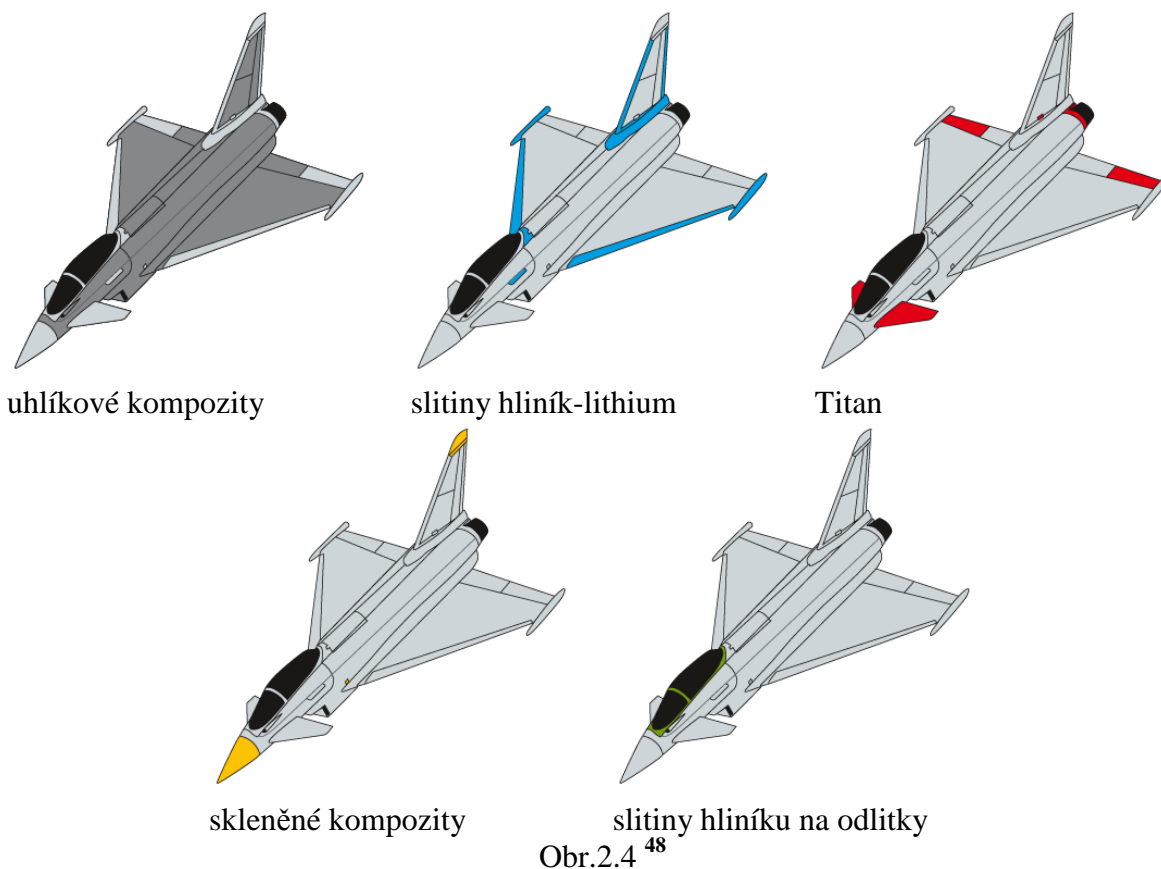
Obr.2.2 Nosná konstrukce lávky, 2000 ⁴⁷



Obr.2.3 Skokanský můstek ⁴⁷

Příkladem využití kompozitů ve vojenském leteckém průmyslu je stíhací letoun Eurofighter Typhoon na jehož vývoji se podílely společnosti Eurofighter Jagdflugzeug GmbH

sídlící v Mnichově, Alenia z Itálie, britská British Aerospace, CASA ze Španělska a DASA v Německu. Společnostmi zodpovědnými za vývoj motoru EJ200 jsou Eurojet GmbH se sídlem v Mnichově (vlastněná firmou Rolls Royce), Motoren und Turbinen Union, Fiat Aviazione a ITP.^{48,49,50}



Drak letounu ✖ (airframe) tvoří ze 70% kompozity s uhlíkovými vlákny, z 15% lehké slitiny a titan, z 12% kompozity vyztužené skleněnými vlákny a 3% tvoří další materiály. To znamená, že podíl kovů je pouze 15% ze všech materiálů použitých pro konstrukci draku letounu Eurofighter Typhoon.⁴⁹

✖ Pozn.: Drak letadla tvoří nepostradatelné pevné části konstrukce letadla, které jsou nezbytné k uskutečnění letu: trup, nosné plochy (křídlo), ocasní plochy (SOP, VOP), podvozek a soustava řízení. Mezi součásti draku letadla nepatří motory, přístrojové vybavení nebo vybavení interiéru.⁵¹

2.3 Matrice

Pro kompozity s kontinuálními vlákny se nejvíce používají polymerní matrice. Z hlediska klasifikace existují dva základní typy polymerních matic, a to reaktoplastické nebo termoplastické.

Mezi nejpoužívanější matrice patří především nenasycené polyestery (UP), vinylestery (VE), epoxidy (EP) a z termoplastů polypropylen (PP) a polyamidy (PA).^{27,29} Reaktoplasty a aromatické termoplasty s vysokou teplotou tvarové stálosti se vzhledem k své ceně používají především ve vojenském průmyslu (například spodní kompozitní díly tryskových letadel s

kolmým startem musí mít matrici s vysokou tepelnou odolností), případně pro výrobu špičkových zařízení (družice, raketoplány, střely s plochou dráhou letu a pod.).

Při výběru vhodné pryskyřice se musí přihlížet i k následujícím vlastnostem:²⁹

Užitné vlastnosti	Technologické vlastnosti
Pevnost	Viskozita pryskyřice
Modul pružnosti	Smáčivost vláken
Prodloužení při přetržení	Doba želatinace
Houževnatost	Skladovatelnost
Odolnost proti tečení	Reakční rychlost
Tepelná odolnost	Doba želatinace
Hořlavost	Obsah těkavých látek
Navlhavost	Smrštění při reakci
Odolnost proti UV záření	Citlivost na poměr složek
Dielektrické vlastnosti	Vedlejší produkty vytvrzování
Chemická odolnost	Adheze k povrchu formy

2.3.1 Nenasycené polyestery (UP)

Patří k nejpoužívanějším pryskyřicím. Lineární nenasyčený polyester je připraven reakcí dvou funkčních složek (polypropylenglykolu a kyseliny ftalové, maleinové nebo anhydridu (ftalanhydridu, maleianhydridu)). Vzniklý předpolymer je poté rozpuštěn v reaktivním rozpouštědle (obvykle styrenu). Katalyzátorem (iniciátorem) síťovací reakce jsou organické peroxidy (nejčastěji metyletylketonperoxid, MEKP), aktivátorem (urychlovačem) obvykle naftenan kobaltnatý. Volbou vytvrzovacího systému lze dosáhnout širokého rozmezí doby gelace a doby vytvrzení. Polyesterové pryskyřice lze proto použít pro všechny technologie. Viskozitu pryskyřice určuje podíl reaktivního rozpouštědla. Pro technologie vyžadující nízkou viskozitu pryskyřice (0,2 až 0,4 Pa.s) je obsah rozpouštědla volen větší, ovšem za cenu menší pevnosti a tepelné odolnosti matrice kompozitu.

Základní druhy nenasyčených polyesterových pryskyřic jsou:²⁹

- orthoftalová – nejnižší cena,
- izoftalová – dražší a kvalitnější než orthoftalová, lepší chemická a tepelná vodivost,
- fumarová – dobrá chemická i tepelná vodivost,
- chlorftalová – je nehořlavá, mechanické vlastnosti jsou horší,
- tereftalová – velmi dobrá chemická i tepelná odolnost.

Tab.2.1 Mechanické vlastnosti a tepelná odolnost některých čistých pryskyřic ²⁹

Pryskyřice	Modul pružnosti E [MPa]	Pevnost v tahu [MPa]	Maximální pracovní teplota [C°]
orthoftalová	3400	55	80
izoftalová	3400	75	90
fumarová	2800	40	130
chlorftalová	3400	20	140

Nemodifikované nenasyčené polyesterové pryskyřice mají velké smrštění při vytvrzování (7 až 8 %). Jsou křehké, snadno v nich vznikají mikrotrhlky. Mají dobré elektrické vlastnosti (nevodivost, hodnota relativní permitivity), stejně jako odolnost proti ultrafialovému záření. Pryskyřice dobře smáčejí skleněná vlákna, ale pevnost vazby matrice - skleněné vlákno je menší (nejsou tak dobrými "lepidly" jako epoxidové pryskyřice).

Pro dosažení menšího smrštění při vytvrzování a kvalitnějšího povrchu kompozitu (např. bez propadlin u výlisku v místech připojení žeber) je nutno použít směsi pryskyřice s plnivý nebo práškovými termoplasty. Tyto přísady však nejen redukují smrštění, ale také snižují tekutost směsi (dosahuje se pastovité konzistence) a proto se jich používá jen ve směsích pro lisování.

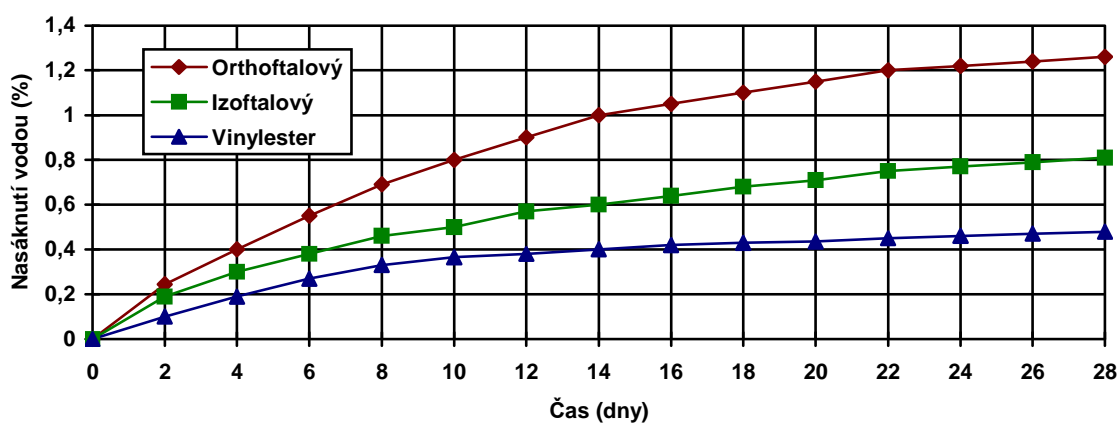
2.3.2 Vinylesterové pryskyřice (VE)

Jsou to nenasyčené estery epoxidových pryskyřic. Vyrábějí se buď z bisfenolu A nebo novolakové pryskyřice, kyseliny akrylové (methakrylové) a reaktivního rozpouštědla (obvykle styrenu). Makromolekula předpolymeru VE má méně reaktivních míst než u UP, dvojná vazba je umístěna pouze na koncích řetězce. Důsledkem je menší stupeň zesítnění, vedoucí k větší ohebnosti pryskyřice a větší odolnosti proti tvorbě mikrotrhlinek. Kompozity s vinylesterovými pryskyřicemi mají větší mezilaminární smykovou pevnost a větší houževnatost než kompozity s nenasyčenými polyestery.

Vinylesterová pryskyřice má ve srovnání s UP také:^{6,29}

1. vyšší teplotu skelného přechodu (větší tepelnou odolnost),
2. vyšší odolnost proti působení UV záření,
3. velkou odolnost v kyselém i zásaditém prostředí,
4. vysokou schopnost pohlcovat mechanické a tepelné rázy,
5. vyšší cenu,
6. pomalejší reakci při vytvrzování.

Jedna z vlastností řídících výběr pryskyřice pro použití ve vlhkém či korozivním prostředí je její nasákavost vodou (obr. 2.5). Z obrázku je patrné, že VE dosahují při nasycení (cca po 1 měsíci expozici 100% vlhkosti) poloviční nasákavosti ve srovnání s izo-UP a dokonce třikrát nižší ve srovnání s obyčejnými orto-UP.



Obr.2.5⁶

Pro vinylestery se používají stejné vytvrzovací systémy jako pro UP, nejčastěji dibenzoylperoxid, jehož se na trhu vyskytuje řada typů v různých koncentracích, prášcích či pastách. Při koncentracích 1-2% je životnost směsi několik dní, ale při teplotách nad 80 °C se dosáhne rychlého vytvrzení. Pro nejrychlejší vytvrzení lze použít kombinace několika iniciátorů a urychlujících katalyzátorů, např. dimethylanilin. Pro pultruzi je nejperspektivnější použití perketalů a peresterů.⁶

2.3.3 Epoxidové pryskyřice (EP)

Jsou to nejvšestrannější reaktoplasty pro konstrukční použití. V závislosti na chemické struktuře pryskyřice a použitém tvrdidlu a případných modifikujících složkách mají nejširší rozsah vlastností. Mají dobrou houževnatost (v porovnání s ostatními reaktoplasty), odolnost proti únavě a tečení, výbornou adhezi k vláknům, uspokojivou teplotní odolnost, výtečnou chemickou odolnost, dobré elektrické vlastnosti a malé smrštění při vytvrzování. V důsledku polárnosti (přítomnosti hydroxylových skupin) jsou navlhavé, takže za přítomnosti vody je nutné počítat se značným zhoršením teplotní odolnosti i u pryskyřic s vysokou teplotou skelného přechodu (tetrafunkční epoxidy), z důvodu plastifikačního účinku vody.

Viskozita epoxidových pryskyřic v nevytvrzeném stavu je větší než u UP a VE. Podle molekulové hmotnosti se jedná o kapaliny až tuhé nelepivé látky. Přidáním dalších složek (reaktivních ředidel), případně modifikací složkou pro zvýšení houževnatosti, lze užité a technologické vlastnosti výsledné směsi měnit v širokém rozmezí. Vytvrzovací reakce u EP je stupňovité povahy, probíhá velmi pomalu, takže obvykle nevznikají problémy s exotermickou povahou vytvrzovacího procesu (s výjimkou tlustostěnných dílů). Při vytvrzování epoxidové pryskyřice se neuvolňují vedlejší produkty, takže k získání kompozitu bez dutin (bublin) není zapotřebí vysokého tlaku. V případech, kdy je žádoucí vytvrzovací proces naopak zkrátit lze použít urychlovačů (obvykle BDMA - benzyldimethylamin). Epoxidy jsou proto použitelné pro všechny technologie, ale jsou dražší než UP a VE.

Základními druhy epoxidových pryskyřic pro kompozity jsou:²⁹

- glycidily bisfenolu A, např. diglycidylether BPA - zkratka DGEBA,
- novolakové pryskyřice,
- třífunkční epoxidy, např. triglycidylethertrifenylmethan (TGETPM) nebo triglycidylaminofenol (TGAP),
- tetrafunkční epoxidy, např. tetraglycidylmethyldianilin (TGMDA).

Na rozdíl od UP a VE vytvrzovaných radikálovou adiční polymerací lze vytvrzování EP provádět několika způsoby, jejichž vhodnost či účelnost je vázána na konečné použití EP a na technologii jejich zpracování. Tvrdidlo totiž může na rozdíl od VE a UP podstatně ovlivnit fyzikálně chemické vlastnosti vytvrzené pryskyřice.⁶

Tvrdidla pro epoxidové pryskyřice jsou:^{29,30,31,32}

- alifatické aminy, např. DTA (diethylentriamin), TETA (triethylentetramin) pro vytvrzování za normálních teplot,
- polyamidy (poměr tvrdidla a pryskyřice se může měnit v širokém rozmezí, při podílu 1:1 je pryskyřice nejhouževnatější),
- cykloalifatické aminy, např. AEP (N-aminoethylpiperazin), DEAPA (diethylaminopropylamin),
- aromatické aminy, např. MPDA (metafenylendiamin), MDA (4,4'-methyldianilin) a jejich eutektické směsi, DDS (4,4'-diaminodifenylsulfon) je tvrdidlo pro vícefunkční epoxidy,
- anhydridy karboxylových kyselin, např. HHPA (anhydrid kyseliny hexahydroftalové), CA (anhydrid kyseliny hexachlorendomethylen-tetrahydroftalové), DDSA (anhydrid kyseliny dodecenylyntarové), MTHPA (anhydrid kyseliny methyltetrahydroftalové),

- lewisovy tvrdidla, především komplex BF₃-MEA (ethylaminbor-trifluorid), který může fungovat též jako urychlovač v kombinaci s jiným tvrdidlem, např. DDS,
- kyanamidy, především DICY (dikyanamid).

Tab.2.2 Technologické parametry a teplotní odolnost epoxidové pryskyřice DGEBA s různými tvrdidly^{29,31}

Tvrdidlo Chem. zkratka	Poměr na 100 dílu EP	Teplota vytvrzování [°C]	Doba vytvrzování [hod.]	Skladovatelnost 25°C [hod.]	Teplota tvarové stálosti [°C]
Alifatické aminy					
DTA	12	25	7 dnů	1/4-1/2	124
TETA	14	25	7 dnů	1/4-1/2	123
Polyamidy	30-50	25	7 dnů	2-3	55
Cykloalifatické aminy					
DEAPA	8	115	0,5	3-4	100
AEP	20	150	1	1/4-1/2	110
Aromatické aminy					
MPDA	14	80/150	2+2	5-6	150
MDA	28	80/150	2+2	5-6	160
Anhydridy					
HHPA+BDMA	78	90/150	3+1	24	132
NMA+BDMA	90	120/150	3+1	60-80	144
DDSA+BDMA	134	90/150	4+1	120	74
CA	117	25/150	Ge1+4	-	197
Lewisova tvrdidla					
BF ₃ -MEA	3	120/200	3+4	>250	174
Kyanamidy DICY	6	175	1	∞	135

2.4 Vlákna

2.4.1 Skleněná vlákna

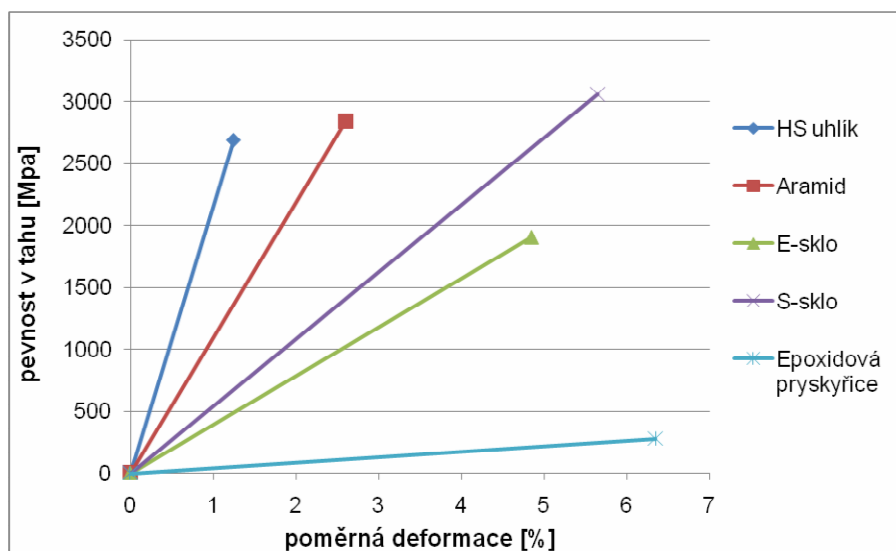
V kompozitech jsou používána vlákna ze skloviny E, S, D, C (kyselinám odolná vlákna), ACR (vlákna odolná alkáliím) a křemenná vlákna, jejichž složení je uvedeno v tabulce 2.3.

Tab.2.3 Složení skloviny vláken (hmotnostní %) ²⁸

Oxid	Sklo E	Sklo S	Sklo C	Sklo ACR	Křemenné sklo
SiO ₂	52-56	65	64-68	64	99,9
Al ₂ O ₃	12-16	25	3-5	1	
CaO	16-25	-	11-15	5	
MgO	0-5	10	2-3		
TiO ₂				3	
ZrO ₂				13	
B ₂ O ₃	5-10	-	4-6		
Na ₂ O, K ₂ O	<0,8	<0,3	až10	14	

Skleněná vlákna mají silikátový základ (SiO₂). Vyrábějí se tažením taveniny směsi oxidů Si (s příměsí oxidů Al, Ca, Mg a B) s velmi malým podílem alkalických kovů Na a K. Potřebného průměru vláken se dosáhne dlužením proudu skla vytékajícího tryskami (průměr trysky 1 mm) ze dna zvlákňovací hlavy. Konečný průměr vlákna je dán rozdílem mezi rychlostí vytékání skloviny a rychlostí odtahování „monovláken“. Monovlákna se po povrchové úpravě (sizing) sdružují do pramene a navíjejí se na cívku.

Skleněná vlákna jsou amorfní a izotropní.^{27,35} Jejich vlastnosti v podélném i příčném směru jsou pokládány za shodné a jsou dány chemickým složením, viz tab. 2.4. Zatímco provozní teplota E-skla je omezena teplotou 460 °C (při teplotě 400 °C je však pevnost v tahu snížena již o 52 %) ³³, u S-skla dochází k poklesu pevnosti v tahu nad teplotou 600 °C ⁶ a má i o 170 °C vyšší teplotu měknutí, viz tab. 2.5. Kromě teploty je pevnost značně závislá i na stavu povrchu. Vzájemné poškozování vláken při sduřování do pramenů a adsorpce vzdušné vlhkosti snižuje pevnost čerstvě vytaženého vlákna až o 50 %.²⁷ Pro ochranu před vzájemným poškozováním je nutno skleněná vlákna chránit povlaky nanášenými ještě před sduřováním vláken do pramene. Tzv. lubrikace (vosky, olej, škrob, želatina a jiná maziva) je používána pro vlákna určená pro textilní zpracování na technické tkaniny. Pro kompozitní díly se vlákna opatřují vazebnými prostředky pro zlepšení adheze polymeru k vláknům. Pro E-skla jsou to organokovové sloučeniny a organosilany (zkráceně silany). Vlákna ze skloviny S, která jsou určena pro dynamicky namáhané kompozity s epoxidovými matricemi, jsou opatřena povlakem speciální epoxidové pryskyřice. Obecně má S-sklo lepší mechanické vlastnosti, menší hustotu, dobrou odolnost v prostředí kyselin a vyšší teplotu použití než E-sklo, avšak také vyšší cenu. Běžná cena se u vláken z E skloviny pohybuje kolem 70kč/kg.²⁸ Všechna skleněná vlákna mají poměrně nízký modul pružnosti ve srovnání s ostatními typy vyztužujících vláken, viz obr. 2.6.



Obr.2.6

Tab.2.4 Vlastnosti skleněných vláken³⁴

	Jednotka	E-sklo	S-sklo	D-sklo	C-sklo
SiO ₂	%	53-55	60	72-75	60-65
Al ₂ O ₃	%	14-15	24	-	<6
B ₂ O ₃	%	6-8	-	<23	<7
CaO	%	17-22	9	-	14
MgO	%	<5	6	-	<3
K ₂ O, Na ₂ O	%	<1	<0,5	<4	8-10
Ostatní oxidy	%	1	-	<1	<1,5
Hustota	g cm ⁻³	2,6	2,53	2,14	2,45
Pevnost v tahu	MPa	3400	4400	2500	3100
Modul pružnosti E	GPa	73	86	55	70
Prodloužení	%	3,5-4	4,5	3	3,5-4
Součinitel délkové roztažnosti	10 ⁻⁶ K ⁻¹	5	4	2-3	7,2

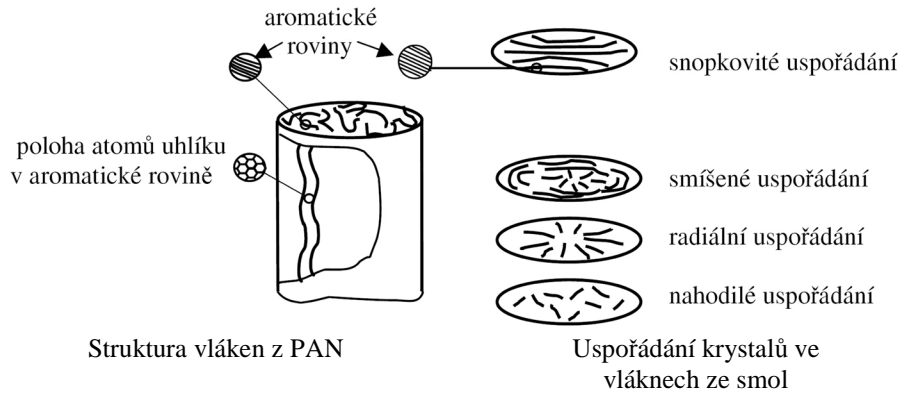
Tab.2.5 Vlastnosti skleněných vláken²⁸

	Jednotka	Sklo E Saint-Gobain	Sklo E z literatury	Sklo S	Sklo C	Sklo ACR	Křemenné sklo
Průměr	μm	5-16	9-13	9-13	9-13		8,9
Hustota	g cm ⁻³	2,54	2,54	2,49	2,49	2,7	2,19
Modul pružnosti E	GPa	73	72,4	85,5	69	75	69
Pevnost v tahu	GPa	2-4	až 3,45	až 4,6	až 3	1,7	3,45
Prodloužení	%	1,8-3,2	4,8	5,7	4,8		5
Součinitel délkové roztažnosti	10 ⁻⁶ K ⁻¹	4,9	5	5,6	7,2		
Tepelná vodivost	W m ⁻¹ K ⁻¹	1	1	1	1		
Teplota měknutí	°C	800	800	970	750		
Relativní permitivita při frekvenci 1 MHz		5,9-6,4		5-5,4			3,78
Zráťový činitel (tanδ) při 10 GHz			0,0039				0,002

2.4.2 Uhlíková vlákna

Mají nejširší spektrum mechanických vlastností při poměrně malé hustotě (1,8-2,0 g cm⁻³). Cena uhlíkových vláken se pohybuje v rozmezí od 12 do 80 \$/kg (závisí na počtu vláken v prameni nebo rovingu).²⁸

Uhlíková vlákna jsou krystalická. Podle technologie výroby se rozlišují dva typy uhlíkových vláken: Pitch-vlákna, na jejichž výrobu se používají jako prekurzoru smoly odpadající při destilaci ropy. Druhým typem jsou PAN vlákna, u kterých se vychází z polyakrylonitrilových vláken jako prekurzoru.^{6,36} Tato vlákna mají lepší mechanické vlastnosti, ale jsou také dražší. Schematické uspořádání aromatických rovin v uhlíkovém vlákně vyrobeném z PAN a ze smol je na obr. 2.7.



Obr.2.7^{27,28,35}

V porovnání se skleněnými vlákny se vyznačují vysokou anizotropií mechanických i fyzikálních vlastností, což je dáno krystalem grafitu. Ve směru kolmém k bazálním rovinám šesterečné mřížky působí jen slabé Van der Waalsovy vazby, kdežto v rovinách bazálních vrstev, v tzv. „aromatických“ rovinách, jsou atomy vázány pevnými kovalentními vazbami.²⁸ Vysoké pevnosti a tuhosti aromatických rovin je využito v uhlíkových vláknech, ve kterých jsou bazální roviny orientovány rovnoběžně s podélnou osou vlákna. Na rozdíl od krystalu grafitu nejsou aromatické roviny ve vláknu pravidelně uspořádány ve sledu ABABA... (jak by odpovídalo hexagonální mřížce), ale jsou vedle sebe uspořádány nahodile, v tzv. turbostratickém uspořádání.^{27,28} To znamená, že je-li např. modul pružnosti ve směru osy vlákna 500 GPa, kolmo na osu je pouze 6 GPa. Součinitel délkové roztažnosti je ve směru osy vlákna záporný ($-1,5 [10^{-6}K^{-1}]$), zatímco ve směru kolmém je kladný a má vysokou hodnotu ($30 [10^{-6}K^{-1}]$).³⁶

Uhlíková vlákna jsou odolná vysokým teplotám, avšak v neoxidujícím prostředí. Pevnost je konstantní až do teploty 2000 °C, modul pružnosti dokonce s teplotou roste. V oxidačním prostředí pevnost vláken rychle klesá již od teplot 500 °C.³⁶

Podle mechanických vlastností se uhlíková vlákna rozlišují na:²⁸

- karbonizovaná vlákna, která mají střední modul pružnosti a dobrou pevnost v tahu. Lze je považovat za standardní uhlíková vlákna (HS - „High Strength“, AS - „Average Strength“, HT nebo HTA - „High Tenacity“),
- vysokomodulová grafitizovaná vlákna (HM - „High Modulus“),
- vlákna vysoce pevná, se středním modulem pružnosti (IM - „Intermediate Modulus“),
- vlákna s vysokým modulem pružnosti (VHM - „Very High Modulus“, UHM - „Ultra High Modulus“);

dále se dělí na:

- dutá uhlíková vlákna,
- diskontinuální vlákna porušená tahem (SBCF - „Stretch-Broken Carbon Fiber“),
- mletá uhlíková vlákna.

Tab.2.6 Vlastnosti uhlíkových vláken z PAN při teplotě 20°C firmy Toray Industries ²⁸

	Jednotka	T300	M40J	T800H	T1000G	M60J	
Průměr	μm	7-8	7	5-6	5	4	
Hustota	g cm ⁻³	1,76	1,77	1,81	1,8	1,92	
Modul pružnosti E	osový	GPa	230	377	294	294	588
	příčný	GPa		40	21		
Pevnost v tahu	GPa	3,53	4,41	5,49	5,3-6,8	4,21	
Prodloužení	%	1,5	1,2	1,9	2,0-2,5	0,7	
Součinitel délkové roztažnosti	osový	10 ⁻⁶ K ⁻¹	-0,7	-0,5			
	příčný	10 ⁻⁶ K ⁻¹	10	7			
Tepelná vodivost	W m ⁻¹ K ⁻¹	11	70	36	33	155	
Obsah uhlíku	%	92-97	99	92-97	96	96	

Tab.2.7 Vlastnosti vysokomodulových uhlíkových vláken Dialed[®] z uhelné mezofátové smoly firmy Mitsubishi Chemical Corporation ²⁸

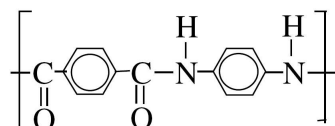
	Jednotka	Průmyslová		Letecká		
		K13710	K13A10	KS352U	K13C2U	
Průměr	μm	10	10	10	10	
Hustota	g cm ⁻³	2,12	2,15	2,05	2,19	
Modul pružnosti E	osový	GPa	640	790	550	900
Pevnost v tahu	GPa	2,6	2,6	3,6	3,8	
Prodloužení	%	0,42	0,36	0,65	0,42	
Součinitel délkové roztažnosti	osový	10 ⁻⁶ K ⁻¹	-0,9	-1,5		
	příčný	10 ⁻⁶ K ⁻¹	10	6		
Tepelná vodivost	W m ⁻¹ K ⁻¹	140	220	130	620	
Obsah uhlíku	%	>99	>99	>99	>99	

Tab.2.8 Vlastnosti uhlíkových vláken ³⁴

	Jednotka	Vysokopevnostní (HS)	Vysokomodulová (HM)
Hustota	g cm ⁻³	1,79	1,8
Pevnost v tahu	MPa	5400	2350
Modul pružnosti E	GPa	290	358
Prodloužení	%	1,7	0,6
Součinitel délkové roztažnosti	10 ⁻⁶ K ⁻¹	-	-0,5
Tepelná vodivost	W m ⁻¹ K ⁻¹	-	710

2.4.3 Aramidová vlákna

Aramidy jsou po stránce chemické struktury aromatické polyamidy. Nejznámějším a komerčně nejúspěšnějším aramidem je poly-p-fenyltereftalamid (PPTA)^{36,28} se strukturním vzorcem:^{27,28}



Vlákna z něho připravená nesou obchodní název Kevlar[®] (firma DuPont). Cenu má zhruba o řád větší než vlákna skleněná (od 40 do 175 \$/kg).²⁸ Hlavní výhodou je malá hustota ($\rho = 1440 \text{ kg m}^{-3}$), velká odolnost proti abrazi a schopnost plasticky se deformovat.

Tab.2.10 Druhy APA od firmy DuPont²⁸

Typ Kevlaru	Vlastnosti	Použití
Kevlar 29	Modul E menší než sklo	Nejvíce používané vlákno (ochranné oděvy, neprůstřelné vesty, lana, náhrada asbestu, kompozity)
Kevlar 49	Větší modul E než skleněné vlákno	Kompozity v leteckém průmyslu
Kevlar 68	Modul E o 10 až 15 % menší než Kevlar 49	Zpevnění optických kabelů
Kevlar 100	Barevný Kevlar	Barevná vlákna
Kevlar 119	O 20 % větší prodloužení než Kevlar 29	Zpevnění elastomerů (klínové řemeny)
Kevlar 129	O 15 až 20 % větší pevnost oproti Kevlaru 29 a o 30 až 35 % větší modul než Kevlar 29	Protibalistické aplikace (neprůstřelné vesty)
Kevlar 149	Největší modul E (146 GPa) ze všech druhů Kevlarů	Kompozity v leteckém průmyslu
Kevlar 159	Největší houževnatost ze všech Kevlarů	Pro vnitřky nákladních letadel
Kevlar KM2		Navržen pro protibalistické aplikace
Kevlar A-200<		Navržen pro neprůstřelné vesty pro policii
Kevlar XLT		Nejnovější vlákno pro neprůstřelné vesty

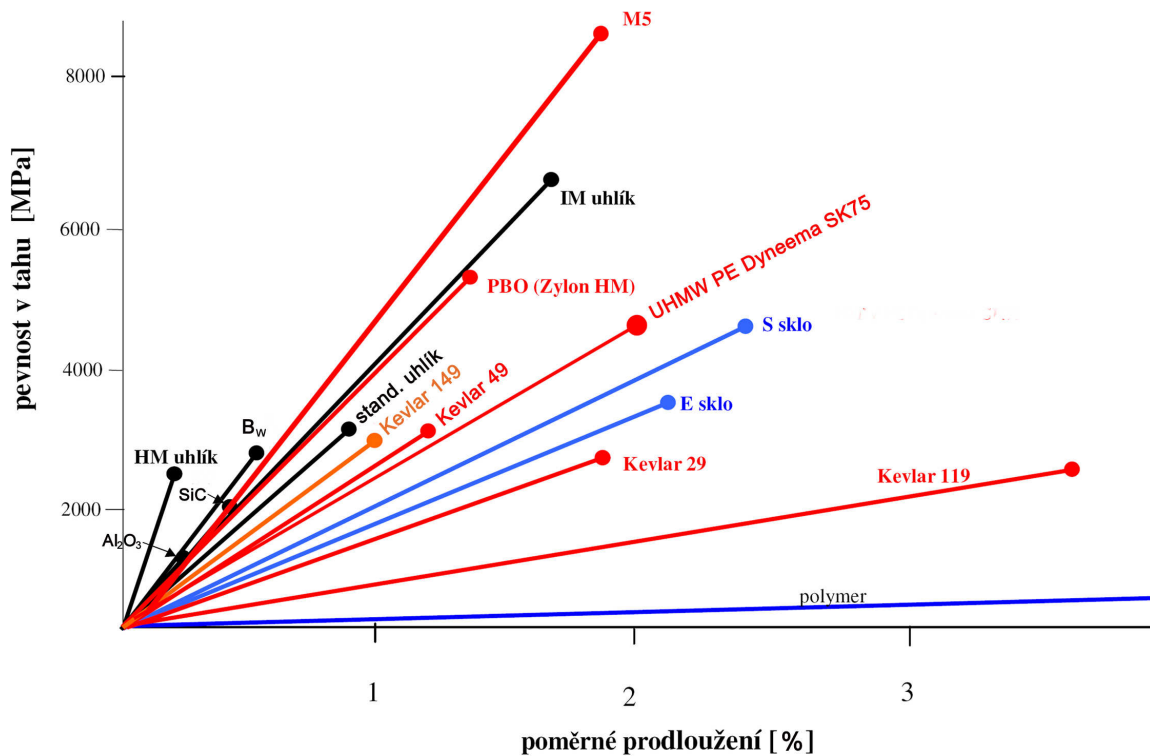
Tab.2.11 Vlastnosti aramidových vláken³⁴

	Jednotka	Kevlar 29	Kevlar 49
Hustota	g cm^{-3}	1,44	1,45
Pevnost v tahu	MPa	2800	2900
Modul pružnosti E	GPa	59	127
Tažnost	%	4	1,9
Součinitel délkové roztažnosti	10^{-6}K^{-1}	-2,3	-4,1
Tepelná vodivost	$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$	7	3,5

Tab.2.12 Srovnání pevnosti, modulu a hustoty vláken³⁴

Materiál	Modul pružnosti E [GPa]	Pevnost v tahu [MPa]	Hustota [g cm^{-3}]
E-sklo	72,4	3500	2,54
S-sklo	85,5	4600	2,49
Uhlík (HM)	390	2100	1,90
Uhlík (HS)	240	2500	1,90
Kevlar 49	130	2800	1,50
Bór	385	2800	2,65
Ocel	210	210-340	7,80
Al-slitiny	70	140-620	2,70

Rozdíly v pevnostech a modulech pružnosti (sklon diagramu σ - ϵ) jednotlivých typu vláken jsou patrné z pracovních diagramů tahové zkoušky, viz obr. 2.8.



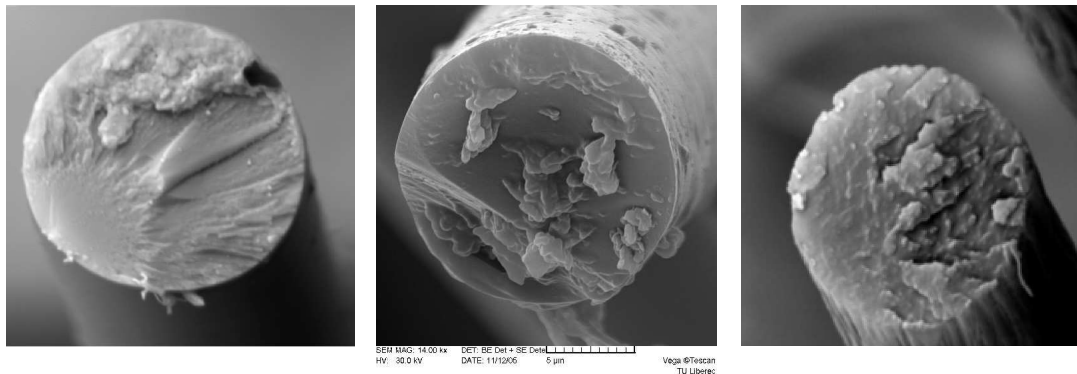
Obr.2.8^{27,28}

Vysvětlivky k obrázku 2.8:

- HM uhlík - uhlíkové vlákno s vysokým modulem pružnosti ($E=400-800$ GPa)
- B_w - bórové vlákno CVD (“Chemical Vapour Deposition”), průměr 100-250 μm ($E=400$ GPa), jádro z wolframu
- Al₂O₃ a SiC - keramická vlákna vyrobená z polymerních prekurzorů ($E=380$ GPa a $E=300$ GPa)
- IM uhlík - „středněmodulové“ (“InterMediate”) uhlíkové vlákno s vysokou pevností ($E=290$ GPa)
- PBO HM - polymerní vlákno poly-para-fenylenebisoxazolu ($E=280$ GPa)
- stand. uhlík - standardní uhlíkové vlákno ($E=230$ GPa)
- M5 - polymerní polydiimidazopyridinylendihydroxyfenylenové (PIPD) vlákno firem Magellan Systems International a Du Pont ($E=400$ GPa)
- Kevlar[®] 29 - polymerní poly-para-fenylentereftalamidové (aramidové) vlákno od firmy Du Pont ($E=80$ GPa)
- Kevlar[®] 49 - polymerní aramidové vlákno od firmy Du Pont ($E=130$ GPa)
- Kevlar[®] 149 - polymerní aramidové vlákno od firmy Du Pont ($E=146$ GPa)
- Kevlar[®] 119 - polymerní aramidové vlákno od firmy Du Pont používané pro zpevnění elastomerů ($E=40$ GPa)
- UHMW PE - polymerní vlákno z PE s velmi vysokou molární hmotností (Dyneema[®] SK75 má $E=115$ GPa)

2.4.4 Mechanismus porušení vláken

Mechanismus porušení se posuzuje z morfologie lomové plochy vláken při prasknutí vlivem tahového namáhání. Pro vlákna skleněná, vlákna keramická a uhlíková je typický křehký lom, obr. 2.9.



a) skleněného

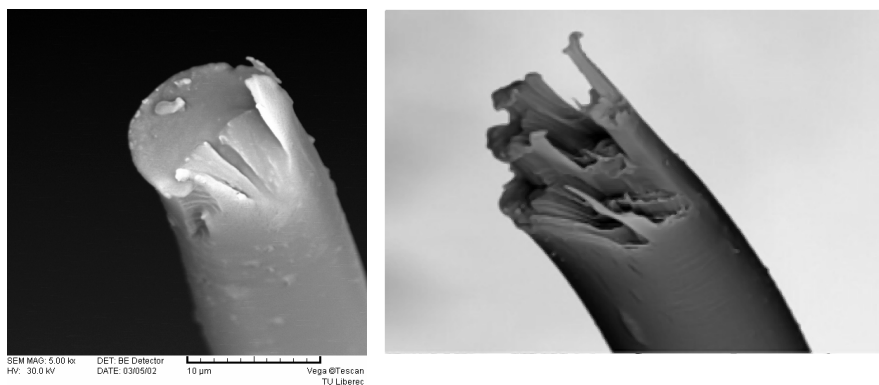
b) keramického

c) uhlíkového

Obr.2.9 Křehký lom vlákna ³⁸

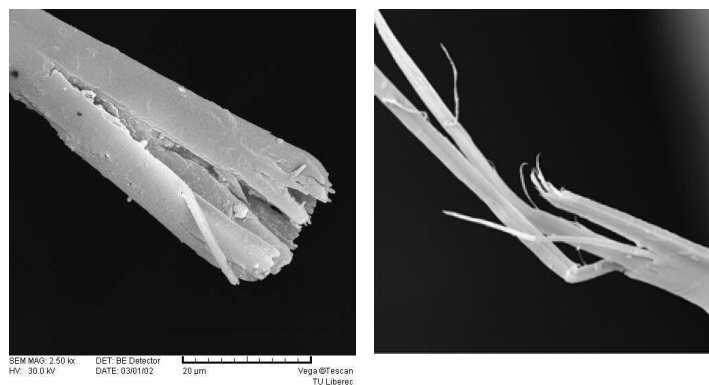
Křehký lom je iniciován trhlinou nebo defektem, kde se koncentruje napětí. To má za následek růst trhliny (zrcadlová část na lomové ploše) a vznik dalších trhlin způsobujících lom vlákna.

U většiny syntetických vláken zvláknovaných z taveniny dochází k houževnatému lomu, obr. 2.10.



Obr.2.10 Houževnatý lom PES vláken ³⁸

Zde je charakteristické pomalé šíření trhliny způsobující typický V zářez na lomové ploše, který je doprovázen plastickým kluzem na druhé straně vlákna od V zářezu, což způsobí jeho porušení. U vysoce pevných vláken typu aromatických polyamidů PBO atd. dochází k typickému axiálnímu štěpení, obr. 2.11.



Kevlar

Nomex

Obr.2.11 Axiální štěpení u vysoce pevných vláken ³⁸

Toto štěpení (délka je zhruba 100 násobek průměru vlákna) je důsledek povrchového porušení, které vede ke vzniku smykového napětí oddělujícího polymerní řetězce (meziřetězcové vazby jsou podstatně slabší). Zajímavé je, že z původního jednoho štěpení se postupně oddělují další fibrily (trhlina se větví). Vlivem tohoto štěpení je průměr vlákna v místě přetržení 2–4 μm , což je zhruba 3–6x méně než průměr výchozího vlákna.

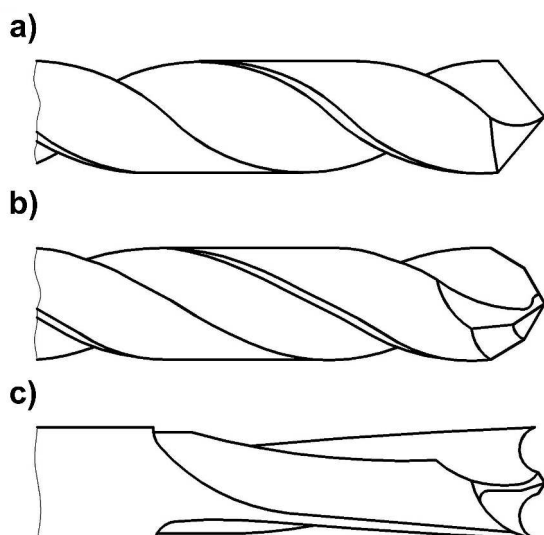
U vláken zvláknovaných z roztoku a vláken mikroporézních (obsahujících síť mikrodotin) je typický granulární lom. Kritické napětí zde způsobí porušení fibrilárního elementu. Trhlina se však šíří nikoliv přímočaře, ale vlivem přenosu napětí praskají postupně vláknenné elementy v jejím okolí. Granulární lom je typický pro taková keramická a uhlíková vlákna, u kterých existují mikropóry nebo síť slabých míst v průřezu vlákna.

Křehký lom způsobuje obyčejné rychlé porušení vláken. Houževnatý lom a axiální štěpení je pomalejší, protože vlákno je schopné absorbovat více energie než dojde k porušení.

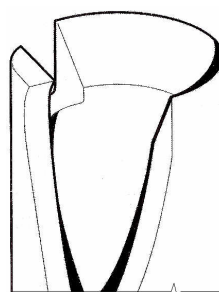
3. Řezné materiály a nástroje pro vrtání kompozitních materiálů

Nejčastěji obráběné kompozitní materiály obsahují vlákna uhlíková, skleněná, borová, nebo aramidová, která jsou vázána polyesterovou, epoxidovou, nebo fenolovou pryskyřicí. Vzájemnou kombinací matrice a vyztužujících vláken lze dosáhnout rozdílných mechanických vlastností, které je nutno zohlednit při volbě řezného nástroje. S výjimkou aramidových vláken je většina vyztužujících vláken velmi abrazivní a tudíž je vyžadován co nejvíce otěruvzdorný nástrojový materiál, který spolu se správnou geometrií sehrává klíčovou roli. Doporučené geometrie vrtáků pro obrábění kompozitních materiálů jsou uvedeny na obrázku 3.1. U klasických šroubovitých vrtáků s běžně ostřenou špičkou (obr. 3.1a) by délka příčného ostří měla být pokud možno co nejmenší. Příčné ostří má negativní vliv na proces řezání, protože v důsledku nízké řezné rychlosti a negativního úhlu čela materiál spíše vytlačuje než řeže. To má za následek silné zvýšení posuvové síly a následnou delaminaci materiálu. Z tohoto důvodu jsou pro obrábění kompozitů v široké míře používány především vrtáky se speciální úpravou ostří (obr. 3.1b, obr. 3.1c), které výrazným způsobem zabraňují tvorbě nežádoucí delaminace.

Konstrukce nástroje pro zpracování kompozitních materiálů s aramidovým vláknem je na obr. 3.2. U aramidových vláken nedochází ke křehkému lomu, jako tomu je u skleněných a uhlíkových vláken.⁵ Jejich houževnatost je až 4krát vyšší v porovnání s uhlíkovými vlákny, proto se lehce poddají tlaku nástroje (mají tendenci se ohýbat přes břit). Phi-vrták (obr. 3.2), který prokazuje vysokou výkonnost a jakost obrobené plochy, vlákna nejprve předepne a poté čistě oddělí a odstraní z místa řezu.^{7,18}



Obr.3.1



Obr.3.2⁷

3.1 Rychlořezná ocel

Pro obrábění kompozitních materiálů lze sice použít nástroje z rychlořezných ocelí, při jejich použití je však nutné očekávat nižší hodnoty trvanlivosti a s ní spojenou častou výměnu a přeastřování nástroje a to především z následujících důvodů:

- Rychlořezné oceli jsou ve srovnání s jinými řeznými materiály charakteristické nižšími hodnotami tvrdosti a mají tudíž i menší schopnost odolávat abrazivnímu působení vyztužujících vláken. Intenzita opotřebení je poměrně vysoká i při aplikaci povrchových otěruvzdorných povlaků.
- Většina kompozitních materiálů má velmi nízkou tepelnou vodivost (výjimku tvoří kompozity s kovovou maticí), proto vzniklé teplo musí být ze zóny řezu v maximální míře odvedeno nástrojem, případně procesní kapalinou (pokud vůbec může být použita). Tepelná vodivost rychlořezných ocelí je však relativně nízká, 3 - 4krát nižší než u slinutých karbidů a vysoké teploty v oblasti ostří nástroje způsobují špatnou trvanlivost břitu. Odhadovaný podíl jednotlivých zdrojů odvodu tepla je uveden v tabulce 3.1.

Tab.3.1 Odvod tepla [%] při obrábění kompozitních materiálů ve srovnání s ocelí⁴

Odvod tepla	Ocel	Termoplast	Reaktoplast	CFRP	GFRP
Třískou	75	50 - 57	2 - 3	5 - 8	8 - 10
Obrobkem	20 - 22	15 - 20	5 - 8	5 - 10	10 - 15
Nástrojem	3 - 5	20 - 25	80 - 90	70 - 80	
Prostředím	3 - 5 (suché obrábění)				
<i>CFRP - kompozity vyztužené uhlíkovými vlákny, GFRP - kompozity vyztužené skleněnými vlákny</i>					

Doporučené hodnoty nástrojových úhlů vrtáků z rychlořezných ocelí pro obrábění kompozitních materiálů jsou uvedeny v tabulce 3.2.

Tab.3.2 Doporučené nástrojové úhly vrtáků pro obrábění kompozitů ⁴

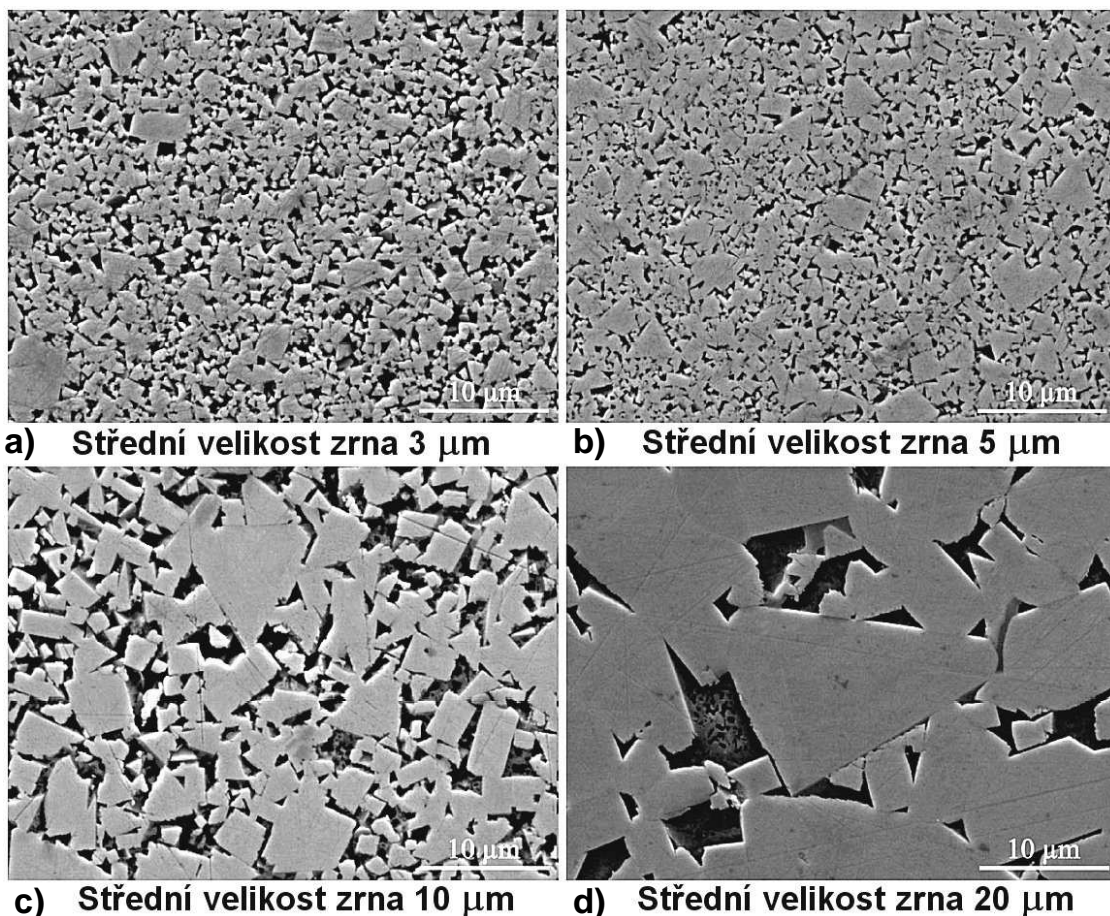
Obráběný materiál	Materiál vrtáku	Geometrie vrtáku		
		κ_r	γ_o	α_o
Plasty vyztužené skleněnými vlákny	HSS	50°	15°	20°
	SK	50°	10°	20°
Plasty vyztužené uhlíkovými vlákny	HSS	45°-50°	10°-15°	15°-20°
	SK	45°-50°	10°	15°-20°

HSS - rychlořezná ocel, SK - slinutý karbid

3.2 Slinuté karbidy

Nástroje ze slinutých karbidů dosahují lepších výsledků v porovnání s nástroji z rychlořezných ocelí. Mechanické vlastnosti slinutých karbidů závisí zejména na obsahu pojiva (nejčastěji Co) a velikosti zrna karbidické fáze (obr. 3.3). Tvrdost se zvyšuje s vyšším podílem a jemnějším zrnem karbidické fáze, naopak velká zrna a větší podíl pojiva zvyšují houževnatost slinutého karbidu. Proto pro účely obrábění kompozitních materiálů vyztužených abrazivními vlákny (uhlíková, skleněná) jsou vhodné především jemnozrné slinuté karbidy (obr. 3.3a), které mají vyšší hodnoty tvrdosti, takže lépe odolávají opotřebení. Pro zvýšení trvanlivosti jsou tyto nástroje navíc pokryty různými druhy povlaků na bázi karbidů, nitridů, oxidů nebo diamantu. Nižší hodnoty houževnatosti nástroje je pak nutné zohlednit při procesu obrábění, zejména pokud dochází k dynamickému zatížení břitu.

Doporučené hodnoty nástrojových úhlů vrtáků ze slinutých karbidů pro obrábění kompozitních materiálů jsou uvedeny v tabulce 3.2.



Obr.3.3 ²¹

3.3 Polykrystalický diamant (PKD)

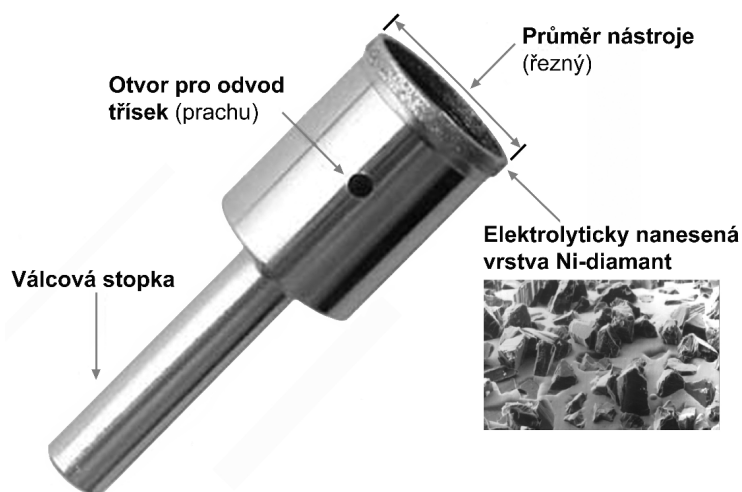
Nejlepších výsledků při obrábění kompozitních materiálů dosahují nástroje osazené řeznými prvky z polykrystalického diamantu (tzv. připájené roubíky), nebo opatřené diamantovými povlaky. Především vysoká tvrdost diamantu, která umožňuje odolávat vysokému abrazivnímu účinku vyztužujících vláken a vynikající tepelná vodivost, která zaručuje rychlý odvod tepla z oblasti řezu jsou předpokladem pro vysokou kvalitu obrobeného povrchu a dlouhou trvanlivost nástroje. Trvanlivost je mnohonásobně vyšší (až stonásobně) než u nástrojů ze slinutých karbidů. Ostrý břit, který vydrží po dlouhou dobu obrábění poskytuje chladnější řez a snižuje tvorbu delaminace, protože při nadměrném opotřebením břitu se vlákna spíše odlamují, místo aby byla běžně řezána. Vhodnou aplikací nástrojů z PKD při obrábění kompozitních materiálů dochází ke zvýšení řezných podmínek (zejména řezné rychlosti) a následně produktivity o 50 až 100%.⁷

Jak připájené roubíky tak diamantové povlaky jsou většinou aplikovány na podkladový slinutý karbid, který jim zaručuje pevnost a odolnost proti tepelným a mechanickým šokům.

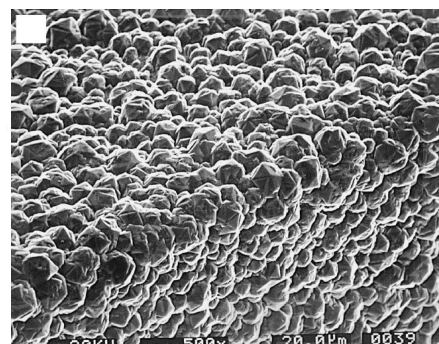
K hlavním výhodám povlakovaných nástrojů patří nižší výrobní cena, v případě vyměnitelných břitových destiček větší počet využitelných břitů a větší variabilita tvaru (např. utvařeč). Diamantový povlak se usazuje z plynné fáze (nejčastěji CH_4) metodou CVD nebo plazmaticky aktivovanými metodami PACVD či MWPCVD.¹⁵ Ukázka struktury diamantového povlaku na slinutém karbidu WC + 6% Co (leptáno Murakami + ultrazvuk a diamantová pasta) je na obrázku 3.5. Dalším možným způsobem povlakování je elektrolytické nanesení vrstvy Ni-Diamant.¹⁴ Narozdíl od metod CVD však tento povlak není aplikován na nástroje s řezným, ale broušicím účinkem. Základním kovem matrice je nikl a disperzní částí je diamant. Diamant je zakotven v matrici většinou z 50 % svého objemu. Povlaky jsou ve většině případů jednovrstvé a základním materiálem nástroje je ocel.

Technologie výroby povlaku Ni-Diamant umožňuje tento povlak nanášet na různé geometrické tvary nástroje. Nástroje s tímto povlakem jsou vhodné tam, kde obráběný (broušený) materiál má abrazivní účinky a kde jsou žádoucí vyšší koncentrace diamantu. Nástroje s povlakem Ni-Diamant mají velmi dobré broušící vlastnosti a vysoký řezný výkon.

Velikost diamantového zrna se pohybuje od 30 do 700 μm .¹⁴ Efektivnost práce diamantových nástrojů závisí jednak na správné volbě druhu diamantu a jeho zrnitosti, jednak na správné výšce zakotvení diamantových zrn. Nesprávná volba některého z uvedených parametrů může způsobit, že diamantový nástroj může mít několikanásobně vyšší opotřebením a v některých případech nemá funkční schopnosti pro danou operaci.



Obr.3.4²³



Obr.3.5¹⁹

Kromě výše uvedených specifík kompozitních materiálů, je při volbě řezného nástroje a při navrhování řezných podmínek třeba zohlednit další zvláštnosti těchto materiálů:

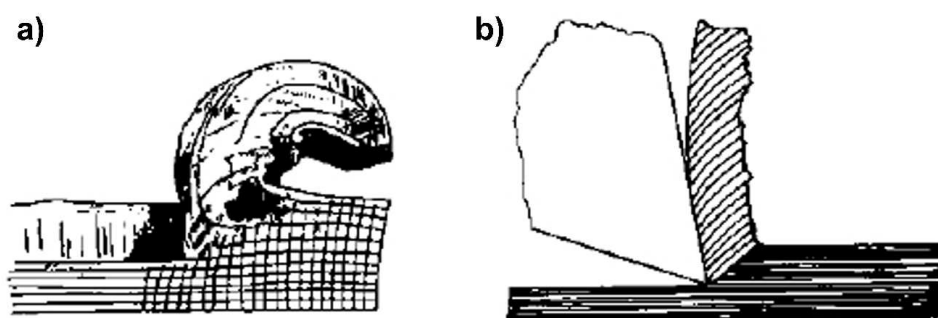
- Vzhledem k různé směrové orientaci vyztužujících vláken vykazují mechanické vlastnosti kompozitů silnou anizotropii (výrazně se liší ve směru podél vláken a napříč vláken). Vysoké hodnoty tahové pevnosti zvyšují intenzitu opotřebení řezného nástroje.
- Kompozity mají nízkou tepelnou odolnost, při vyšších teplotách (100 - 300 °C) nejsou stálé. Proto je třeba volit takové řezné podmínky, aby nebyla překročena tzv. kritická teplota, kdy dochází k degradaci pryskyřičné matrice a na obroběném povrchu se začínou objevovat spálené oblasti.
- Několikanásobná tepelná roztažnost proti kovovým materiálům (hodnota tepelné roztažnosti kompozitů klesá s rostoucím obsahem skleněných vláken) způsobuje poměrně velkou změnu rozměrů vyráběné součásti během vlastního procesu obrábění nebo i po jeho skončení. Tuto skutečnost je třeba vzít v úvahu při výrobě i měření přesněji lícovaných součástí.
- Proces tvoření třísky v daleko větší míře ovlivňuje integritu obroběné plochy (při nevhodných řezných podmínkách může dojít k popraskání obroběné plochy, nebo z povrchu obrobku vystupují chuchvalce vláken a pryskyřice; při soustružení a vrtání se na nástroj namotávají pramence nedělené třísky). V důsledku mechanického a tepelného namáhání může v oblasti řezu docházet ke vzniku trhlin a delaminaci obráběného materiálu.
- Při obrábění vyztužených kompozitů se tvoří drobné částičky třísky (zejména z vyztužujících vláken), které se ve formě prachu šíří z místa řezu do okolí. To vyžaduje aplikovat výkonná odsávací zařízení, aby nebyly překročeny zdravotní a hygienické limity pracovního prostředí.
- Vzhledem k nasákavosti kompozitů nelze při jejich obrábění většinou aplikovat obvyklé procesní kapaliny (někdy lze použít čistou vodu s inhibitorem koroze, olejové emulze jsou doporučovány pouze výjimečně). Nevhodná kapalina může do značné míry snížit pevnost obráběného materiálu.
- Hodnoty koeficientu tření mezi obráběným kompozitním materiálem a hřbetem nástroje nebo třískou a čelem nástroje (0,15 - 0,30) jsou pro všechny nejužívanější nástrojové

materiály (rychlořezné oceli, SK, řeznou keramiku, diamant) nižší než při obrábění kovových materiálů.

- Hodnoty měrných řezných sil jsou mnohem nižší, než při obrábění kovů - tím se snižují řezné síly a potřebný příkon obráběcího stroje.

4. Fyzikální podstata procesu řezání kompozitních materiálů

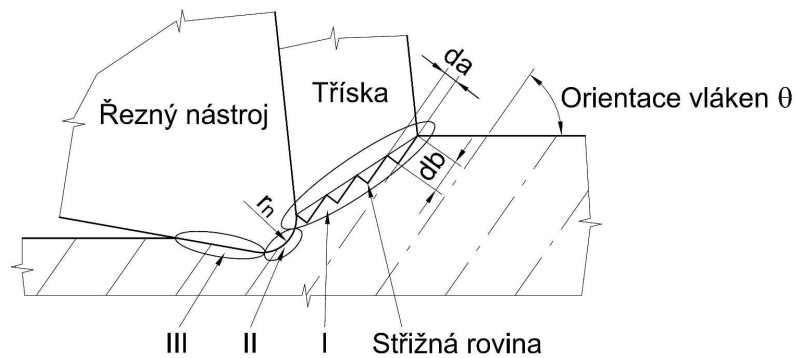
Počátky studia vzniku třísky u kovových materiálů sahají do poslední čtvrtiny 19. století, kdy byla potvrzena existence střížné roviny, úhlu ϕ (Tresca, 1878; Mallock, 1881-82) a výskyt nárustku (Hausner 1892). Empirické poznatky byly dále doplňované geometrickými vztahy úhlu ϕ (např. Piispanen, 1937), které umožňují stanovit deformace, rychlosti odchodu třísky a pěchování třísky. Systematické bádání vzniku a utváření třísky je datované od čtyřicátých let 20. století (Ernst a Merchant – princip minimální energie při řezání) a dosažené výsledky v současnosti představují široký rozsah poznatků, experimentálních údajů a verifikačních postupů, tvořících základ moderní teorie řezání kovů. Tyto poznatky v oblasti kompozitních materiálů však doposud citelně chybějí.



Obr.4.1 Rané výzkumy vzniku třísky a) Tresca (1878), b) Mallock (1881-82) ²⁰

V současnosti je na trhu dostupné relativně široké spektrum kompozitních materiálů lišících se pojivem (matricí), typem a charakterem výztuží (typ vláken, tkaniny, rohože, rouna) a mnohdy i způsobem výroby (laminace, tažení, navíjení, odstředivé lití, RTM, atd.). Kombinací těchto jednotlivých aspektů lze získat nepřeberné množství materiálů o naprosto odlišných mechanických a fyzikálních vlastnostech. Protože mechanismus vzniku třísky je vedle řezné rychlosti, geometrie nástroje a řezného prostředí, závislý hlavně na fyzikálních vlastnostech obráběného materiálu, vyžaduje si každá skupina kompozitních materiálů individuální posouzení.

Většina kompozitních dílců, které přicházejí v úvahu pro obrábění, jsou vyztužené skleněnými, nebo uhlíkovými vlákny (v různé formě, orientaci i obsahu), která jsou vázána polyesterovou, nebo epoxidovou pryskyřicí. Jestliže jsou vyztužující vlákna orientována jednosměrně, lze mechanismus vzniku třísky schematicky znázornit modelem na obr. 4.2 podle práce L. Zhang et al.⁹

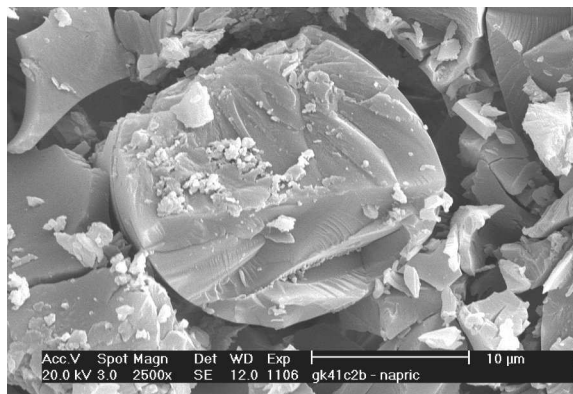


Obr.4.2 Deformační oblasti ⁹

Oblast I – V této oblasti dochází k vlastnímu oddělení třísky od materiálu. Střížná rovina má tvar tzv. cik-cak křivky, protože iniciační trhlinky vznikající při zatížení vláken břitem nástroje se šíří kolmo na osy vyztužujících vláken a naopak následná delaminace vazby matrice – vlákna ve směru os vyztužujících vláken.

Oblast II – V důsledku negativního úhlu čela a tím i řezu nevzniká povrch obrobené plochy řezáním, ale především tvářením, čímž jsou jak vlákna tak matrice zatlačována pod břit nástroje.

Oblast III – Vlivem pružných deformací se po odlehčení nástroje část povrchové vrstvy vrací nazpět, což zvyšuje tření mezi nástrojem a již obrobenou plochou.



Obr.4.3 Křehký lom skleněného vlákna (polyesterová matrice)

Pro stanovení rozložení a velikosti sil působících na čele nástroje a v maximální rovině deformace obráběného materiálu, je model uvedený na obr. 4.2 dále zjednodušen. Střížná rovina je nahrazena jedinou teoretickou střížnou rovinou, viz obr. 4.4. Na základě této skutečnosti je možno uvažovat, že teoretická rovina stříhu AB je tvořena rovinou AC (Σ všech elementů **da**), ve které v důsledku smykového namáhání dochází k porušení vyztužujících vláken křehkým lomem (obr. 4.3) a dále BC (Σ všech elementů **db**), ve které dochází k porušení vazby matrice – vlákna a následnému skluzu.

$$l_{AC} = \frac{h'_D}{\frac{\tau_1 \cdot \sin \theta}{\tau_2 \cdot \tan(\theta - \phi)} - \cos \theta}, \quad (4.5)$$

Tangenciální sílu v rovině stříhu, lze po sloučení výše uvedených rovnic (4.1), (4.2) a (4.5) vyjádřit vztahem

$$F_{sh} = \frac{\tau_1 \cdot b \cdot h'_D}{\frac{\tau_1}{\tau_2} \cdot \cos(\theta - \phi) \cdot \sin \theta - \sin(\theta - \phi) \cdot \cos \theta}, \quad (4.6)$$

a normálovou sílu v rovině stříhu je možno psát ve tvaru

$$F_{shN} = F_{sh} \cdot \tan(\phi + \varphi_t - \gamma_o), \quad (4.7)$$

kde φ_t je třecí úhel mezi odcházející třískou a čelem nástroje. Ze silových poměrů uvedených na obrázku 4.4 dále vyplývá

$$\begin{pmatrix} F_Z \\ F_Y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sin \phi & \cos \phi \\ \cos \phi & -\sin \phi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} F_{shN} \\ F_{sh} \end{pmatrix}, \quad (4.8)$$

kde F_Y je vertikální síla a F_Z (F_c) je horizontální (řezná) síla. Dosazením rovnic (4.6) a (4.7) do rovnice (4.8) lze tyto síly vyjádřit následovně

$$F_Z = \tau_1 \cdot b \cdot h'_D \cdot \frac{\sin \phi \cdot \tan(\phi + \varphi_t - \gamma_o) + \cos \phi}{\frac{\tau_1}{\tau_2} \cdot \cos(\theta - \phi) \cdot \sin \theta - \sin(\theta - \phi) \cdot \cos \theta},$$

$$F_Y = \tau_1 \cdot b \cdot h'_D \cdot \frac{\cos \phi \cdot \tan(\phi + \varphi_t - \gamma_o) - \sin \phi}{\frac{\tau_1}{\tau_2} \cdot \cos(\theta - \phi) \cdot \sin \theta - \sin(\theta - \phi) \cdot \cos \theta}. \quad (4.9)$$

K výpočtu sil F_Y a F_Z (4.9) je nutno znát velikost úhlu střížné roviny ϕ . Na základě ortogonálního modelu obrábění a uvedených geometrických poměrů na obr. 4.5 platí, že

$$\Lambda = \frac{\Delta l}{\Delta l_c} = \frac{\sin(\phi + \delta_o)}{\sin \phi} = \frac{\sin \phi \cdot \cos \delta_o + \cos \phi \cdot \sin \delta_o}{\sin \phi}. \quad (4.10)$$

Po dosazení za $\delta_o = 90^\circ - \gamma_o$ a další úpravě je

$$\tan \phi = \frac{\cos \gamma_o}{\Lambda - \sin \gamma_o}, \quad (4.11)$$

kde Λ je součinitel přechování třísky stanovený na základě poměru tloušťky odebrané třísky h_{Dc} a jmenovité tloušťky řezu h_D podle vztahu

$$\Lambda = \frac{h_{Dc}}{h_D}. \quad (4.12)$$

V anglické literatuře je možné se setkat se symbolem poměrného součinitele přechování třísky, který je jeho recipročním výrazem

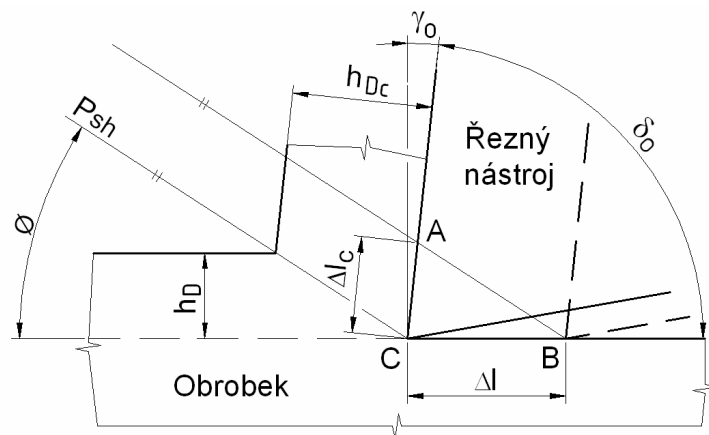
$$r_c = \frac{h_D}{h_{Dc}} = \frac{1}{\Lambda}. \quad (4.13)$$

Uvedený vztah pro výpočet úhlu střížné roviny (4.11), lze poté přepsat do tvaru

$$\tan \phi = \frac{r_c \cdot \cos \gamma_o}{1 - r_c \cdot \sin \gamma_o}, \quad (4.14)$$

kde γ_o je úhel čela nástroje. Protože se tyto materiály při obrábění chovají jako typicky křehké, dá se očekávat, že $r_c = 1$ a tudíž

$$\phi \approx \tan^{-1} \left(\frac{\cos \gamma_o}{1 - \sin \gamma_o} \right). \quad (4.15)$$



Obr.4.5 Model pro odvození úhlu střížné roviny

5. Specifikace obráběných materiálů

Experimentální zkoušky zaměřené na sledování a vyhodnocení složek řezné síly, opotřebení nástroje a delaminace byly provedeny na následujících materiálech:

- **Pultruzně vyrobený kompozitní profil** (dále jen sklo/polyesterový kompozit)

Matrice: Polyesterová pryskyřice

Výztuž: Skleněná vlákna – E sklo, obsah 70%

Orientace vláken: jednosměrná

Tloušťka: 9,5 mm

Výrobce: PREFA, a.s., Brno.

- **Laminát vyrobený z prepregu** (dále jen uhlíkovo/epoxidový laminát)

Matrice: Epoxidová pryskyřice FT105

Výztuž: Uhlíková vlákna

Orientace vláken: jednosměrná

Tloušťka: 6 mm (tloušťka jedné vrstvy 0,15 mm → počet vrstev 40)

Výrobce prepregu: Havel Composites CZ s.r.o

Výroba laminátu: Letecký Ústav FSI, VUT Brno, viz obr. 5.1a – 5.1b.



Obr.5.1

Mechanické vlastnosti obráběných materiálů jsou uvedeny v tab. 5.1 a 5.2, další informace v příloze 4 a 5.

5.1 Mechanické vlastnosti

Tab.5.1 Sklo/polyesterový kompozit

Materiál	Pevnost v podélném směru [MPa]			Pevnost v příčném směru [MPa]			Střih [MPa]
	Tah	Tlak	Ohyb	Tah	Tlak	Ohyb	
sklo/polyesterový kompozit	280 - 690	340 - 450	420 - 690	59 - 95	150 - 170	190 - 220	21

Tab.5.2 Uhlíkovo/epoxidový laminát

Materiál	Pevnost v podélném směru		E-modul v podélném směru		Protažení [%]	Hustota [g cm ⁻³]
	Tah [MPa]	Ohyb [MPa]	Tah [MPa]	Ohyb [MPa]		
	DIN53455	DIN53452	DIN53457	DIN53457	DIN53455	DIN53479
uhlíkovo/epoxidový laminát	75,1	125,8	3568	3559	2,7	1,22

Pozn. Hodnoty jsou přejaty z technického listu dodavatele pro nevytvrzený prepreg.
E - Modul pružnosti v podélném směru pro vyrobený (vytvrzený) laminát je 40,8 [GPa]

5.2 Měření lomové houževnatosti G_{IC}

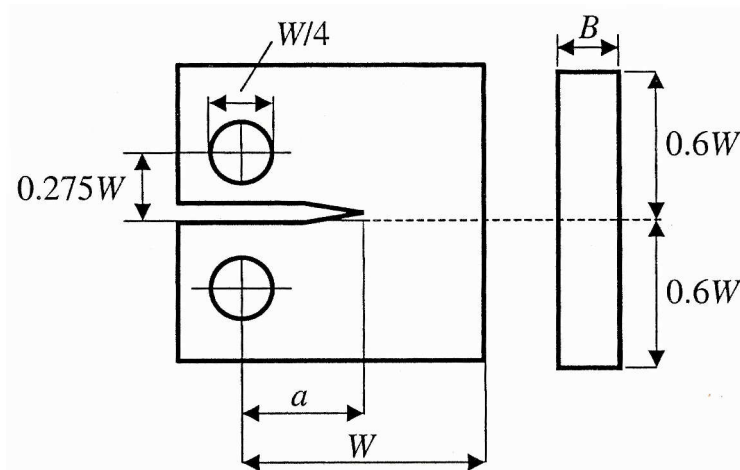
- **Podmínky zkoušky**

Měření CT (compact tension) těles bylo provedeno na univerzálním zkušebním stroji ZWICK Z020 při rychlosti zatěžování $1 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ a teplotě $T=23 \text{ }^\circ\text{C}$. Síla byla detekována pomocí 20 kN dynamometrické hlavy. Prodloužení bylo zjišťováno z polohy příčnicku. Průběh měření je zachycen na obr. 5.3a-5.3b.

Vztah pro výpočet lomové houževnatosti G_{IC} byl převzat z literatury³⁹ a je

$$G = \frac{\eta_e * U}{B * (W - a)}, \quad (5.1)$$

kde U je energie zjištěná z plochy pod tahovým diagramem, B je tloušťka vzorku, W je rozměr vzorku ve směru trhliny, a je délka vrubu a η_e je energetický faktor určený z přílohy číslo 3.



Obr.5.2³⁹

Rozměry CT těles byly voleny podle poměrů stanovených normou ASTM E399, viz obr. 5.2, a tedy pro:

Materiál CT tělesa	B	W	W/4	0,275W	0,6W	a
Sklo/polyester	10	20	5	5,5	12	10
uhlík/epoxid	6	12	3	3,5*	7,5*	6

* hodnoty byly zaokrouhleny

Skutečné rozměry CT těles a výsledky zkoušky, tzn. hodnoty lomové houževnatosti G_{IC} jsou pro oba kompozity uvedeny v tabulce 5.3. Snímky vzorků ve stavu před zkouškou jsou na obr. 5.3c a 5.3d.

Tab.5.3 Naměřené hodnoty lomové houževnatosti G_{IC}

Mat.	CT těleso	B	W-a	W	a	U	a/W	η_e	G_{IC}
		[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[Nmm]	[-]	[-]	[kJ/m ²]
Sklo/polyester	1	9,73	10,96	20,44	9,48	413,23	0,46	2,614	10,13
	2	9,71	11,10	20,64	9,54	408,95	0,46	2,614	9,92
	3	9,91	11,15	20,62	9,47	339,62	0,46	2,614	8,04
	4	9,78	10,85	20,65	9,80	345,99	0,48	2,562	8,35
	\bar{x}								9,11
	s								0,93
Uhlík/epoxid	1	6,49	7,78	12,10	4,32	-※	0,39	2,866	0,330
	2	6,58	7,85	11,95	4,10	-※	0,37	2,958	0,215
	3	6,56	8,01	12,06	4,05	-※	0,37	2,958	0,295
	4	6,53	7,95	12,15	4,20	-※	0,38	2,912	0,220
	\bar{x}								0,265
	s								0,049

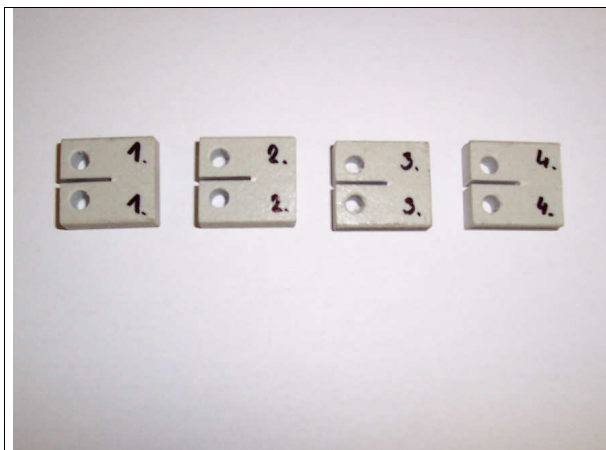
Měření bylo provedeno ve spolupráci s Ústavem materiálového inženýrství FSI, VUT Brno
 ※ hodnoty nebyly dodány



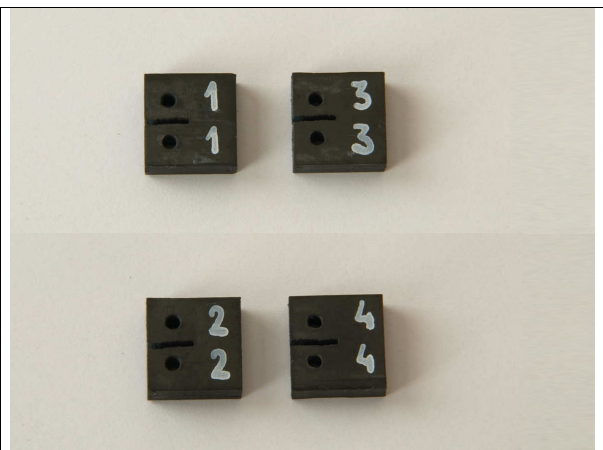
a) měření lomové houževnatosti na ÚMI FSI Brno



b) zkušební stroj ZWICK Z020



c) zkušební CT tělesa - sklo/polyester

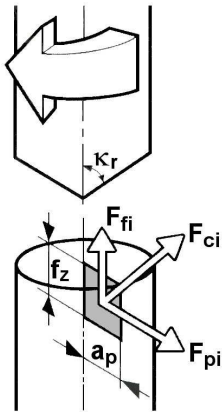


d) zkušební CT tělesa - uhlík/epoxid

Obr.5.3

6. Rozbor řezných sil při vrtání

Řezné síly vznikající při vrtání standardním šroubovitým nebo kopinatým vrtákem působí v tangenciálním, radiálním a axiálním směru. Velikost těchto sil závisí na materiálu obrobku, šířce záběru ostří, posuvu na otáčku a geometrii břitu nástroje. Protože je materiál oddělován současně dvěma břity nástroje, symetricky postavenými vůči jeho ose, jsou výsledné síly tvořeny součtem nebo rozdílem hodnot na obou břitech.



F_{ci} – řezná síla na jeden břit
 F_{fi} – posuvová síla na jeden břit
 F_{pi} – pasivní síla na jeden břit
 $F_p = F_{p1} - F_{p2} = 0$
 a_p – šířka záběru ostří
 f_z – posuv na břit
 κ_r – úhel nastavení hlavního ostří

Obr.6.1 ⁷

Podobně, jako u soustružení, lze i při vrtání stanovit jednotlivé síly pro celý nástroj pomocí empirických vztahů ve tvaru:

$$F_c = C_{Fc} \cdot D^{x_{Fc}} \cdot f^{y_{Fc}}, \quad (6.1)$$

$$F_f = C_{Ff} \cdot D^{x_{Ff}} \cdot f^{y_{Ff}}. \quad (6.2)$$

C_{Fc} , C_{Ff} [-] jsou konstanty zahrnující především vliv obráběného materiálu,

x_{Fc} , x_{Ff} [-] exponenty vyjadřující vliv průměru vrtáku,

y_{Fc} , y_{Ff} [-] exponenty vyjadřující vliv posuvu na otáčku,

D [mm] průměr vrtáku,

f [mm] posuv na otáčku.

Při známé velikosti měrné řezné síly k_c a průřezu třísky A_D je možné jednotlivé síly taktéž vypočítat následovně:

$$F_c = k_c \cdot A_D = k_c \cdot a_p \cdot f, \quad (6.3)$$

$$F_f = 0,5 \cdot k_c \cdot a_p \cdot f \cdot \sin \kappa_r. \quad (6.4)$$

A_D [mm²] je jmenovitý průřez třísky,

a_p [mm] šířka záběru ostří,

f [mm] posuv na otáčku,

κ_r [°] úhel nastavení hlavního ostří.

Ve vztahu pro výpočet posuvové síly je zahrnut úhel nastavení hlavního ostří (κ_r), protože se zvětšujícím úhlem nastavení hlavního ostří roste i velikost posuvové síly.

Kroutící moment M_c vznikající při vrtání je dán součtem momentů od každého břitu vrtáku a platí pro něj vztah

$$M_c = F_c \cdot r_A, \quad (6.5)$$

kde r_A je poloměr středového bodu teoretického čela (viz obrázek 6.2), který lze dále vyjádřit jako

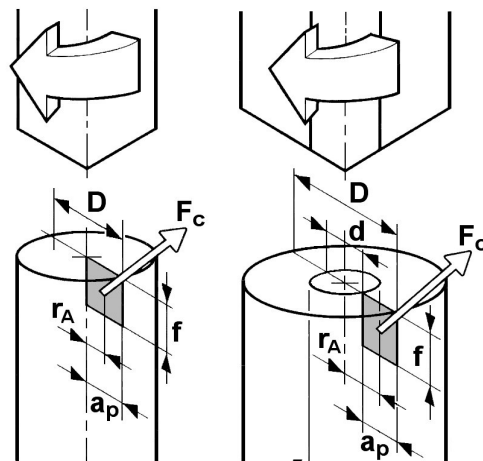
$$r_A = \frac{d}{2} + \frac{a_p}{2} = \frac{D+d}{4}. \quad (6.6)$$

D [mm] je průměr vrtáku,
 d [mm] průměr předvrtané díry.

Kroutící moment lze taktéž stanovit na základě následujícího empirického vztahu,

$$M_c = C_M \cdot D^{x_M} \cdot f^{y_{F_c}}, \quad (6.7)$$

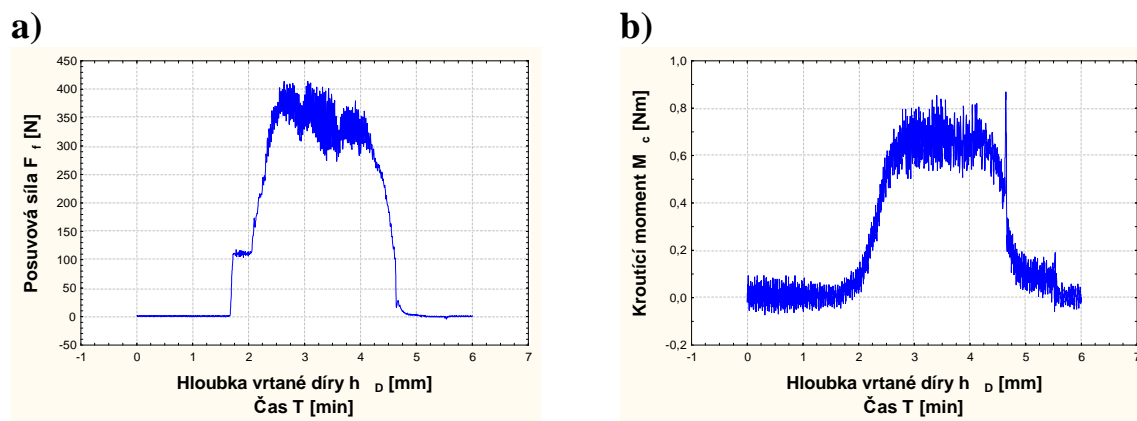
ve kterém obdobně jako při výpočtu řezných sil konstanta C_M zahrnuje vliv obráběného materiálu, exponent x_M vyjadřuje vliv průměru vrtáku a exponent y_{F_c} vliv posuvu na otáčku.



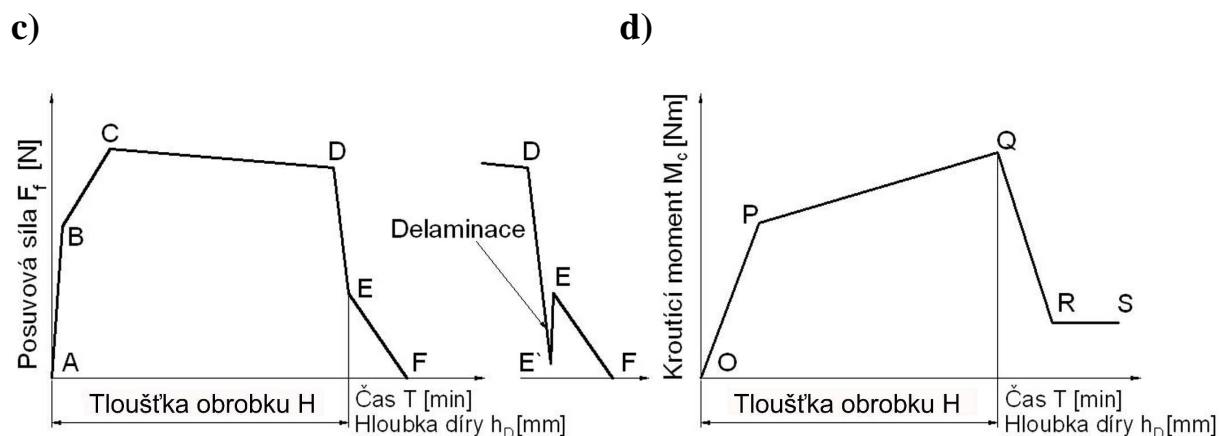
Obr.6.2⁷

6.1 Časový průběh posuvové síly a kroutícího momentu

Typické průběhy posuvové síly (F_f) a kroutícího momentu (M_c) vynesené v závislosti na čase, respektive hloubce vrtané díry, jsou znázorněny na obrázku 6.3(a,b). Obráběným materiálem byl jednosměrně vyztužený sklo/polyesterový kompozit (rozměry 75x100 mm, tloušťka 9,5 mm). Vrtány byly díry o průměru 9 mm, řezná rychlost $v_c=31,7 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$, posuv na otáčku $f=0,20 \text{ mm}$. Úhel hřbetu použitého HSS vrtáku $\alpha_f=13^\circ$, úhel nastavení hlavního ostří $\kappa_r=59^\circ$, délka příčného ostří 1,95 mm. Jako snímač byl použit piezoelektrický dynamometr KISTLER 9272, propojený přes přepínač kanálů a nábojové zesilovače KISTLER 5011 s osobním počítačem vybaveným univerzální měřicí kartou. Vzhledem k tomu, že použitá měřicí aparatura je schopna zaznamenat a vyhodnotit velmi rychlé časové změny síly i momentu, je patrné, že v průběhu každé otáčky vrtáku se měřené hodnoty (F_f i M_c) mění podle toho, zda je obráběný materiál odřezáván podélně, nebo napříč vyztužujících vláken (sinusový charakter) obr. 6.4. Pro zjednodušení lze průběhy posuvové síly a kroutícího momentu nahradit přímkovými úseky, viz obr. 6.3(c, d).



Obr.6.3a, b Typické průběhy posuvové síly a kroutícího momentu



Obr.6.3c, d Zjednodušené průběhy posuvové síly a kroutícího momentu

Průběh posuvové síly, obrázek 6.3c, lze vysvětlit následovně: Po kontaktu příčné ostří s povrchem obrobku (bod A) posuvová síla náhle prudce stoupá (úsek AB). To je v souladu s faktem, že příčné ostří tvoří více než 50 % celkové posuvové síly při plném záběru vrtáku.

Poté co příčné ostří plně pronikne do obrobku (bod B) následuje pozvolný vzestup síly, který je vyvolán postupně se zvětšujícím záběrem hlavního ostří vrtáku (úsek BC).

V úseku CD, kde celá špička vrtáku je uvnitř obrobku, naopak dochází k mírnému poklesu posuvové síly. To je způsobeno především snahou vrtáku nadzvedávat měřicí zařízení silou, která vzniká při kontaktu mezi válcovou fazetkou na obvodě vrtáku a stěnou již vyvrtané díry.

Náhlý pokles úseku DE vzniká buď v důsledku delaminace materiálu, nebo pouze vydutím dosud neobrobené části materiálu pod příčným ostřím. Pokud nastane delaminace (obr. 6.3c) lze pozorovat pokles posuvové síly až na hodnotu E'. Tento pokles se projeví v důsledku překročení přípustné hodnoty posuvové síly. V dosud neobrobené vrstvě materiálu pod vrtákem nastane šíření trhliny (delaminace), jejímž následkem dočasně poklesne odpor materiálu vůči posuvu vrtáku.

Poté co příčné ostří vrtáku prostoupí na povrch obrobku (bod E), nemá dále žádný vliv na vrtání. Jak hlavní ostří vrtáku prochází povrchem obrobku, posuvová síla se pozvolna zmenšuje (úsek EF) díky postupnému snižování záběru hlavního ostří.

Průběh kroutícího momentu, obrázek 6.3d, lze vyjádřit následovně: Po kontaktu příčné ostří s povrchem obrobku (bod O) kroutící moment od vrtáku stoupá, avšak bez náhlého

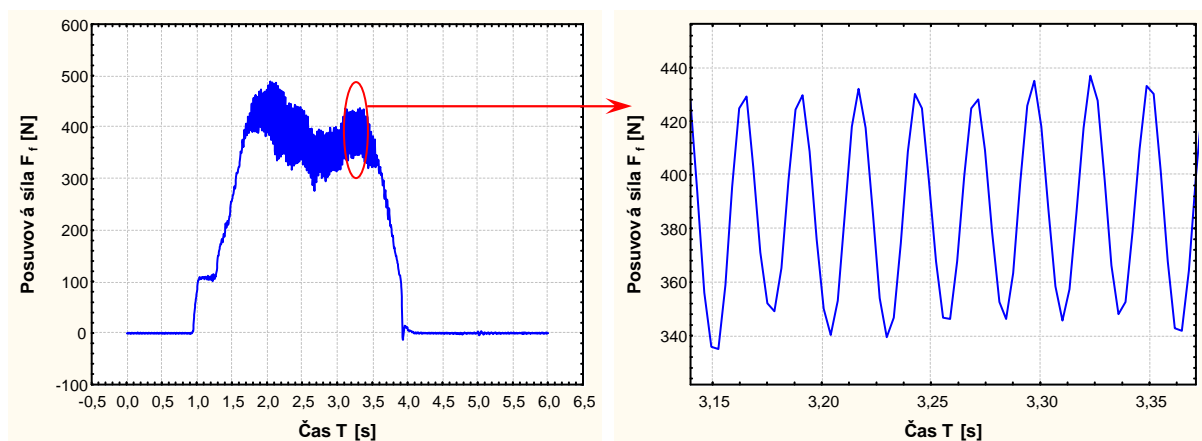
vzestupu jako tomu bylo v případě posuvové síly. V úseku OP nelze přesně určit přechod mezi příčným a hlavním ostřím vrtáku. To ukazuje, že i když příčné ostří vyvolává relativně silné zvýšení posuvové síly, jeho účinek na krouticí moment je poměrně malý.

Nárůst krouticího momentu, ale v menší míře (úsek PQ), lze zaznamenat i poté co celé hlavní ostří pronikne do obrobku (bod P) z důvodu zvětšování kontaktní plochy mezi vrtákem a stěnou vrtané díry.

V blízkosti bodu Q je již neobrobená vrstva pod vrtákem malá a tak dochází k její deformaci (vyboulení, delaminace). Zatímco posuvová síla při vyboulení materiálu náhle klesá (viz obrázek 6.3c, úsek DE`), krouticí moment (a tedy i řezná síla F_c) zůstává až do bodu Q bez poklesu a v případě delaminace jeho hodnota dokonce naroste viz obrázek 6.3b.

Poté co příčné ostří vrtáku prostoupí na povrch obrobku (bod Q), vrták dále prostupuje obrobkem, čímž se snižuje délka pracovní části hlavního ostří a hodnoty krouticího momentu klesají (úsek QR).

I když celé hlavní ostří vystoupí z obrobku (bod R), krouticí moment nemá nulovou hodnotu z důvodu kontaktní síly mezi obvodem vrtáku a stěnou vyvrtané díry (úsek RS).



Obr.6.4

6.2 Vliv opotřebení vrtáků na posuvovou sílu a krouticí moment

Při obrábění dochází v důsledku řezného procesu k relativnímu pohybu nástroj - obrobek a nástroj-tříška, i ke kontaktu nástroje s obrobkem (na hlavním a vedlejším hřbetě a špičce nástroje) a odcházející třískou (na čele nástroje), což musí nutně vést k opotřebení nástroje. Protože podmínky práce řezného nástroje se zásadně liší od podmínek práce běžných strojních součástí, je třeba i k procesu opotřebení nástroje přistupovat z odlišných pozic.

Proces opotřebení nástroje je velmi složitý děj, který závisí na mnoha faktorech (fyzikální a zejména mechanické vlastnosti obráběného a nástrojového materiálu, druh obráběcí operace, geometrie nástroje, pracovní podmínky, pracovní prostředí, atd.) a v jehož průběhu působí mnoho odlišných fyzikálně-chemických jevů (mechanismů opotřebení). K základním mechanismům opotřebení patří zejména:²⁵

- **abraze** (brusný otěr vlivem tvrdých mikročástic obráběného materiálu i mikročástic uvolněných z nástroje),

- **adheze** (vznik a okamžité následné porušování mikrosvarových spojů na stýkajících se vrcholcích nerovností čela a třísky, v důsledku vysokých teplot a tlaků, chemické příbuznosti materiálů a kovově čistých styčných povrchů),
- **difúze** (migrace atomů z obráběného do nástrojového materiálu a naopak a z ní vyplývající vytváření nežádoucích chemických sloučenin ve struktuře nástroje),
- **oxidace** (vznik chemických sloučenin na povrchu nástroje v důsledku přítomnosti kyslíku v okolním prostředí),
- **plastická deformace** (důsledek vysokého tepelného a mechanického zatížení, kumulovaného v čase), která se může ve svém nejneprůzračnějším důsledku projevit ve formě tzv. lavinového opotřebení,
- **křehký lom** (důsledek vysokého mechanického zatížení, např. přerušovaný řez, nehomogenity a vměstky v obráběném materiálu, atd.).

První dva mechanismy opotřebení jsou též obvykle označovány jako fyzikální, druhé dva jako chemické, všechny čtyři působí v průběhu času plynule, s tím, že časový okamžik začátku jejich působení nemusí být vždy shodný. Plastická deformace a křehký lom jsou naproti tomu mechanismy, které působí náhle, v daném okamžiku a obvykle způsobí okamžité ukončení činnosti nástroje (náhlá změna tvaru břitu nástroje, lavinové opotřebení nebo ulomení špičky). Hřbet nástroje se opotřebovává především v důsledku abraze a oxidace, čelo v důsledku adheze, difúze, abraze a oxidace.

Mimo výše uvedených základních fyzikálně-chemických mechanismů existují i další mechanismy opotřebení:^{25,26}

- **mechanická únava** (v důsledku cyklického namáhání řezného nástroje),
- **tepelná únava** (vytváření hřebenových trhlin kolmých na dilatující část břitu na čele i hřbetě nástroje),
- **delaminační opotřebení** (odlupování tenkých vrstev z povrchu nástroje v důsledku nevhodné technologie výbrusu nebo povlakování),
- **termoelektrické opotřebení** (odstraňování elektricky vodivého materiálu z funkčních povrchů nástroje),
- **rozpuštění nástrojového materiálu** (v jednotlivých bodech na povrchu nástroje),
- **elektrochemické opotřebení** (výměna iontů mezi materiálem nástroje a obrobku),
- **kombinace výše uvedených mechanismů.**

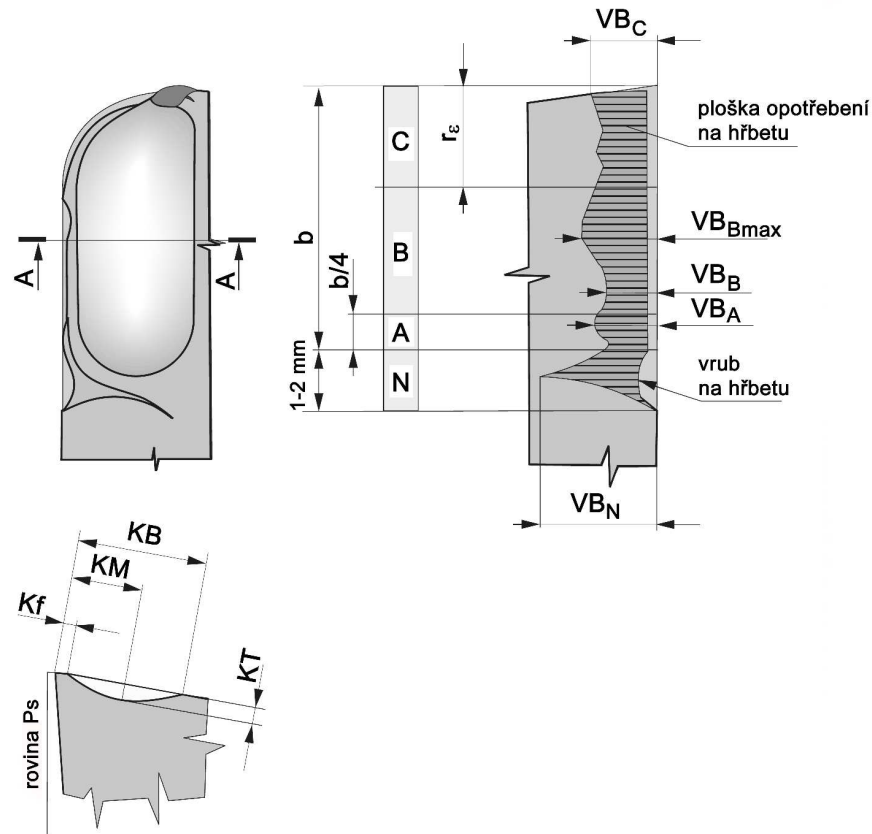
Vnější projevy opotřebení na nástrojích jsou nejlépe klasifikované podle normy ISO 3685-1977, obr. 6.5. Pro označení veličin a rozměrů opotřebení jsou užívány mezinárodní zkratky vycházející z německé odborné terminologie:²²

1. **VB** (podle německého slova Verschleissmarkenbreite) opotřebení hřbetní plochy nástroje v oblasti:

- poloměru zaoblení špičky nástroje **VB_C** (tzv. C - zóna opotřebení, index C označuje špičku, respektive poloměr zaoblení špičky nástroje, podle anglického termínu „corner radius“),
- podél hlavního ostří **VB_B** (tzv. B - zóna opotřebení),
- na konci záběru ostří **VB_N** (tzv. N - zóna opotřebení, index N označuje vrub, z anglického termínu „notch“).

2. **KT** (z německého slova Kolkttiefe) opotřebení dané hloubkou výmolu, resp. žlábků (často používaný termín je i „kráter“) na čele nástroje.

3. **KB** (z německého slova Kolkbreite) vzdálenost zadního okraje výmolu od původního neotupeného ostří.
4. **KM** (z německého slova Kolkmittenabstand) poloha středu výmolu.



Obr.6.5²⁴

Vzhledem k fyzikálním a mechanickým vlastnostem vláknově vyztužených kompozitů lze předpokládat, že dominantním mechanismem opotřebení nástroje při jejich obrábění bude abraze. Z důvodu vysokého tepelného zatížení nástroje se dále na jeho celkovém opotřebení bude částečně podílet i difúze a oxidace, poslední z plynule působících mechanismů, adhezi, lze zcela jednoznačně vyloučit. Z náhle působících základních mechanismů opotřebení lze vyloučit křehký lom, naproti tomu plastické porušení je zcela reálné.

Pro zkoušky zaměřené na sledování vlivu opotřebení nástroje na posuvovou sílu a kroučící moment byly použity tyto vrtáky: Gühring (označení gk12: $D=10,0 \text{ mm}$, monolitní slinutý karbid s povlakem $TiN+TiAlN$; označení go12: $D=10,0 \text{ mm}$, rychlořezná ocel s povlakem TiN), STIM-ZET (označení so12, $D=9,6 \text{ mm}$, rychlořezná ocel bez povlaku) a Zbrojovka Vsetín (označení zoe1, $D=9,0 \text{ mm}$, rychlořezná ocel bez povlaku). Geometrie vrtáků jsou uvedeny v tabulce 6.1, řezné podmínky pro dané zkoušky v tabulce 6.2. Obráběným materiálem byly vzorky ze sklo/polyesterového kompozitu, viz kapitola 5, mechanické vlastnosti jsou uvedeny v tabulce 5.1.

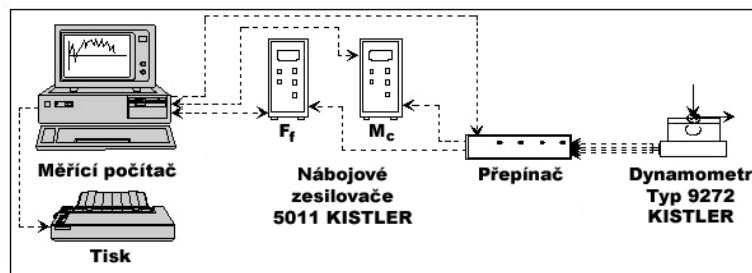
Tab.6.1 Geometrie použitých vrtáků

Jmenovitý rozměr [mm]	Označení	Průměr [mm]				Kružovitost (na 100 mm)	Tloušťka jádra [mm]			Délka ostří [mm]				Úhel [°]									
		špičky	U [mm]	I [mm]	Ve vzdálenosti I		špičky	U	Ve vzdálenosti I	Přístavek (na 100 mm)	hlavní			příčné	nast. (doplňkový)			špičky			hřbetu		
											1	2	Δ		Ψ_{r1}	Ψ_{r2}	Δ_{ψ}	ϵ_r	α_{r1}	α_{r2}	Δ_{α}		
10	go12	9,99	30	9,96	0,10	2,43	3,37	3,10	3,86	3,99	0,13	0,96	28,7	0	122,6	11,3	11,5	0,2					
10	gk12	10,00	25	9,98	0,08	2,07	2,34	1,08	3,49	3,46	0,03	0,66	30,5	30	0,5	119,5	16,0	0					
9,6	so12	9,59	70	9,55	0,06	1,50	3,02	2,17	4,54	0	0,32	0,32	26,5	0	127,0	9,0	0						
9	zoe1	9,01	70	8,98	0,04	1,61	2,61	1,43	4,63	4,40	0,23	1,95	31,0	31,5	0,5	117,5	13,2	13,0	0,2				

Tab.6.2 Řezné podmínky pro zkoušky opotřebení

Vrták	Průměr D [mm]	Otáčky n [min ⁻¹]	Řezná rychlost v _c [m.min ⁻¹]	Posuv na otáčku f [mm]
gk12	10	1800	56,5	0,20
go12	10	1800	35,2	0,20
so12	9,6	1120	33,8	0,20
zoe1	9	1120	31,7	0,20

Snímačem posuvové síly a kroutícího momentu byl piezoelektrický dynamometr KISTLER 9272, propojený přes přepínač kanálů a nábojové zesilovače KISTLER 5011 s osobním počítačem vybaveným univerzální měřicí kartou. Před vlastním měřením byl dynamometr ocejchován pomocí sady závaží. Cejchována byly jak hodnota síly F_f , tak hodnota kroutícího momentu M_c . Při cejchování M_c byl dynamometr upnut do přípravku tak, aby jeho osa byla vodorovná. Pak byla na dynamometr pomocí šroubů připevněna páka známé délky a na ni byla zavěšena závaží.



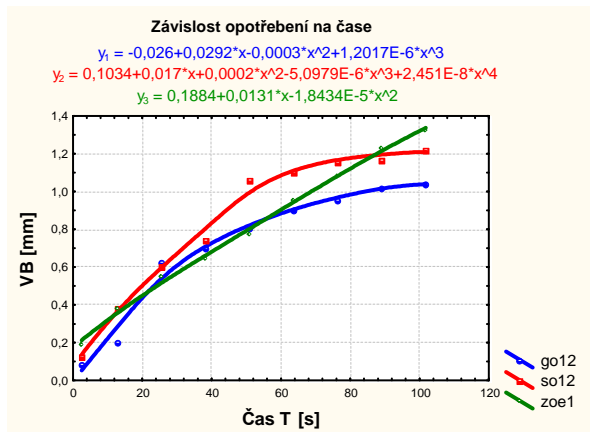
Obr.6.6



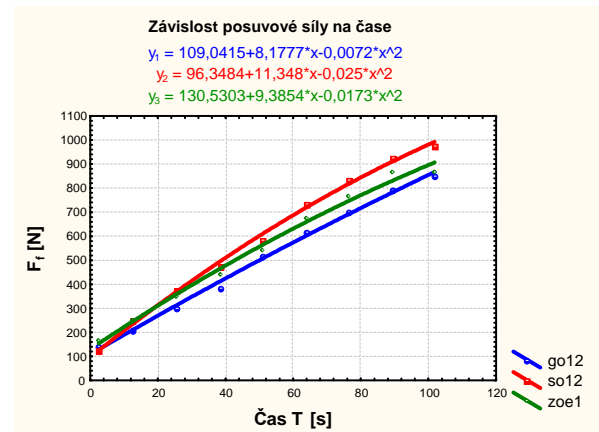
Obr.6.7

Hodnoty posuvové síly F_f a kroutícího momentu M_c , odečtené ze záznamů dynamometru, jsou pro všechny zkoušky na sklolaminátu souhrnně uvedeny v příloze 1.

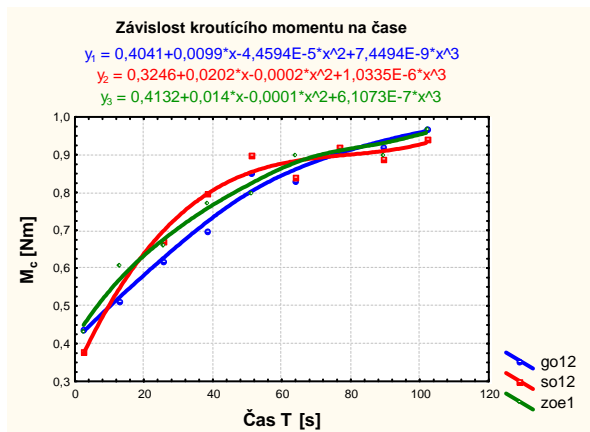
Intenzita opotřebení vrtáků z rychlořezných ocelí při vrtání kompozitu vyztuženého skleněnými vlákny byla podle očekávání velmi vysoká, jak to dokumentuje obrázek 6.8. Po necelých dvou minutách celkové čisté doby funkce dosáhla šířka fazetky hřbetního opotřebení na obvodu nástroje hodnoty $VB > 1,2$ mm u nepovlakovaných vrtáků (so12, zoe1) a $VB > 1,0$ mm u povlakovaného vrtáku (go12). Z uvedených hodnot vyplývá, že povlak sice snižuje intenzitu opotřebení nástroje, jeho vliv ale není příliš významný. Opotřebení nástroje výrazně ovlivňuje sledované hodnoty (v menší míře M_c , velmi intenzivně F_f). Hodnoty kroutícího momentu M_c narostly v souladu s rostoucím opotřebením vrtáků zhruba 2,5x (obr. 6.10), hodnoty posuvové síly F_f dokonce téměř 7x (obr. 6.9).



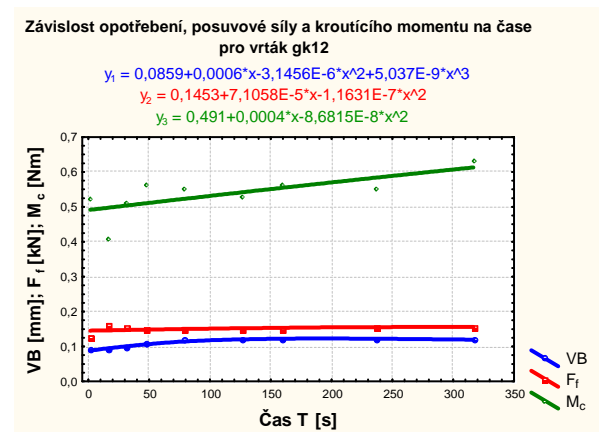
Obr.6.8



Obr.6.9



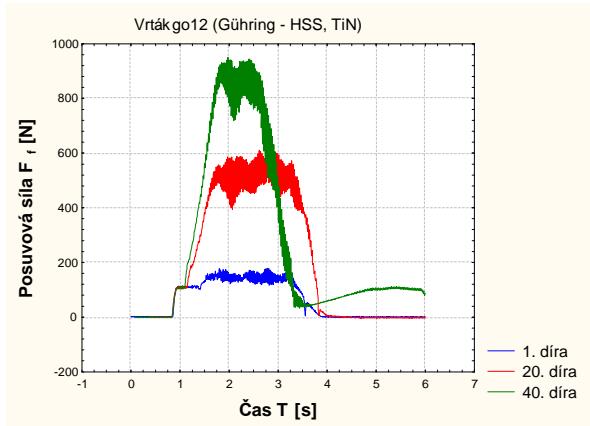
Obr.6.10



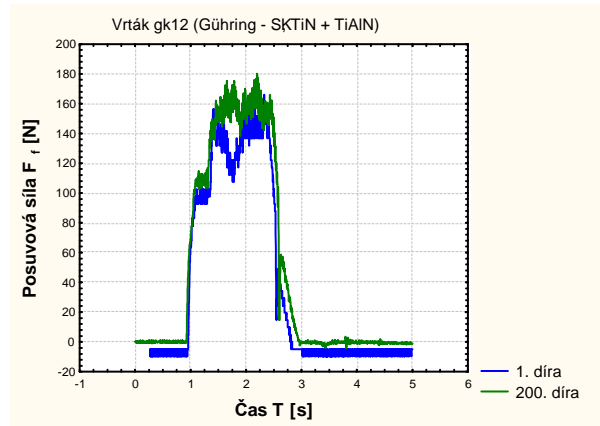
Obr.6.11

Opotřebení vrtáku ze slinutého karbidu (gk12) se po počátečním nárůstu ustálilo na hodnotě $VB=0,12$ mm, která zůstala beze změny i po více než pěti minutách čistého času vrtání (obr. 6.11), přestože nástroj pracoval s vyšší řeznou rychlostí (viz tabulka 6.2). Lze očekávat, že tato hodnota se nebude s narůstající dobou funkce příliš zvyšovat a proto bude trvanlivost nástroje velmi vysoká. Hodnoty kroutícího momentu M_c (obr. 6.11) a zejména posuvové síly F_f (obr. 6.11) se s narůstajícím opotřebením nástroje zvyšují jen velmi mírně.

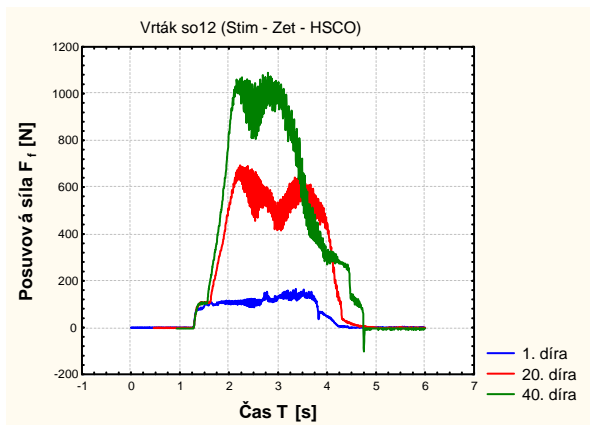
Vybrané průběhy posuvových sil a kroutících momentů jsou uvedeny na obr. 6.12 až 6.19, vždy první (modrá barva) a poslední vrtaná díra (zelená barva). U rychlořezných vrtáků jsou rozdíly v hodnotách M_c a zejména F_f mezi první a poslední dírou velmi výrazné, což je dáno velmi intenzivním nárůstem opotřebení nástrojů, naopak u vrtáků ze slinutých karbidů je patrný pouze mírný vzestup obou sledovaných parametrů, viz například porovnání obr. 6.13 a 6.15.



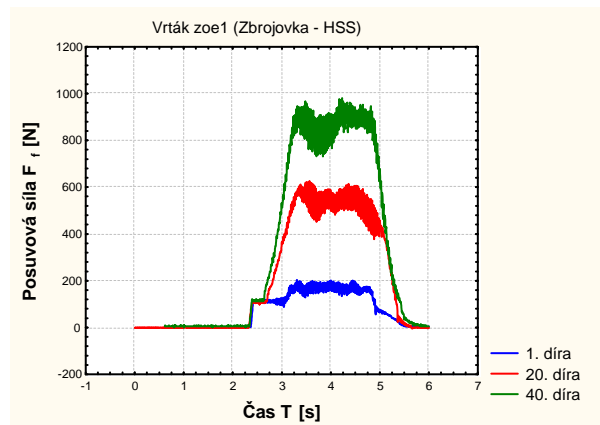
Obr.6.12



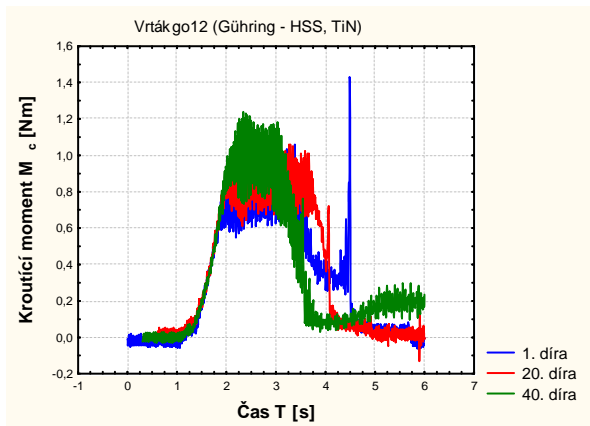
Obr.6.13



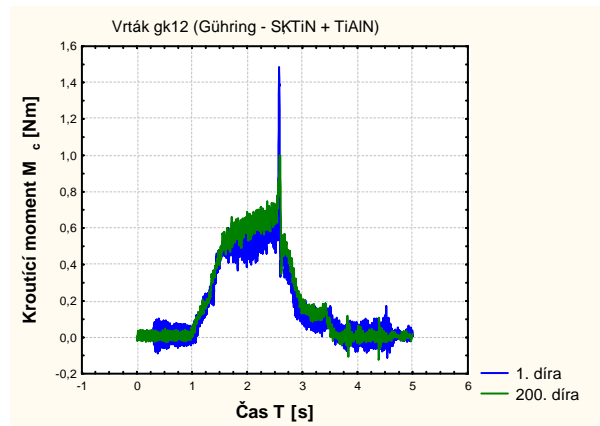
Obr.6.14



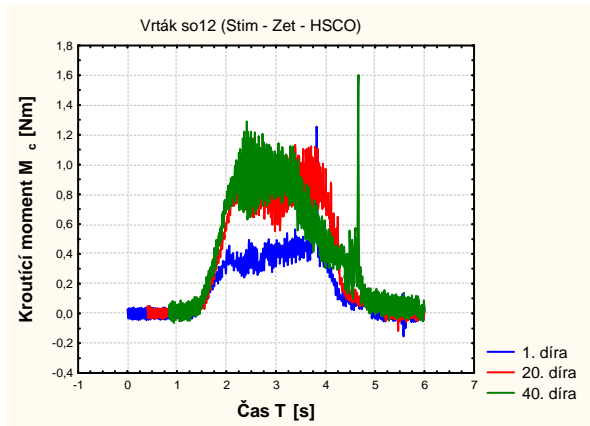
Obr.6.15



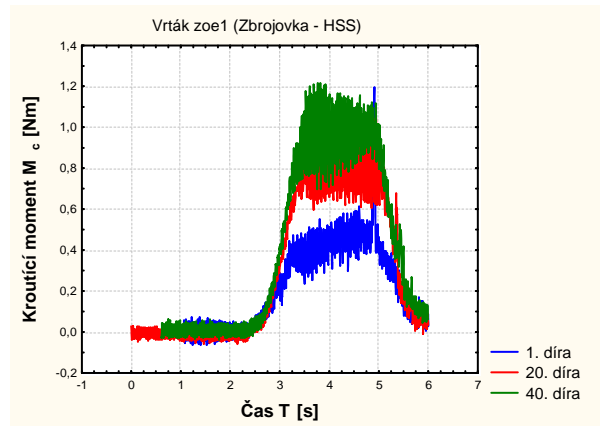
Obr.6.16



Obr.6.17

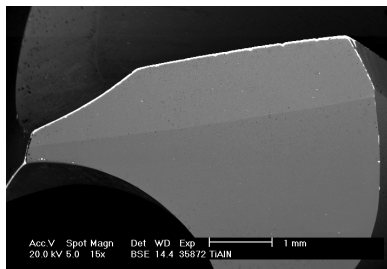


Obr.6.18

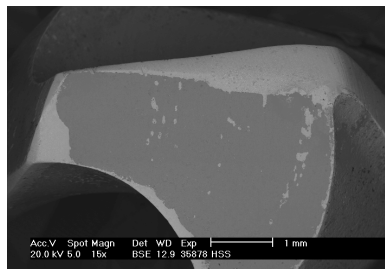


Obr.6.19

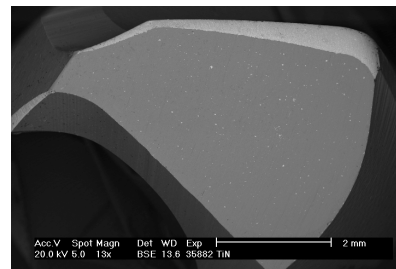
Vzhled opotřebeného hlavního hřbetu monolitního karbidového povlakovaného vrtáku gk12 ve stavu po ukončení zkoušky ($VB=0,12$ mm, řezná rychlost $v_c=56,5$ m.min⁻¹, posuv na otáčku $f=0,20$ mm, celková doba vrtání $T=317$ s) je vidět na obrázku 6.20a. Pro porovnání je na obrázku 6.20b dokumentován silně opotřebený hlavní hřbet nepovlakovaného HSS vrtáku zoe1 ($VB=1,33$ mm, $v_c=31,7$ m.min⁻¹, $f=0,20$ mm, $T=102$ s) a na obrázku 6.20c povlakovaného HSS vrtáku go12 ($VB=1,04$ mm, $v_c=35,2$ m.min⁻¹, $f=0,20$ mm, $T=102$ s). Velmi zajímavým se jeví fakt, že hřbetní opotřebení tohoto vrtáku se směrem od vnějšího obvodu nástroje ke špičce zmenšuje jen velmi pozvolna. I při velmi nízké řezné rychlosti, kterou břit pracuje v místě napojení hlavního ostří na ostří příčné (asi 8,6 m.min⁻¹) dosahuje šířka fazetky VB v tomto místě odhadem asi 0,3 mm. Tím lze potvrdit skutečnost, že při vrtání kompozitu vyztuženého skleněnými vlákny je hlavní příčinou intenzivního opotřebení nástroje abrazivní účinek vyztužujících vláken, význam řezných podmínek (zejména řezné rychlosti) je druhořadý.



Obr.6.20a SK, povlak TiN+TiAlN, VB = 0,12 mm



Obr.6.20b HSS, bez povlaku, VB = 1,33 mm



Obr.6.20c HSS, povlak TiN, VB = 1,04 mm

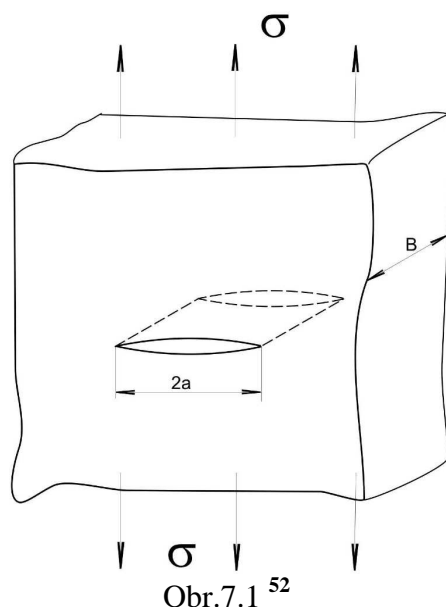
7. Lomová mechanika

Problematikou vzniku a šíření trhlin, křehkým lomem a určením zbytkové životnosti se zabývá vědní obor zvaný lomová mechanika. Počátky zkoumání materiálu z hlediska lomové mechaniky lze datovat již do druhé poloviny 19. století, kdy August Wöhler laboratorně podroboval zkušební vzorky únavovému zatížení a vytvořil křivky závislosti rozkmitu napětí na počtu cyklů do porušení. Koncepce Wöhlerových křivek, které se používají dodnes umožňují, kromě jiného, stanovit mez únavy pro určité konstrukční detaily.

Další technický pokrok umožnil podrobně sledovat chování těles s trhlínami. První postup pro analýzu eliptické trhliny v nekonečné elastické desce sestavil Inglis (1913). V roce 1920 Griffith publikoval výsledky teoretických výpočtů a experimentů křehkého lomu skla. Stanovil závislost mezi napětím při lomu a délkou trhliny. Na konferenci ASTM komise E-09 v roce 1946 zveřejnil Peterson definici součinitele koncentrace napětí jako funkci závislosti napětí na geometrii tělesa. V roce 1953 a 1974 vydal dvě komplexní příručky součinitelů koncentrace napětí. Díky elektronovému mikroskopu se otevřely nové možnosti pro lepší porozumění lomového chování. Uveřejněním faktoru intenzity napětí **K** Irwinem v roce 1957 byla přijata lineárně elastická lomová mechanika (LELM) jako základ pro odhad růstu únavových trhlin. Tato teorie byla dále rozvíjena s ohledem na vliv plastických zón v okolí čela trhlin (Manson-Coffin, Neuber, atd). Parisův zákon, který autor uveřejnil na počátku 60. let, umožnil popsat rychlost růstu trhliny da/dN za použití faktoru intenzity napětí **K**.⁴²

7.1 Griffithovo kritérium (energetická bilance)

Základem moderních teorií lomové mechaniky je Griffithovo kritérium pro šíření nestabilních trhlin v křehkém tělese za podmínky rovnováhy energetické bilance.⁴² Svě kritérium Griffith odvodil na základě práce Inglise (1913) pro eliptickou centrální trhlinu délky $2a$ v nekonečném pružném tělese (obr. 7.1) již v roce 1921 (pod pojmem nekonečná stěna se rozumí, že šířka i výška stěny jsou mnohem větší než $2a$). Těleso bylo namáháno tahovým napětím (mód I).



Obr. 7.1⁵²

Za předpokladu, že práce spojená s přírůstkem lomové plochy dA bude uhrazena potenciální energií uvolněnou v okolí rostoucí trhliny, je Griffithova energetická bilance dána vztahem^{43,45,52}

$$\frac{dW}{dA} = \frac{d\Pi}{dA} + \frac{dW_s}{dA} = 0, \quad (7.1)$$

nebo

$$-\frac{d\Pi}{dA} = \frac{dW_s}{dA}, \quad (7.2)$$

kde W je celková energie systému, $\Pi = U - W_F$ je potenciální energie elastického tělesa, U - vnitřní deformační energie, W_F - práce od vnějších sil, W_s - práce spojená s vytvořením nových povrchů, $A = 2Ba$ je velikost lomové plochy, $2a$ - délka trhliny a B je tloušťka tělesa.

7.2.1 Rychlost uvolňování energie (hnací síla trhliny)

V roce 1956 Irwin upravil Griffithův model tak, aby byl použitelný pro řešení technických problémů. Irwin definoval veličinu G jako „rychlost uvolňování energie“, která představuje energii potřebnou k velice malému (inkrementálnímu) přírůstku trhliny^{43,45,52}

$$G = -\frac{d\Pi}{dA}. \quad (7.3)$$

Slovo „rychlost“ použité v tomto případě neznamená derivaci dráhy na čase, ale je chápána jako rychlost změny potenciální energie soustavy v závislosti na růstu lomové plochy. Protože G je získáno derivací energie, pak má význam síly a skutečně se tato veličina jmenuje hnací síla trhliny (crack driving force) ^{43,45,52}

$$G = \frac{\pi\sigma^2 a}{E} \left[\frac{(MPa)^2}{MPa} m = \frac{MJ}{m^2} = \frac{MN}{m} \right]. \quad (7.4)$$

Druhá strana rovnice (7.2) vyjadřuje podmínku, kdy nastane šíření trhliny ^{43,45,52}, tzn. při jaké kritické hodnotě, která je definována jako houževnatost materiálu G_C , nebo někdy také odpor materiálu R

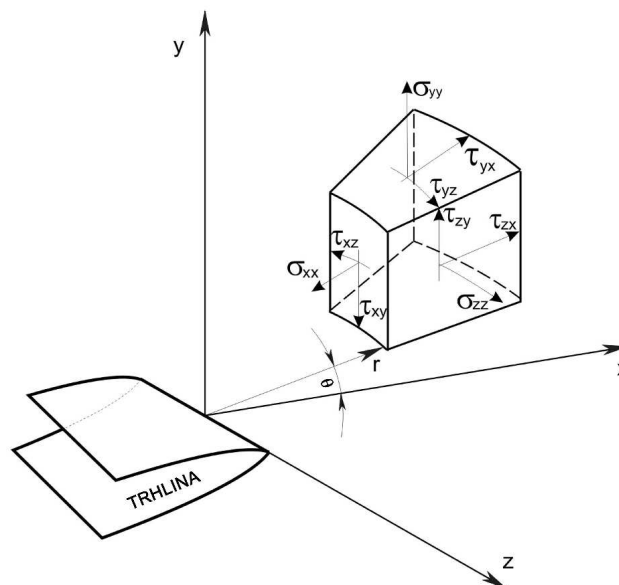
$$G_C = \frac{dW_s}{dA} = R. \quad (7.5)$$

Toto kritérium je obdobné jako v případě např. plastické deformace

- k plastické deformaci při tahové zkoušce dojde, když platí $\sigma = R_p 0,2$,
- k lomu dojde, když platí $G = G_C$.

7.3 Napěťová analýza okolí trhliny

Celá teorie kolem křehkého lomu navržená Griffithem a dále rozpracovaná je precizní, ale obtížně použitelná v konstruktérské praxi. Spočítat hnací sílu trhliny G pro trhlínu v zatížené součásti libovolného tvaru bylo velmi obtížné. Problém vyřešil Irwin, a to pomocí rozboru napjatosti na čele ostré trhliny.



Obr. 7.2 ⁵²

Pro zatíženou součást s trhlinou je možné odvodit vztah popisující napjatost v tělese za předpokladu izotropního lineárně-elastického materiálu (v letech 1937 – 57 se objevuje řada publikací s tímto řešením). V případě, že polární souřadnicový systém je umístěn v počátku čela trhliny, viz 7.2 je pole napětí ve stěně s trhlinou dáno vztahem ^{43,45}

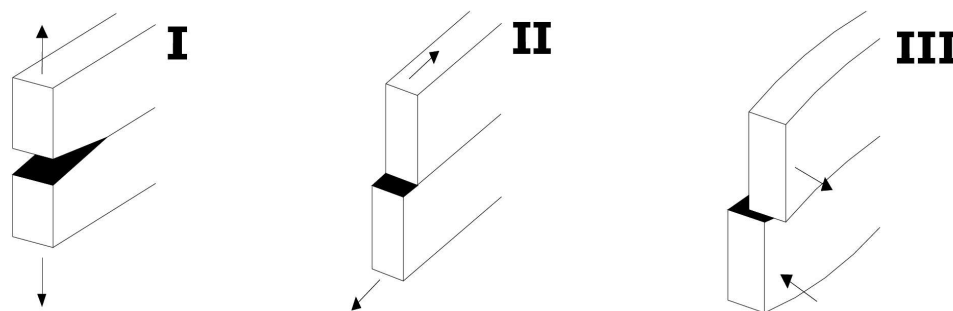
$$\sigma_{ij} = \left(\frac{k}{\sqrt{r}} \right) \cdot f_{ij}(\theta) + \sum_{m=0}^{\infty} A_m \cdot r^{\frac{m}{2}} g_{ij}^{(m)}(\theta), \quad (7.6)$$

kde r a θ jsou polární souřadnice, σ_{ij} - složky tenzoru napětí, k - konstanta a $f_{ij}(\theta)$, $g_{ij}(\theta)$ jsou bezrozměrné veličiny, které jsou pouze funkcí úhlu θ . Všechna řešení obsahují první člen, který je úměrný $1/\sqrt{r}$. V případě, že r se blíží k nule, pak první člen roste nade všechny meze - tento člen vyjadřuje singularitu napětí v blízkosti čela trhliny. Další členy mají konečné hodnoty a závisí na geometrii tělesa. To tedy znamená, že v bezprostřední blízkosti trhliny rozhoduje o velikosti napětí pouze první člen.

7.3.1 Součinitel (faktor) intenzity napětí

Na obr. 7.3 jsou znázorněny tři způsoby zatěžování trhliny. Konstanta k i funkce $f_{ij}(\theta)$ závisí na způsobu („módu“) zatěžování. Existuje dohoda, že místo k se používá výraz $K = k\sqrt{2\pi}$ - a pro tuto veličinu se zavedl termín součinitel (někdy faktor) intenzity napětí s indexy označujícími způsob zatěžování. Nejčastěji se používají římské číslice K_I , K_{II} , K_{III} , ale některé normy, např. ISO používají čísla arabská K_1 , K_2 , K_3 .

- I tahový mód (opening mode, tensile mode), vnější síly působí kolmo na rovinu lomu,
- II rovinný smykový mód (sliding mode, edge sliding, inplane shear), vnější síly působí ve směru šíření trhliny,
- III antirovinný smykový mód (tearing mode, antiplane shear, out-of-plane shear), vnější síly působí ve směru čela trhliny.



Obr.7.3 ⁴²

Napěťové pole před čelem trhliny v isotropním, lineárně-elastickém materiálu lze psát ve tvaru ^{43,45}

$$\lim_{r \rightarrow 0} \sigma_{ij}^I = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} f_{ij}^I(\theta), \quad (7.7)$$

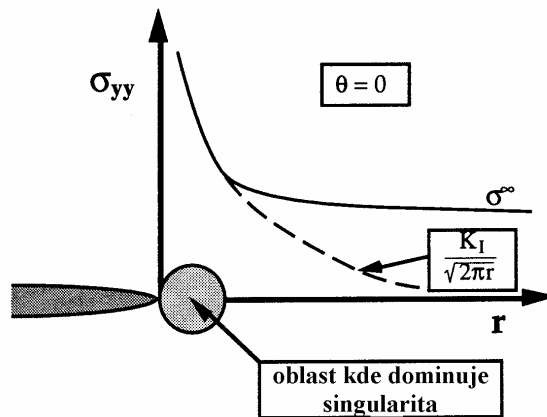
$$\lim_{r \rightarrow 0} \sigma_{ij}^{II} = \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} f_{ij}^{II}(\theta), \quad (7.8)$$

$$\lim_{r \rightarrow 0} \sigma_{ij}^{III} = \frac{K_{III}}{\sqrt{2\pi r}} f_{ij}^{III}(\theta). \quad (7.9)$$

Konkrétní výrazy pro složky napětí i posunutí jsou uvedeny v příloze 6. Při způsobu zatěžování I v rovině trhliny $\theta = 0$ jsou podle přílohy 6 napětí ve směrech x a y rovna

$$\sigma_{xx} = \sigma_{yy} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}}, \quad \tau_{xy} = 0. \quad (7.10)$$

Na obrázku 7.4 je schematicky vyneseno průběh napětí σ_{yy} – napětí kolmé na rovinu trhliny. Rovnice (7.10) platí pouze v blízkosti čela trhliny, kde převládá singularita $1/\sqrt{r}$. Napětí dále od špičky trhliny je dáno vzdálenými okrajovými podmínkami. Např. tahové napětí daleko od špičky trhliny je rovno σ^∞ .

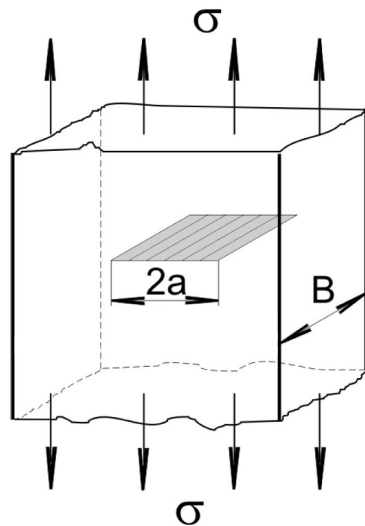


Obr.7.4 ^{43,45}

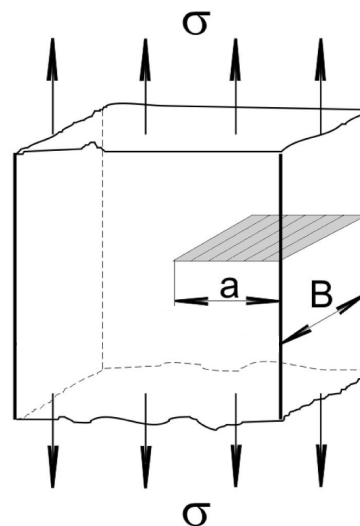
Amplituda průběhu napětí v okolí čela trhliny je dána faktorem intenzity napětí. To znamená, že hodnota K zcela definuje podmínky u čela trhliny. Jestliže je známa hodnota K , je možné vypočítat všechny složky napětí a posunutí jako funkci θ a r . Popis stavu napjatosti v okolí čela trhliny pomocí jediného parametru K je základem lomové mechaniky.

7.3.2 Vztah mezi K a globálními vlastnostmi součástí

Vyjádření hodnoty K , které závisí na působící síle a geometrii součásti se postupně hledalo. V případě jednoduchého tvaru tělesa se K odvozuje, složitější geometrie vyžadují experimentální příp. numerické postupy určení.



Obr.7.5⁵²



Obr.7.6⁵²

Na obr. 7.5 je základní konfigurace - průchozí trhlina v nekonečné stěně zatížené napětím σ . Napětí je kolmé na rovinu trhliny - způsob zatěžování I. Protože zatížení je lineárně elastické, rostou napětí ve všech místech úměrně k aplikovanému napětí σ . Tedy i v bezprostředním okolí čela trhliny napětí musí být úměrné σ a tedy $K_I \approx \sigma$. Podle rovnice (7.7)

$$\lim_{r \rightarrow 0} \sigma_{ij}^I = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} f_{ij}^I(\theta),$$

musí mít faktor K_I rozměr napětí. $\sqrt{\text{délka}} \rightarrow \text{MPa}\cdot\sqrt{\text{m}}, \text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}, \text{MN}\cdot\text{m}^{-3/2}$. Někdy se používá jednotka $\text{N}\cdot\text{mm}^{-3/2}$, ($1\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2} = 31,6\text{N}\cdot\text{mm}^{-3/2}$). Jedinou významnou délkou je velikost trhliny a . Mezi K_I a globálními podmínkami platí vztah $K_I = Y(\sigma\sqrt{a})$ a pro konkrétní geometrii na obrázku 7.5 je^{43,45}

$$K_I = \sigma\sqrt{\pi a}. \quad (7.11)$$

Velice podobné řešení existuje pro polonekonečnou stěnu. Součinitel intenzity napětí pro konfiguraci na obr. 7.6 je^{43,45}

$$K_I = 1,12\sigma\sqrt{\pi a}. \quad (7.12)$$

Hodnota K_I v případě povrchové trhliny je o 12 % vyšší, tzn. že povrchové trhliny jsou nebezpečnější ve srovnání s trhlínami vnitřními.

K_I - kvantifikuje napětí a posunutí v blízkosti čela trhliny \rightarrow popisuje lokální (místní) vlastnost.

G - kvantifikuje změnu energie napjatosti při malém přírůstku trhliny \rightarrow popisuje globální (celkovou) vlastnost.

Pro lineárně elastický materiál jsou parametry zcela zaměnitelné a jsou ve zcela jednoznačném vztahu

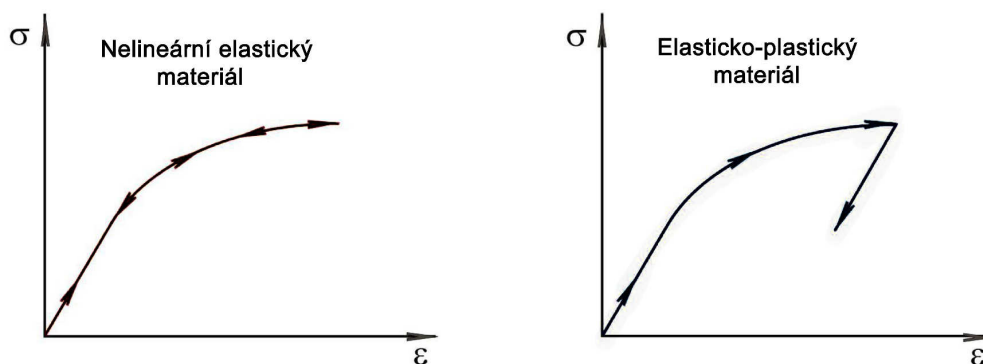
$$G = \frac{K_I^2}{E}, \quad (7.13)$$

kde pro rovinnou deformaci: $E' = \frac{E}{1 - \mu^2}$

a pro rovinnou napjatost: $E' = E$.

7.4 Křivkový J integrál

Křivkový **J**-integrál (**J** proto, že autor se jmenoval J. Rice) slavil velký úspěch jako parametr charakterizující lom materiálu, u něhož je závislost $\sigma \approx \varepsilon$ nelineární. Idealizací elasticko-plastické deformace jako nelineární elastické deformace položil J. Rice základ k rozšíření lomové mechaniky za hranice platnosti LELM.



Obr. 7.7⁵²

Obr. 7.7 ilustruje chování dvou materiálů při tahové zkoušce - nelineárně elastického a elasticko-plastického. Chování těchto materiálů při zatěžování je stejné a liší se pouze při odlehčování. Pokud napětí v obou materiálech roste monotónně, je mechanická odezva u těchto materiálů identická. Deformační teorie plasticity, která dává do relace deformace a napětí v materiálu, je ekvivalentní teorii nelineární elasticity. Rice použil deformační plasticitu (tj. nelineární elasticitu) k analýze poměrů v okolí trhliny v nelineárním materiálu. Dokázal, že hodnota křivkového integrálu^{44,45,52}

$$J = \int_{\Gamma} (\mathbf{w} \cdot d\mathbf{y} - \bar{\mathbf{T}} \cdot \frac{\partial \bar{\mathbf{u}}}{\partial \mathbf{x}} \cdot d\mathbf{s}), \quad (7.14)$$

pro křivku Γ začínající na jednom lici a končící na druhém lici trhliny nezávisí na integrační cestě (\mathbf{w} je hustota deformační energie, \mathbf{T} vektor trakčních napětí, \mathbf{u} vektor posunutí a $d\mathbf{s}$ je délkový přírůstek po integrační křivce Γ). Dále ukázal, že J_I představuje změnu potenciální energie^{44,45,52} tělesa $d\Pi$ při změně délky trhliny o $d\mathbf{a}$

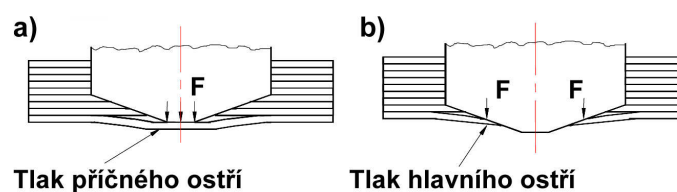
$$J_I = -\frac{d\Pi}{dA}. \quad (7.15)$$

Tento vztah je formálně stejný jako definiční rovnice rychlosti uvolňování potenciální energie G u lineárně elastického tělesa. Veličinu J_I lze, vzhledem k odvození, chápat jako parametr charakterizující intenzitu napjatosti na čele trhliny. Rovnice (7.15) má mimořádný význam pro experimentální určování hodnot J_I pro různé typy těles s trhlínami. Jestliže J_I definuje jednoznačně napjatost na čele trhliny, pak v okamžiku iniciace lomu (stabilního nebo nestabilního) J_I nabývá kritické hodnoty, která charakterizuje odolnost materiálu proti iniciaci lomu a označuje se jako J_{IC} .

8. Delaminace kompozitních materiálů

Při obrábění kompozitů dochází v jejich povrchové vrstvě k mnoha poškozením (defektům) materiálu, která jsou svým vzhledem, mechanismy vzniku a porušováním jiná než u kovových materiálů. Nejčastějším typem poškození je delaminace, která je spojována především s vrtáním a může k ní docházet jak při vstupu (odlupování povrchové vrstvy) tak i výstupu (odlupování neobrobené vrstvy pod nástrojem) vrtáku z materiálu.

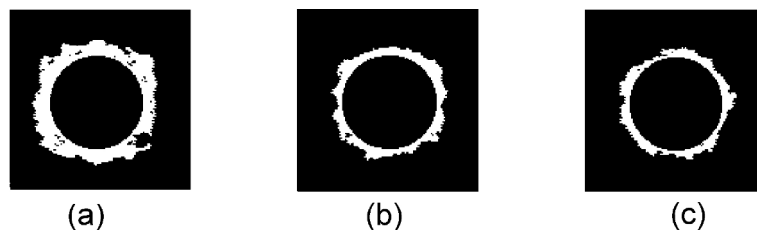
Vznik a rozvoj delaminace při vrtání klasickým šroubovým vrtákem probíhá postupně ve dvou fázích - fáze působení příčné ostří a fáze působení hlavního ostří. První fáze začíná v momentě, kdy tlaková síla od příčné ostří na dosud neobrobenou vrstvu materiálu dosáhne kritické hodnoty a končí poté co příčné ostří pronikne ven. Při deformaci se nejdříve vytvoří malé vydutí v okolí osy vrtání a poté se dále šíří ve směru vláken v povrchové vrstvě (obr. 8.1a). V okamžiku kdy vydutí dosáhne mezní hodnoty, povrchová vrstva se rozevře, příčné ostří pronikne ven a následně začne druhá fáze. Delaminace iniciovaná v první fázi se v důsledku tlaku a otáčení hlavního ostří vrtáku dále rozvíjí (obr. 8.1b). Příčné ostří řeže materiál obrobku s velkým negativním úhlem a tvoří přes 50 % posuvové síly (tím sehrává klíčovou roli při procesu). V momentě kdy příčné ostří prostoupí na povrch, delaminace dosáhne z velké části své konečné velikosti.¹¹



Obr.8.1 Fáze vzniku delaminace¹¹

8.1 Kvantifikace delaminace

Pro kvantifikaci delaminace bylo popsáno několik metod od měření klasickým dílenským mikroskopem přes zpracování digitálních fotografií speciálním softwarem až po aplikaci ultrazvuku C-Scan, viz obr. 8.2 a 8.3.



Obr.8.2 Snímky delaminace při aplikaci ultrazvuku C-Scan⁵³
 a) šroubovýtý vrták, b) vrták s ostřím ve tvaru W, c) závrtná fréza



Obr.8.3 Postup při filtraci delaminované oblasti⁵⁴
 (a) počáteční digitální obraz, (b) proces zpracování a (c) výsledný obraz delaminace

Největším problémem při použití dílenského mikroskopu je stanovení kritérií pro vlastní měření a následné vyhodnocení delaminace. To znamená, že pro každou skupinu kompozitních materiálů je nutno nejprve definovat veličinu charakterizující delaminaci, tzv. delaminační faktor F_d .

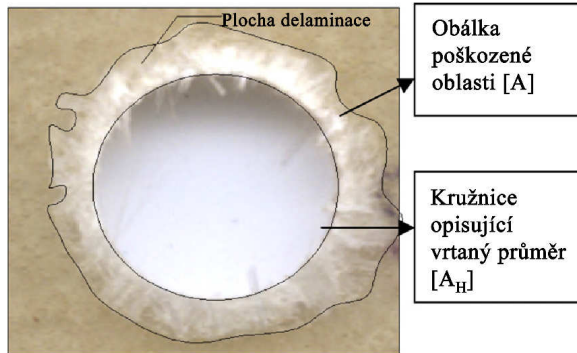
U vícesměrně vyztužených materiálů nebo kompozitů s povrchovou rohoží vzniká delaminace po celém obvodu díry tak jak je uvedeno na obr. 8.4. V takovém případě je možno vyjádřit delaminační faktor F_d jako poměr maximálního průměru delaminované oblasti D_{Max} a průměru vrtáku D (obr. 8.6a)

$$F_d = D_{Max} / D, \quad (8.1)$$

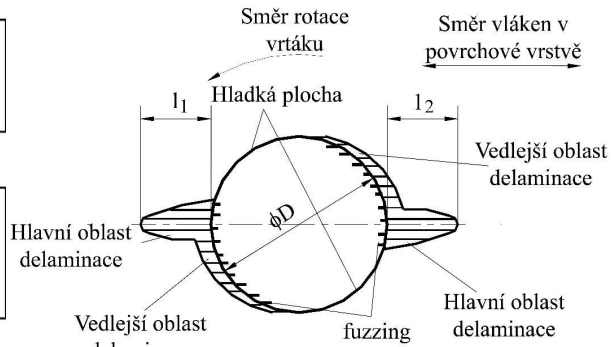
nebo přesněji z poměru delaminované plochy A (i s dírou) a plochy „ideálně“ vyvrtané díry A_H (obr. 8.4)

$$F_d = A / A_H. \quad (8.2)$$

Pozn.: V tomto případě již nelze pro měření jednoduše použít mikroskop.



Obr.8.4⁵⁵



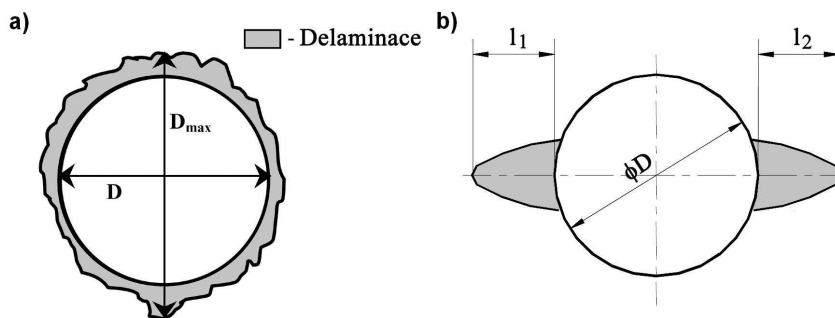
Obr.8.5¹¹

U jednosměrně vyztužených kompozitů se delaminace šíří výhradně ve směru os vyztužujících vláken a je charakteristická svou hlavní a vedlejší oblastí, obr. 8.5. Stejně jako u vícesměrných kompozitů se na okrajích vyvrtaných děr navíc často vyskytuje i malé množství nedokonalě obrobenejších vyztužujících vláken. Tento nepříjemný jev, z angličtiny zvaný fuzzing (fuzz = chmýří, chlupy, chloupky), je způsoben především následujícími příčinami:

- Vlákná nejsou čistě řezána v oblasti, kde je ostrý úhel mezi směrem vláken a vektorem rezné rychlosti.
- V povrchové vrstvě nejsou vlákna plně vystavena (podrobena) stříhové deformaci.

Po zjednodušení, viz obrázek 8.6b, lze delaminační faktor F_d pro jednosměrné kompozity stanovit na základě aritmetického průměru délek l_1 a l_2

$$F_d = (l_1 + l_2) / 2. \quad (8.3)$$



Obr.8.6^{11, 59}

8.2 Fyzikální model delaminace při výstupu nástroje

Vztah pro stanovení kritické tlakové (posuvové) síly, která způsobí delaminaci lze odvodit na základě lineární elastické lomové mechaniky.^{2,8,10} Neobrobená (delaminovaná) část materiálu pod nástrojem je modelována jako kruhová plocha, podepřená po jejím obvodě, obr. 8.7. Za předpokladu zatěžování existující trhliny Módem I (aplikované napětí působí kolmo na rovinu lomu), lze rovnici energetické rovnováhy vyjádřit následovně

$$G \cdot dA = F_x \cdot dX - dU. \quad (8.4)$$

Na levé straně této rovnice je G rychlost uvolňování energie (hnací síla trhliny), A velikost lomové plochy (nebo taky plochy delaminace), jejíž přírůstek dA je dán vztahem

$$dA = 2\pi \cdot a \cdot da, \quad (8.5)$$

kde a je poloměr delaminace. Na pravé straně rovnice (8.4) je F_x tlaková síla, X posunutí vrtáku, měřené od pozice ve které začíná delaminace a U je deformační energie uložená v tělese

$$U = \frac{8\pi \cdot M \cdot X^2}{a^2}. \quad (8.6)$$

Veličina M představuje ohybovou tuhost desky (pod vrtákem) a je určena na základě Kirchhoffovy teorie desek. Je to základní parametr popisující desku (udává jak moc odolává ohybu) a vypočítá se dle vztahu

$$M = \frac{E_1 \cdot h^3}{12(1-\nu_{12}^2)}, \quad (8.7)$$

ve kterém E_1 je modul pružnosti v tahu ve směru vláken^{57,58} a ν_{12} je Poissonovo číslo stanovené jako podíl příčného zkrácení k podélnému prodloužení. Jsou to materiálové konstanty charakterizující jednosměrný kompozit (ortotropní materiál - tři vzájemně kolmé roviny symetrie materiálových vlastností) a platí, že $\nu_{12}/E_1 = \nu_{21}/E_2$. Velikost posunutí X v rovnici (8.6) se podle Timošenska^{8,60} vyjádří jako

$$X = \frac{F_x \cdot a^2}{16\pi \cdot M}, \quad (8.8)$$

Po dosazení výše uvedených rovnic do rovnice (8.4) lze energetickou rovnováhu systému přepsat do tvaru

$$2G \cdot \pi \cdot a = F_x \frac{dX}{da} - \frac{dU}{da} = F_x \frac{d}{da} \frac{F_x \cdot a^2}{16\pi \cdot M} - \frac{d}{da} \frac{F_x^2 \cdot a^2}{32\pi \cdot M} = \frac{F_x^2 \cdot a}{16\pi \cdot M}. \quad (8.9)$$

Z tohoto důvodu kritická tlaková síla pro šíření trhliny na výstupu vrtáku je vyjádřena následovně

$$F_{del.výstup}(h) = F_x(h) = \pi \sqrt{32M \cdot G_{IC}} = \pi \sqrt{\frac{8G_{IC} \cdot E_1 \cdot h^3}{3(1-\nu_{12}^2)}}. \quad (8.10)$$

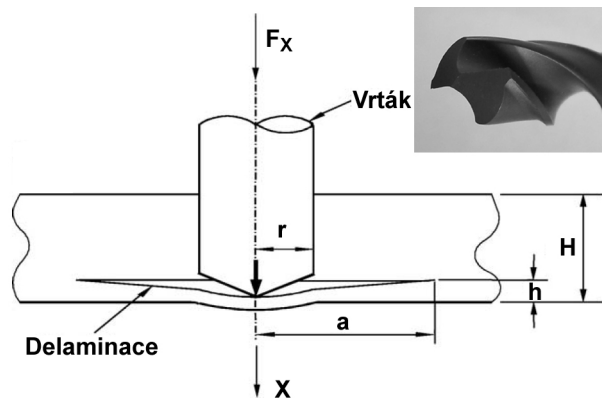
G_{IC} je kritická rychlost uvolňování energie (lomová houževnatost). Kritická tlaková síla je tedy pouze funkcí nevrtané tloušťky h a vlastností obráběného materiálu. Takto odvozenou „spojitou“ rovnici je možno aplikovat u kompozitních materiálů vyrobených např. pultruzí (tažením), navíjením, vstřikováním, atd. Delaminace u kompozitních materiálů jejichž požadovaná tloušťka je budována postupně z vrstev (tzv. lamináty) nenastane uvnitř vrstvy, ale pouze mezi jednotlivými vrstvami laminátu.⁸ V takovém případě kritická tlaková síla nabývá pouze diskretních hodnot podle rovnice

$$F_{D,del.výstup}(n) = \pi \sqrt{\frac{8G_{IC} \cdot E_1 (n \cdot h_t)^3}{3(1-\nu_{12}^2)}}, \quad (8.11)$$

nebo

$$F_{D,del.výstup}(h) = \pi \sqrt{\frac{8G_{IC} \cdot E_1 ((h/h_t) \cdot h_t)^3}{3(1-\nu_{12}^2)}}, \quad (8.12)$$

kde h_t je tloušťka jedné vrstvy laminátu a $n = h/h_t$ je počet neobrobených vrstev pod nástrojem. V praxi to znamená, že k zamezení vzniku delaminace je nutno snížit hodnoty posuvu tak, aby posuvová síla od břitu vrtáku nedosahovala hodnot daných rovnicemi (8.10) a (8.11).

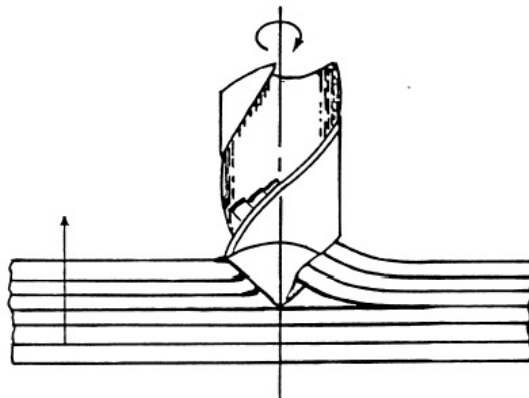


Obr.8.7¹⁰

8.3 Fyzikální model delaminace při vstupu nástroje

Jak již bylo zmíněno dříve, problematika delaminace kompozitních materiálů nemůže být spojována pouze s výstupem nástroje, ale vyžaduje taktéž samostatné posouzení při jeho vstupu.

V důsledku vnikání otáčejícího se břitu vrtáku do povrchové vrstvy kompozitu dochází ke vzniku delaminační síly F_A , která může následně oddělit horní vrstvu kompozitního materiálu (obr. 8.8). Přeměna řezné síly na axiální sílu způsobující delaminaci je závislá především na geometrii vrtáku a dále na tření mezi nástrojem a obrobkem. Z geometrie sehrává hlavní roli úhel čela, jehož velikost je dána stoupáním šroubovice vrtáku.



Obr.8.8⁸

Závislost kritické delaminační síly F_A v axiálním směru na kritické řezné síle F_C lze vyjádřit jako poměr

$$k_p = \frac{F_C}{F_A}, \quad (8.13)$$

kde k_p je transformační faktor definovaný pomocí λ (úhel stoupání šroubovice) a μ (koeficient tření mezi nástrojem a obrobkem).

Předpokládá se, že mechanismus vzniku a šíření trhlin je obdobný jako při delaminaci na výstupu. Proto v rovnici (8.13) lze sílu F_A nahradit silou F_x (8.10) a tloušťku vrstvy pod nástrojem „ h “ hloubkou díry $h_d = H - h$. Tím je dána kritická řezná síla při níž dojde k delaminaci na vstupu

$$F_C(h) = k_p \pi \sqrt{\frac{8G_{IC} E_1 (H-h)^3}{3(1-\nu_{12}^2)}}. \quad (8.14)$$

Pro úplnost, kritická (axiální) delaminační síla je vyjádřena vztahem

$$F_{del.vstup}(h) = F_A(h) = \pi \sqrt{\frac{8G_{IC} E_1 (H-h)^3}{3(1-\nu_{12}^2)}}, \quad (8.15)$$

a v případě laminátů lze rovnici (8.15) přepsat do diskrétního tvaru

$$F_{D,del.vstup}(h) = \pi \sqrt{\frac{8G_{IC} E_1 (((H-h)/h_t)h_t)^3}{3(1-\nu_{12}^2)}}. \quad (8.16)$$

8.4 Verifikace navrženého modelu delaminace

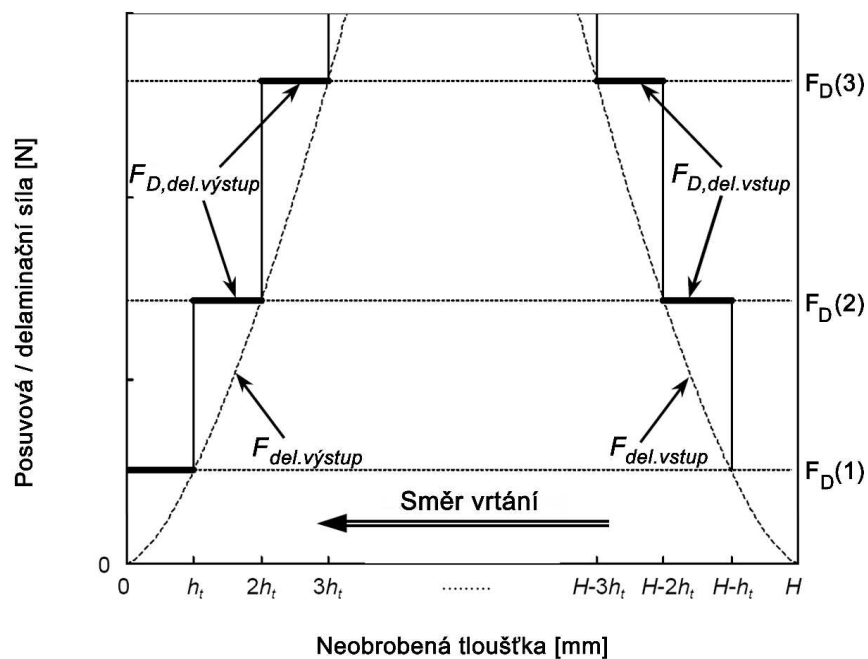
Pro ověření fyzikálního modelu delaminace, viz vztahy 8.11 a 8.12 stanovující kritickou posuvovou sílu vrtáku, byly provedeny experimenty za různých řezných podmínek a s rozdílnou geometrií břítu. Obráběným materiálem byl jednosměrně vyztužený uhlíkovo/epoxidový laminát o tloušťce 6mm (bližší specifikace viz kapitola 5). Geometrie použitých vrtáků z10 a go10 je uvedena v tab. 9.6, další informace v tab. 9.4. Posuv na otáčku nástroje byl volen následovně: $f=0,1; 0,2; 0,3$ mm, otáčky byly udržovány konstantní $n=1020$ min^{-1} , tzn. $v_c=32$ $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$.

Z teoretického rozboru delaminace v úvodu kapitoly 8 vyplynulo, že klíčovou roli sehrává příčné ostří vrtáku (tvoří převážnou část posuvové síly a tlačí na povrchové vrstvy laminátu, viz obr. 8.1). Jelikož posuvovou sílu od příčného ostří $F_{f,po}$ nelze měřit přímo, byly nejprve vrtány díry o průměru 10 mm do plného materiálu a poté do materiálu, ve kterém byly předvrtány otvory pro příčná ostří. Posuvová síla $F_{f,po}$ je rovna rozdílu naměřených hodnot, viz tab. 8.1.

Tab.8.1 Naměřené a vypočtené hodnoty posuvových sil a kroutících momentů

Vrták	Posuv na otáčku f [mm]	Naměřené hodnoty				Vypočtené hodnoty	
		Posuvová síla F_f [N]		Kroutící moment M_c [Nm]		$F_{f, po} = F_f^* - F_f^{**}$	$M_{c, po} = M_c^* - M_c^{**}$
		Při plném zatížení F_f^*	Bez příčného ostří F_f^{**}	Při plném zatížení M_c^*	Bez příčného ostří M_c^{**}		
z10	0,1	244	175	0,723	0,705	69	0,018
		251	187	0,735	0,719	64	0,016
		254	180	0,730	0,711	74	0,019
	0,2	324	198	0,990	0,940	126	0,05
		319	203	0,988	0,933	116	0,055
		336	206	0,997	0,941	130	0,056
	0,3	400	221	1,420	1,370	179	0,05
		409	239	1,429	1,360	170	0,069
		418	228	1,417	1,380	190	0,037
go10	0,1	157	119	0,654	0,635	38	0,019
		139	109	0,642	0,630	30	0,012
		150	117	0,650	0,625	33	0,025
	0,2	200	138	0,890	0,875	62	0,015
		203	133	0,899	0,867	70	0,032
		210	144	0,884	0,895	66	-0,011
	0,3	265	164	1,261	1,235	101	0,026
		250	155	1,250	1,245	95	0,005
		256	166	1,257	1,235	90	0,022

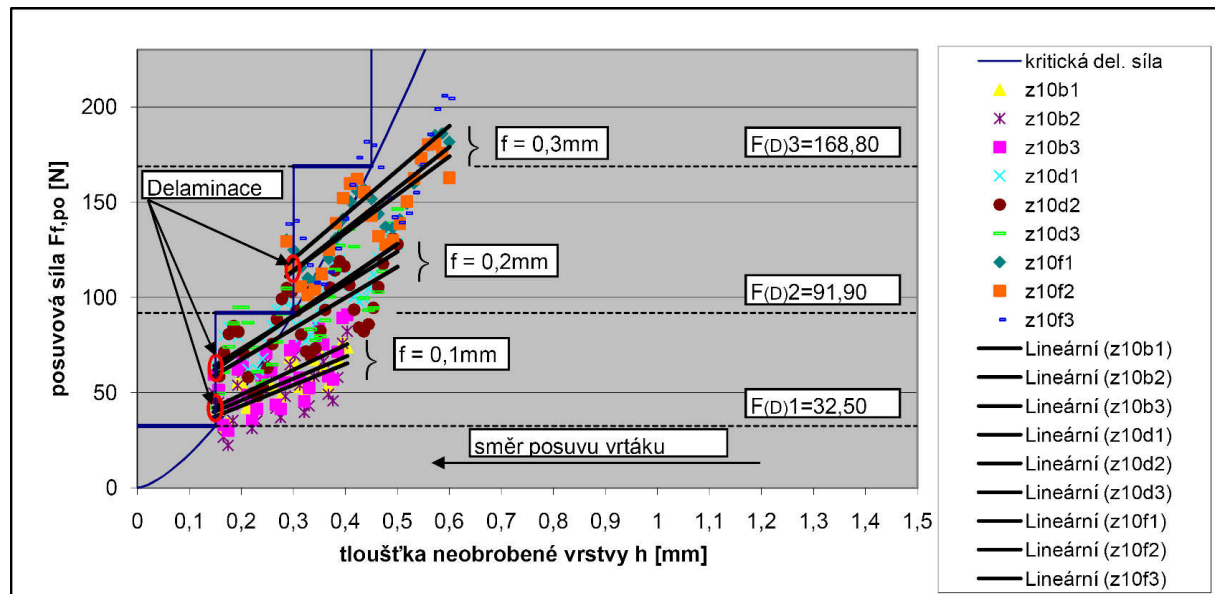
Po dosažení mechanických vlastností obráběného materiálu do rovnice (8.11) jsou pro poslední tři vrstvy materiálu hodnoty kritické delaminační síly následující: $F_{D1, del. výstup} = 32,50$ N; $F_{D2, del. výstup} = 91,90$ N a $F_{D3, del. výstup} = 168,80$ N. V grafickém vyjádření to znamená, že delaminace nastane tehdy, pokud posuvová síla od vrtáku protne křivky dané rovnicí 8.11, viz obr. 8.9. Pro úplnost je taktéž vykreslena kritická delaminační síla při vstupu nástroje do materiálu (pravá oblast grafu). Vrták se pohybuje ve směru zprava doleva a při $h=0$ mm příčné ostří prostupuje na povrch materiálu, obdobně je tomu u všech průběhů na obr. 8.10 až 8.14.



Obr.8.9⁸

- z10

Z vykreslených průběhů, obr. 8.10 vyplývá, že u vrtáků z10 dochází při posuvech na otáčku $f=0,1$ a $0,2$ mm k delaminaci jedné vrstvy kompozitu, zatím co při posuvu na otáčku $f=0,3$ mm jsou delaminovány poslední dvě vrstvy. To taktéž potvrdilo následné měření, kdy při $f=0,3$ mm byla tloušťka odštipnutého materiálu $h_{del}=0,3$ mm a při $f=0,1$ a $0,2$ mm odpovídala tloušťka odštipnutého materiálu jedné vrstvě laminátu, tzn. $h_{del}=h_t=0,15$ mm. Provedené měření taktéž potvrzuje předpoklad, že při obrábění laminátů dochází k delaminaci výhradně na rozhraní jednotlivých vrstev.

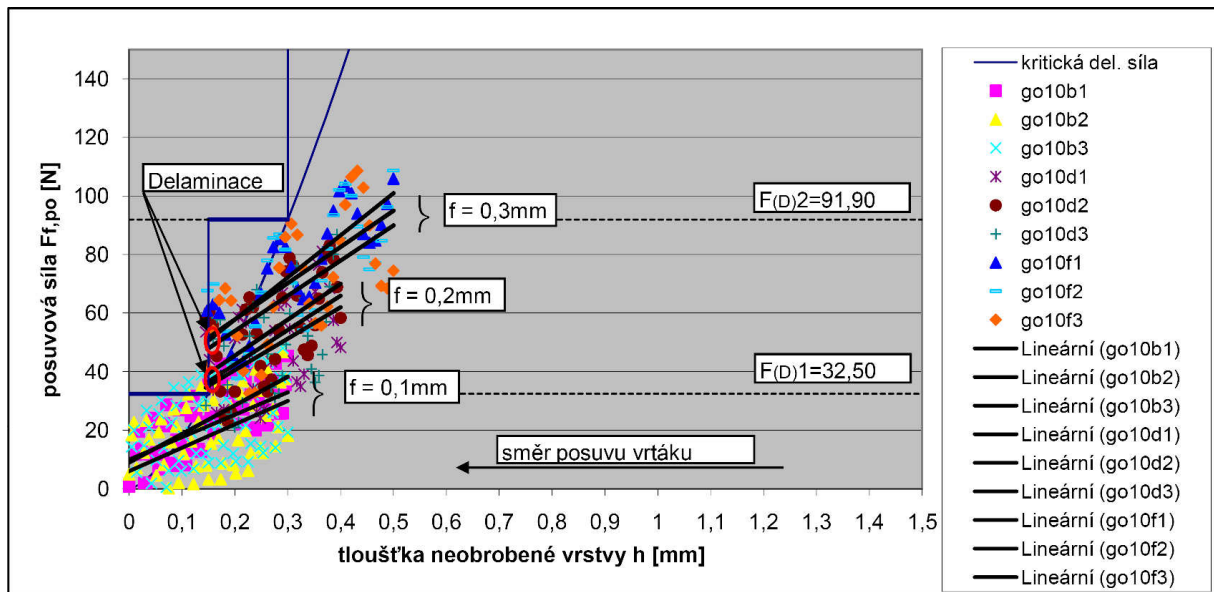


Obr.8.10 Posuvová síla od příčného ostří vs. kritická delaminační síla pro vrták z10

- go10

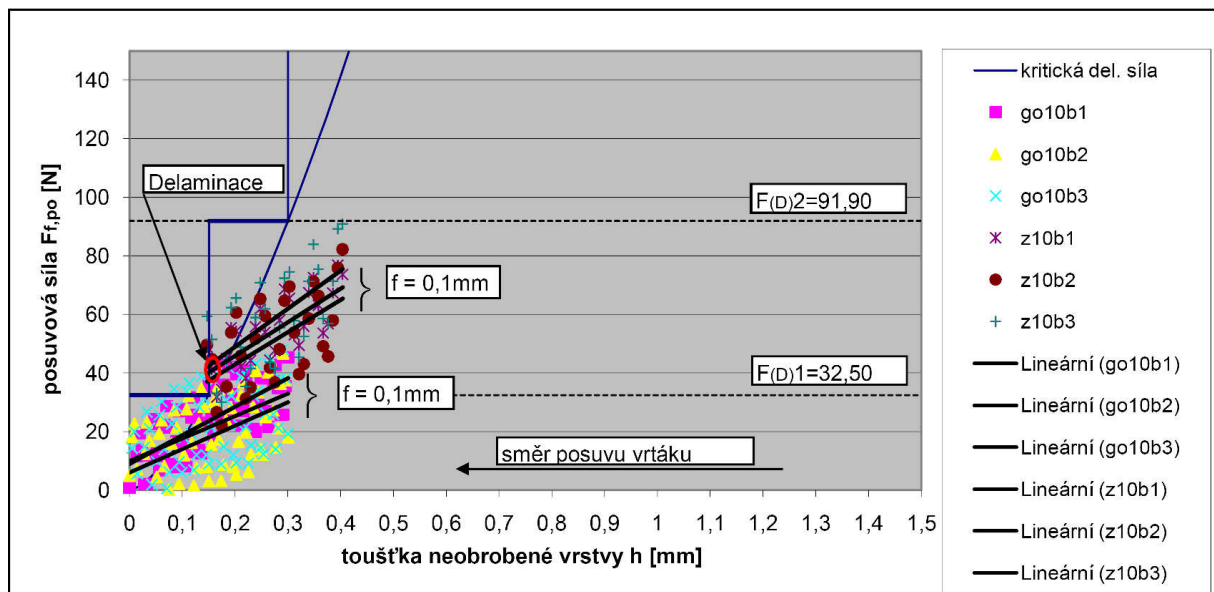
Z vykreslených průběhů, obr. 8.11 vyplývá, že u vrtáků go10 dochází při posuvech na otáčku $f=0,2$ a $0,3$ mm k delaminaci jedné vrstvy kompozitu, zatím co při posuvu na otáčku $f=0,1$ mm by neměla nastat žádná delaminace. Z vizuální kontroly a taktéž z následného měření tloušťky odštipnutého materiálu je však patrné, že i v tomto případě dochází k delaminaci a to poslední vrstvy kompozitu. Tuto skutečnost lze vysvětlit následujícími příčinami:

- Na vzniku delaminace se kromě příčného ostří podílí taktéž hlavní ostří vrtáku.
- Z pohledu na průběhy (obr. 8.10 a 8.11) je patrné, že když příčné ostří dosahuje povrchu vrtané desky, dochází k poklesu posuvové síly z důvodu vydutí neobrobeného materiálu pod nástrojem. V tomto případě nejsou splněny podmínky LELM, ze kterých navržený model delaminace vychází a tudíž je ho nutno brát pouze jako zjednodušený.

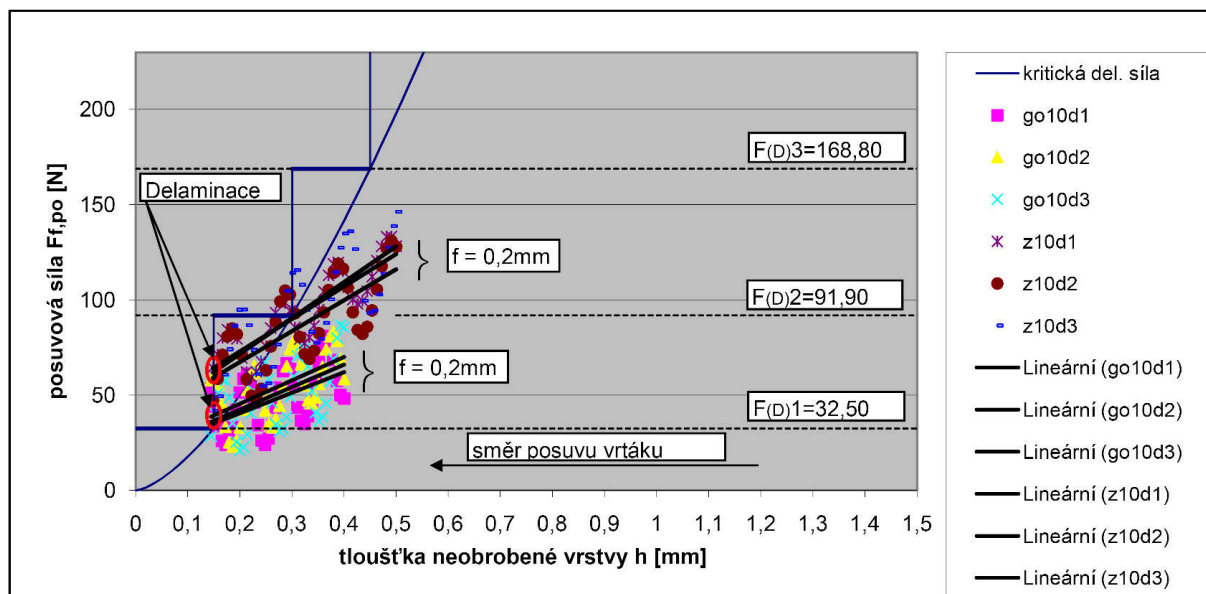


Obr.8.11 Posuvová síla od příčného ostří vs. kritická delaminační síla pro vrták go10

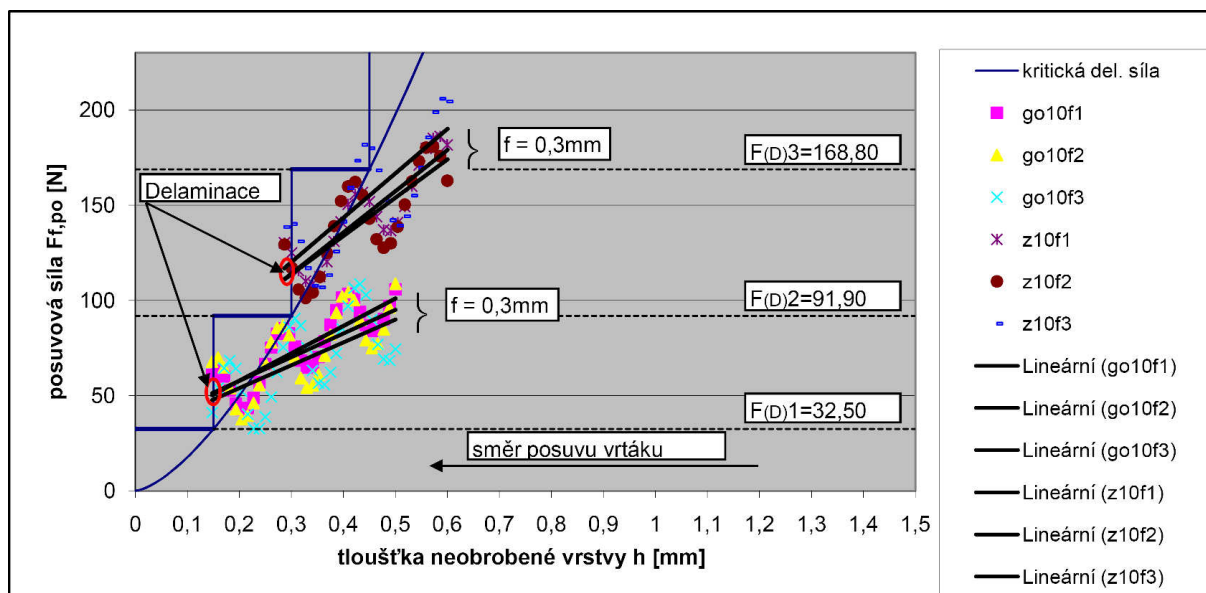
Porovnání velikostí posuvových sil od příčných ostří vrtáků z10 a go10 je pro jednotlivé posuvy $f=0,1$; $0,2$ a $0,3$ mm znázorněno na obr. 8.12 až 8.14.



Obr.8.12 Porovnání posuvových sil od příčných ostří vrtáků go10 a z10 při posuvu na otáčku $0,1$ mm



Obr.8.13 Porovnání posuvových sil od příčných ostří vrtáků go10 a z10 při posuvu na otáčku 0,2 mm



Obr.8.14 Porovnání posuvových sil od příčných ostří vrtáků go10 a z10 při posuvu na otáčku 0,3 mm

9. Vliv řezných podmínek na delaminaci

9.1 Návrh experimentu (DOE)

Pro zodpovězení otázek, které řezné podmínky a v jak velké míře ovlivňují vznik delaminace, se mimo jiné z důvodu neúměrně velkého počtu možných zkoušek nabízí využití statistického nástroje známého jako plánování experimentu, nebo krátce DOE (Design of Experiment).

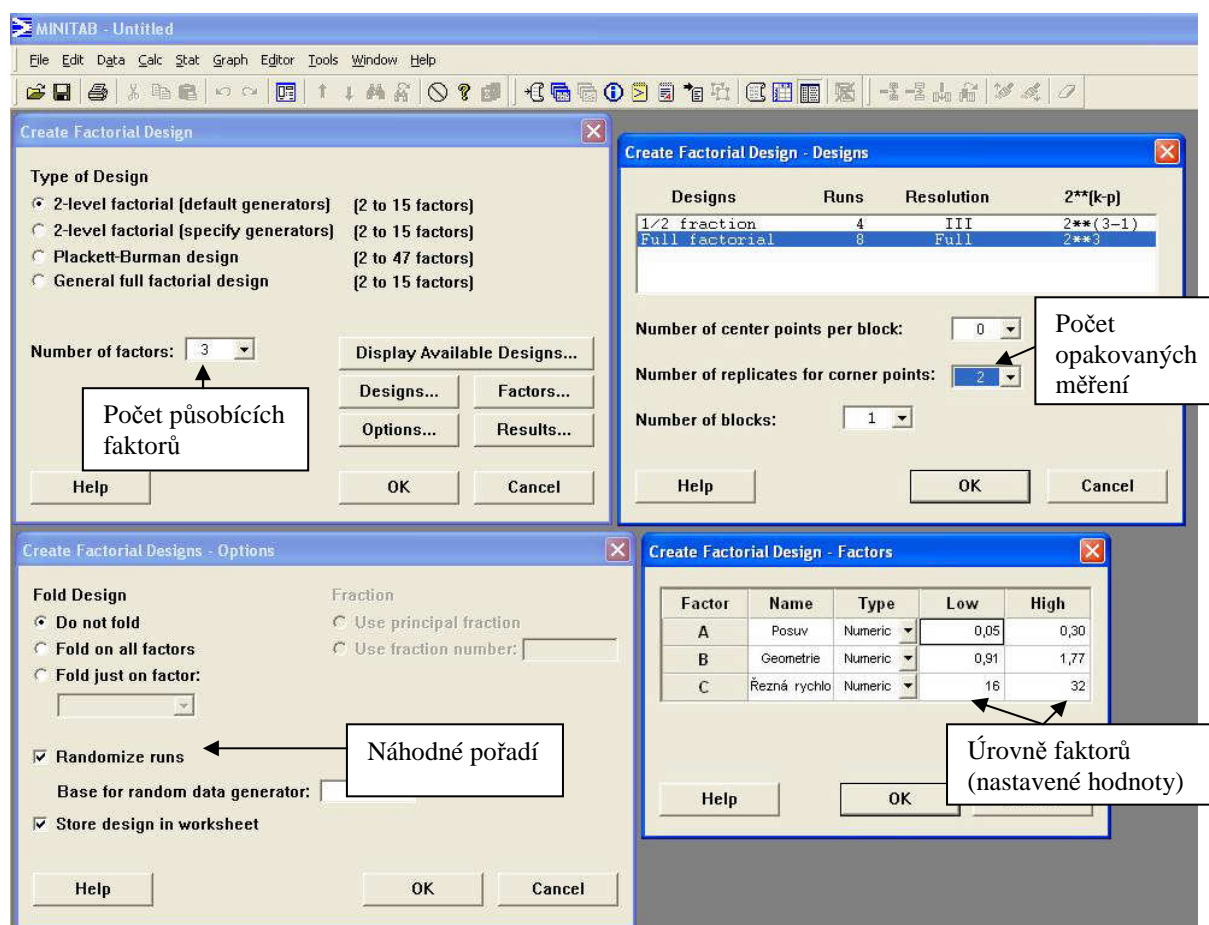
Plánovaný experiment je zkouška nebo posloupnost zkoušek, ve kterých je cílevědomě prováděna změna vstupních faktorů procesu tak, aby bylo možno pozorovat a identifikovat odpovídající změny výstupní proměnné – tzv. odezvy (response).

Protože plánovaný experiment představuje postup, který výrazně redukuje nutný počet zkoušek a přináší mnoho dalších výhod je doporučován standardy QS 9000 a ISO/TS 16494.⁴⁰

Vstupní faktory byly pro zvolený experiment následující: **A** - posuv, **B** – geometrie řezného nástroje a **C** – řezná rychlost. Odezvou byla velikost delaminace F_d . Počet replikací $n = 2$.

Obráběný materiál: jednosměrně vyztužený uhlíkovo/epoxidový laminát, viz kapitola 5. Použité vrtáky: z10 a go10, geometrie je uvedena v tab. 9.6, další informace v tab. 9.4. Zvolené úrovně faktorů: posuv na otáčku $f=0,05$ a $0,30$ mm, řezná rychlost $v_c=16$ a 32 m.min⁻¹, geometrie vrtáků, respektive velikost jejich příčných ostří $0,91$ a $1,77$ mm.

V prvním kroku byl vytvořen plán měření. Aby nevznikla systematická chyba (např. stejným pořadím úrovní faktoru), byly zkoušky provedeny v náhodném pořadí stanoveném statistickým softwarem MINITAB® R14, viz obr. 9.1. Tento software byl dále použit i pro vlastní analýzu vlivu faktorů.



Obr.9.1 Vytvoření plánu měření v prostředí Minitab

Navržený plán měření je uveden v tabulce 9.1. Protože každý z faktorů může nabývat pouze dvou hodnot (dvě úrovně), jedná se o návrh 2^3 faktoriálního experimentu.

Tab.9.1 Navržený plán experimentu

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
	StdOrder	RunOrder	CenterPt	Blocks	Posuv	Geometrie	Řezná rychlost
1	9	1	1	1	0,05	0,91	16
2	3	2	1	1	0,05	1,77	16
3	2	3	1	1	0,30	0,91	16
4	11	4	1	1	0,05	1,77	16
5	13	5	1	1	0,05	0,91	32
6	12	6	1	1	0,30	1,77	16
7	15	7	1	1	0,05	1,77	32
8	16	8	1	1	0,30	1,77	32
9	7	9	1	1	0,05	1,77	32
10	8	10	1	1	0,30	1,77	32
11	10	11	1	1	0,30	0,91	16
12	5	12	1	1	0,05	0,91	32
13	1	13	1	1	0,05	0,91	16
14	6	14	1	1	0,30	0,91	32
15	4	15	1	1	0,30	1,77	16
16	14	16	1	1	0,30	0,91	32

Naměřené výsledky, velikost delaminace F_d dle rovnice (8.3), jsou zapsány ve sloupci C8, viz tab. 9.2.

Tab.9.2 Pracovní list s naměřenými výsledky delaminace F_d

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
	StdOrder	RunOrder	CenterPt	Blocks	Posuv	Geometrie	Řezná rychlost	Delaminace
1	9	1	1	1	0,05	0,91	16	0,29
2	3	2	1	1	0,05	1,77	16	0,96
3	2	3	1	1	0,30	0,91	16	3,04
4	11	4	1	1	0,05	1,77	16	1,18
5	13	5	1	1	0,05	0,91	32	0,46
6	12	6	1	1	0,30	1,77	16	4,61
7	15	7	1	1	0,05	1,77	32	1,16
8	16	8	1	1	0,30	1,77	32	5,01
9	7	9	1	1	0,05	1,77	32	1,23
10	8	10	1	1	0,30	1,77	32	4,65
11	10	11	1	1	0,30	0,91	16	2,56
12	5	12	1	1	0,05	0,91	32	0,37
13	1	13	1	1	0,05	0,91	16	0,43
14	6	14	1	1	0,30	0,91	32	3,51
15	4	15	1	1	0,30	1,77	16	4,29
16	14	16	1	1	0,30	0,91	32	2,94

Získaná data v tabulce 9.2 lze dále za pomoci Minitabu analyzovat, výstup je následující:

```

Estimated Effects and Coefficients for Delaminace (coded units)

Term                Effect          Coef    SE Coef    T      P
Constant            3,06625        2,29313  0,05824   39,37  0,000
Posuv                1,18625        1,53313  0,05824   26,32  0,000
Geometrie           0,24625        0,59313  0,05824   10,18  0,000
Řezná rychlost     0,44125        0,12312  0,05824    2,11  0,067
Posuv*Geometrie    0,15625        0,22063  0,05824    3,79  0,005
Posuv*Řezná rychlost 0,00625        0,07812  0,05824    1,34  0,217
Geometrie*Řezná rychlost 0,00625        0,00312  0,05824    0,05  0,959
Posuv*Geometrie*Řezná rychlost -0,02875       -0,01438  0,05824   -0,25  0,811

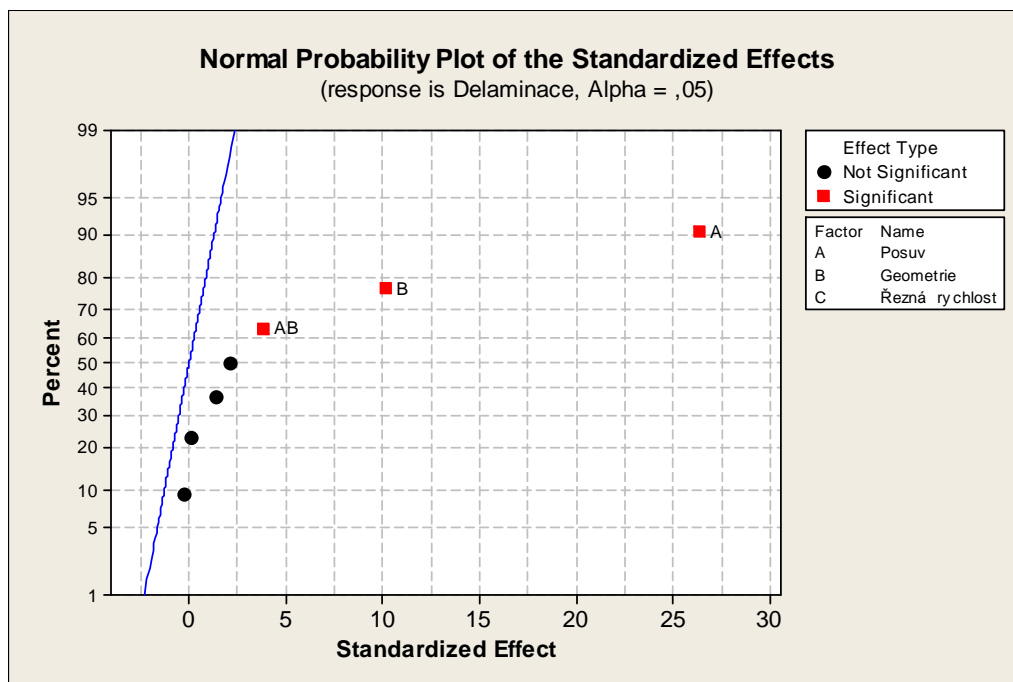
S = 0,232957    R-Sq = 99,03%    R-Sq(adj) = 98,18%

Analysis of Variance for Delaminace (coded units)

Source              DF    Seq SS    Adj SS    Adj MS    F      P
Main Effects        3    43,4789   43,4789   14,4930   267,06  0,000
2-Way Interactions  3     0,8766    0,8766    0,2922     5,38  0,025
3-Way Interactions  1     0,0033    0,0033    0,0033     0,06  0,811
Residual Error      8     0,4342    0,4342    0,0543
  Pure Error        8     0,4341    0,4341    0,0543
Total               15    44,7929
    
```

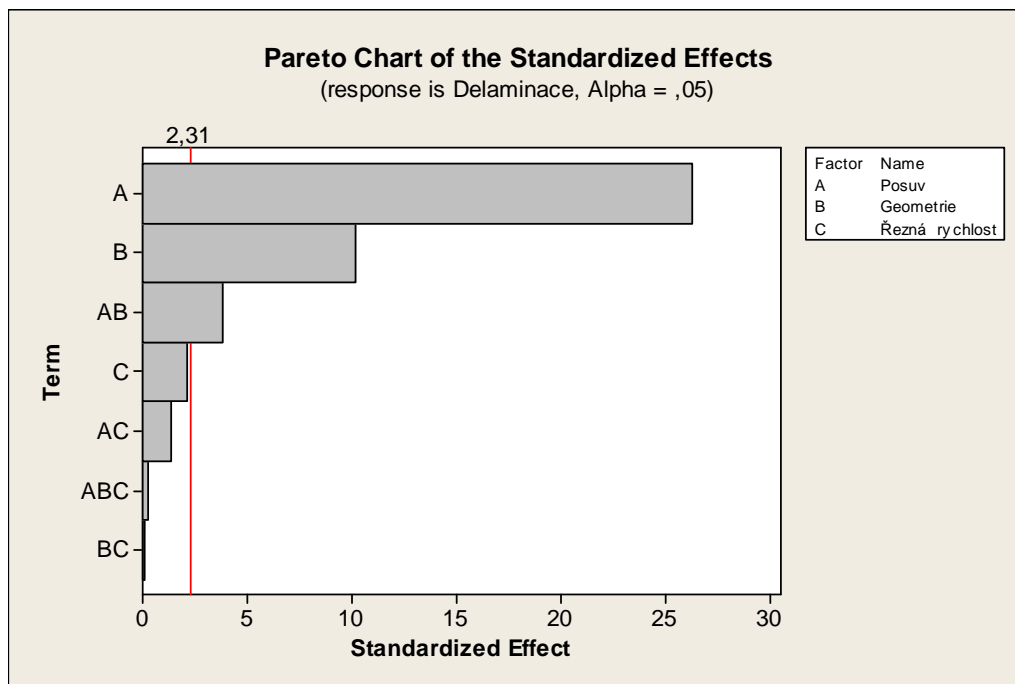
Pokud je $P < \alpha$ (hladina významnosti $\alpha = 0,05$) pak faktor má vliv na výnos. Je-li $P > \alpha$ ($\alpha = 0,05$) potom faktor nemá vliv na výnos. To znamená, že významný vliv na delaminaci má pouze posuv ($P = 0,000$), geometrie ($P = 0,000$) a interakce posuv*geometrie ($P = 0,005$).

Z grafického výstupu lze dále vizuálně identifikovat důležité účinky (vlivy) faktorů a srovnávat jejich relativní velikosti. Graf pravděpodobnosti normovaného účinku je uveden na obr. 9.2. Faktory, které mají vliv na delaminaci jsou zobrazeny červenými čtverečky.



Obr.9.2

Ještě více názornější je zobrazení Paretova diagramu, obr. 9.3. Vliv mají ty faktory, jejichž obdélník se dostane za kritickou hodnotu významnosti pro riziko $\alpha=0,05$ (v grafu svislá čára). Největší vliv má tedy posuv, potom geometrie nástroje a interakce těchto dvou faktorů.



Obr.9.3

Nevýznamné členy mohou být postupně z modelu odstraněny. Nejméně významné jsou interakce: druhého řádu B*C, třetího řádu A*B*C a druhého řádu A*C. Vliv faktoru C (řezná rychlosti) se tímto zásahem může zvýšit. Výsledek nové analýzy je následující:

```

Estimated Effects and Coefficients for Delaminace (coded units)

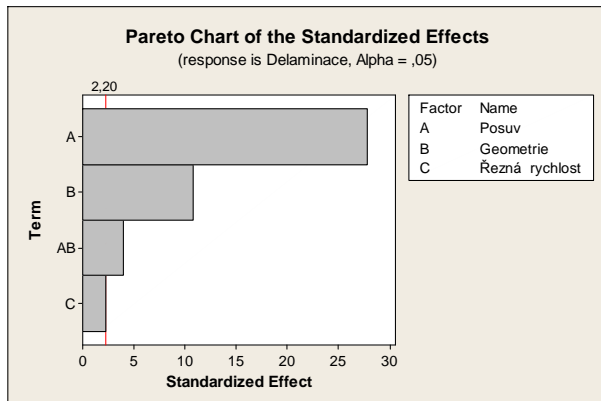
Term          Effect    Coef    SE Coef    T        P
Constant          2,2931  0,05515  41,58  0,000
Posuv            3,0663  1,5331  0,05515  27,80  0,000
Geometrie       1,1863  0,5931  0,05515  10,76  0,000
Řezná rychlost  0,2462  0,1231  0,05515   2,23  0,047
Posuv*Geometrie  0,4413  0,2206  0,05515   4,00  0,002

S = 0,220592   R-Sq = 98,81%   R-Sq(adj) = 98,37%

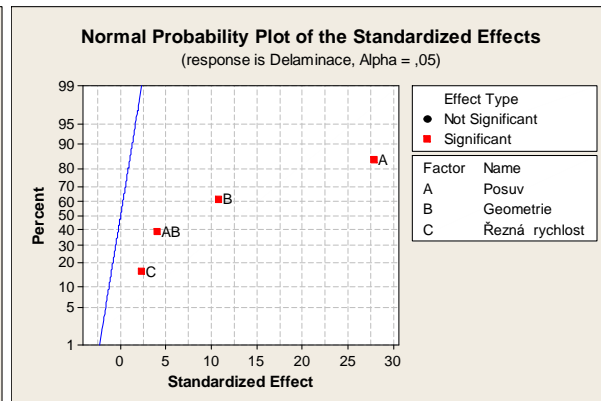
Analysis of Variance for Delaminace (coded units)

Source          DF    Seq SS    Adj SS    Adj MS    F        P
Main Effects     3   43,4789  43,4789  14,4930  297,84  0,000
2-Way Interactions  1    0,7788   0,7788   0,7788   16,00  0,002
Residual Error   11    0,5353   0,5353   0,0487
  Lack of Fit     3    0,1011   0,1011   0,0337    0,62  0,621
  Pure Error      8    0,4341   0,4341   0,0543
Total            15   44,7929
    
```

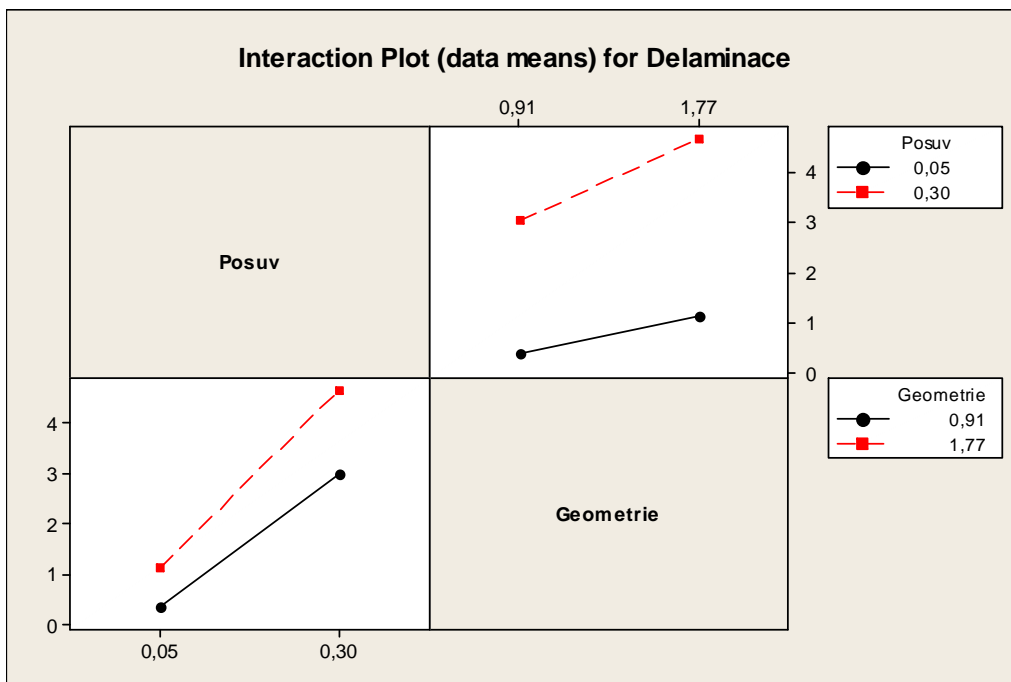
V takto navrženém modelu je řezná rychlost významná s hodnotou $P(0,047) < 0,05$. Paretoův diagram a graf pravděpodobnosti normovaného účinku je uveden a obr. 9.4 a 9.5. Graf interakcí zobrazující vzájemné působení posuvu a geometrie na sledovanou veličinu (delaminaci) je uveden na obr. 9.6.



Obr.9.4



Obr.9.5



Obr.9.6

Nejvhodnější regresní model pro delaminaci je po doplnění koeficientů z analýzy viz tab. 9.3 ve tvaru:

$$F_d = -1,108 + 6,765 \cdot f + 0,661 \cdot \text{geometrie} + 0,015 \cdot v_c + 4,105 \cdot f \cdot \text{geometrie} \quad (9.1)$$

Tab.9.3 Odhadované koeficienty modelu delaminace

Term	Coef
Constant	-1,10843
Posuv	6,76477
Geometrie	0,661047
Řezná rychlost	0,0153906
Posuv*Geometrie	4,10465

9.2 Posuv a geometrie vrtáku vs. delaminace

Na základě DOE analýzy, kapitola 9.1, byly provedeny další zkoušky omezené na faktory, které dle Paretova diagramu (obr. 9.4) nejvíce ovlivňují tvorbu delaminace, tj. posuv a geometrie nástroje (délka příčného ostří). Použité nástroje jsou uvedeny v tabulce 9.4, řezné podmínky v tabulce 9.5.

Tab.9.4 Použité nástroje

Výrobce	Označení	Materiál	Povlak	Stav příčného ostří
Zbrojovka	z6; z10	HSS	-	Bez úpravy
Gühring	go6; go10	HSS	TiN	Zkráceno podbrusem
Mitsubishi	mk6; mk10	SK	TiN	Plně odstraněno výrazným podbrusem

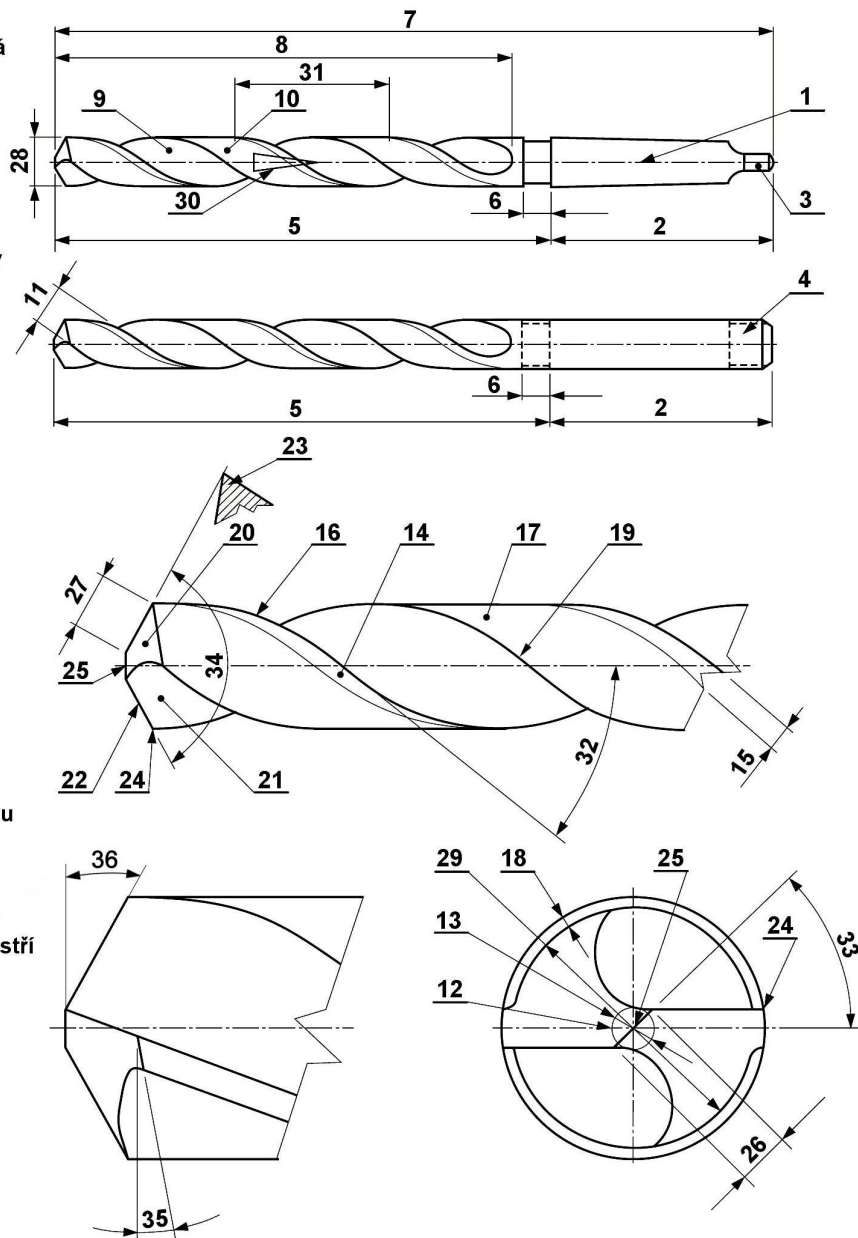
Pozn.: Číslo v označení nástroje značí průměr vrtáku.

Tab.9.5 Řezné podmínky pro zkoušky delaminace

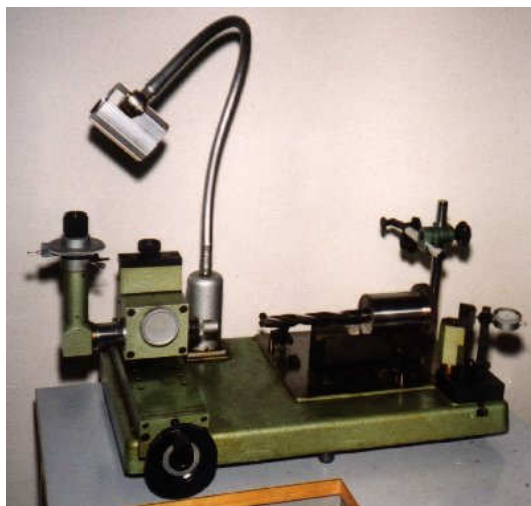
Vrták	Průměr D [mm]	Otáčky n [min ⁻¹]	Řezná rychlost v _c [m.min ⁻¹]	Posuv na otáčku f [mm]
z10; go10; mk10	10	510; 1020	16; 32	0,05; 0,10; 0,15; 0,20; 0,25; 0,30
z6; go6; mk6	6	850; 1700	16; 32	0,05; 0,10; 0,15; 0,20; 0,25; 0,30

Před použitím byly u všech vrtáků změřeny základní geometrické parametry (jmenovitý průměr, délky hlavních ostří, délka příčného ostří, doplňkové nástrojové úhly nastavení hlavních ostří ψ_r , nástrojový úhel špičky ϵ_r , nástrojové boční úhly hřbetu α_f , úhel stoupání šroubovice λ - viz obrázek 9.7) - souhrnný přehled výsledků je uveden v tabulce 9.6. Jmenovitý průměr vrtáků byly měřeny pomocí mikrometru s plochými doteky, pro měření ostatních parametrů byla použita měřicí platforma Gühring PG 100A (obr. 9.8). Na obrázku 9.8a je vrták v poloze pro měření délek hlavních ostří a příčného ostří, na obrázku 9.8b v poloze pro měření nástrojových úhlů.

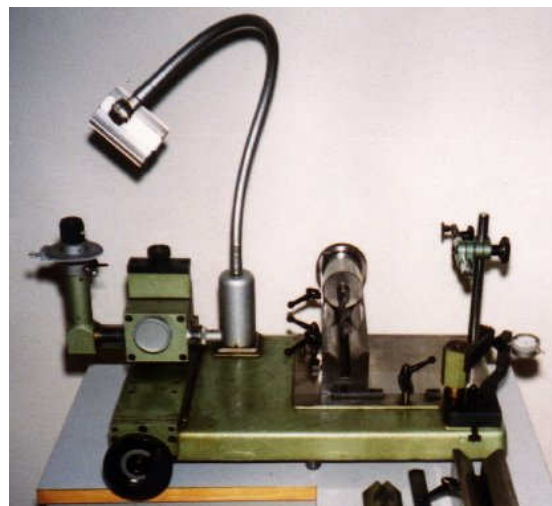
- 1 - osa
- 2 - stopka (kuželová, hladká
válnová, hladká válková
s unáščem)
- 3 - vyražec
- 4 - unášec
- 5 - tělo
- 6 - krček
- 7 - celková délka
- 8 - délka šroubovitě drážky
- 9 - šroubovitá drážka
- 10 - druhý vedlejší hřbet
- 11 - šířka vedlejšího hřbetu
- 12 - jádro
- 13 - tloušťka jádra
- 14 - první vedlejší hřbet
(fazetka)
- 15 - šířka fazetky
- 16 - vedlejší ostří
- 17 - odlehčení vedl. hřbetu
- 18 - hloubka odlehčení
- 19 - pata
- 20 - hlavní hřbet
- 21 - čelo
- 22 - hlavní ostří
- 23 - břít
- 24 - vnější špička
- 25 - příčné ostří
- 26 - délka příčného ostří
- 27 - délka hlavního ostří
- 28 - jmenovitý průměr vrtáku
- 29 - průměr odlehčení
- 30 - zpětná kuželovitost
- 31 - stoupání šroubovice
- 32 - úhel šroubovitě drážky
- 33 - úhel sklonu příčného ostří
- 34 - úhel špičky
- 35 - úhel hřbetu
- 36 - doplňkový úhel nastavení
hl. ostří



Obr.9.7⁵⁶



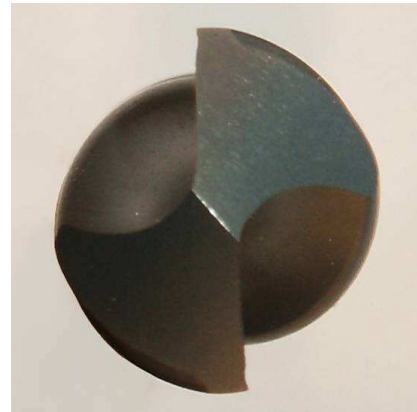
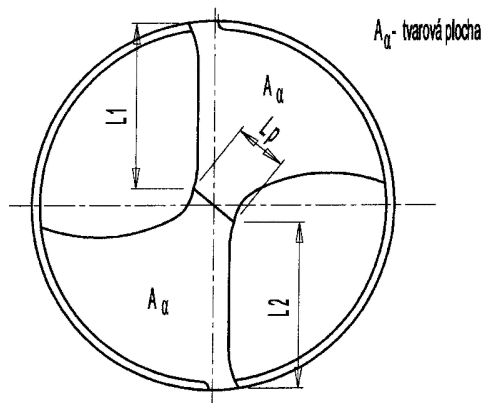
Obr.9.8a



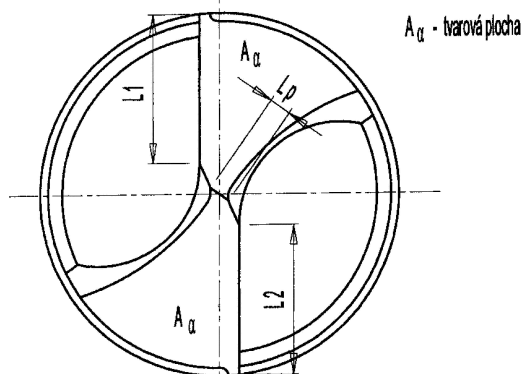
Obr.9.8b

Z výsledků měření v tabulce 9.6 je zřejmé, že hodnocené nástroje nevykazují žádné významné úchytky, či rozdíly v naměřených geometrických parametrech, které by mohly výraznějším způsobem ovlivnit zkoušky delaminace materiálu. U jednotlivých skupin vrtáků byla taktéž pečlivě prohlédnuta a zdokumentována jejich špička (tvar hřbetu a čela, délka příčného ostří). Rozdíly v konstrukci a ve způsobu ostření vrtáků jsou patrné z obrázků 9.9 až 9.11.

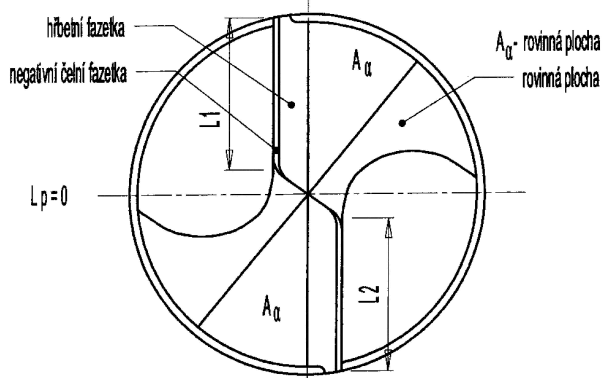
Protože se jednotlivé typy vrtáků od sebe výrazně liší konstrukcí a způsobem ostření, byla taktéž pečlivě prohlédnuta a zdokumentována jejich špička (tvar hřbetu a čela, délka příčného ostří) – viz obrázky 9.9 – 9.11.



Obr.9.9 Úprava špičky vrtáku z6; 10



Obr.9.10 Úprava špičky vrtáku go6; 10



Obr.9.11 Úprava špičky vrtáku mk6; 10

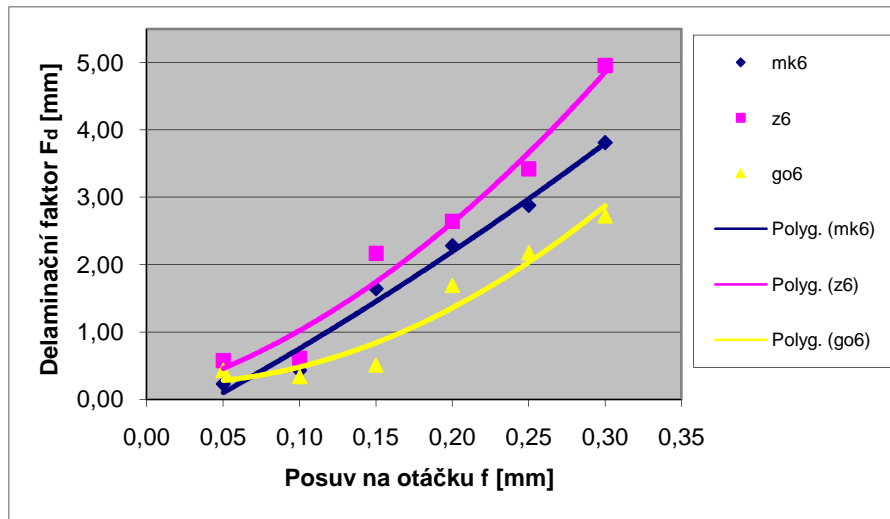
Tab.9.6 Geometrie použitých vrtáků

Jmen. rozm. [mm]	Označení nástroje	Průměr D [mm] (u špičky)	Délka ostří [mm]			Úhel [°]					
			hlavní		příčné	nastavení (doplňkový)		špičky ϵ_r	hřbetu		šroubovice λ
			1	2		Ψ_{r1}	Ψ_{r2}		α_{f1}	α_{f2}	
6	go6	6,00	2,62	2,64	0,51	28°40'	28°20'	123°00'	12°10'	12°30'	29°10'
10	go10	9,99	4,03	4,12	0,91	29°20'	29°00'	121°40'	11°00'	11°40'	29°20'
6	mk6	5,99	2,36	2,34	0	19°00'	19°20'	141°40'	11°10'	11°30'	29°00'
10	mk10	9,99	3,76	3,70	0	19°10'	19°40'	141°10'	11°50'	11°40'	29°40'
6	z6	6,00	2,99	3,10	1,43	30°50'	31°30'	117°40'	15°00'	14°30'	25°40'
10	z10	9,99	5,14	5,31	1,77	31°10'	31°00'	117°50'	13°30'	13°00'	24°40'

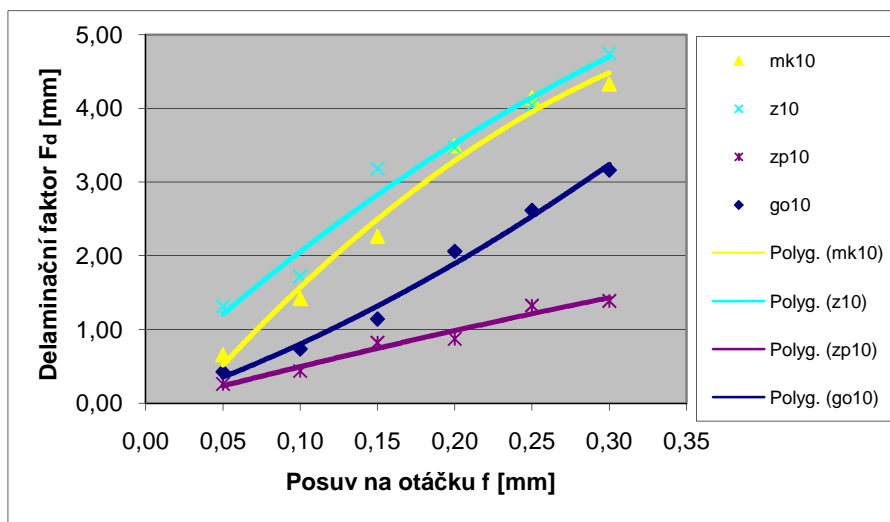
Tab.9.7 Naměřené hodnoty delaminace + delaminační faktor F_d

Označení nástroje	Posuv na otáčku f [mm]	Maximální průměr delaminace D_{Max} [mm] pro vrtané díry 1 ÷ 5					- x [mm]	Delaminační faktor F_d [mm]
		1	2	3	4	5		
		mk6	0,05	6,40	6,40	6,42		
	0,10	6,71	6,84	6,76	6,97	7,02	6,86	0,43
	0,15	9,76	9,39	9,01	8,66	9,61	9,29	1,64
	0,20	10,96	9,40	11,34			10,57	2,28
	0,25	11,30	11,86	12,12			11,76	2,88
	0,30	13,93	13,77	13,18			13,63	3,81
go6	0,05	6,34	6,59	6,55	7,39	7,44	6,86	0,43
	0,10	6,25	6,69	6,71	6,78	6,96	6,68	0,34
	0,15	6,79	6,80	6,97	7,08	7,44	7,02	0,51
	0,20	9,91	7,82	10,41			9,38	1,69
	0,25	9,88	10,46	10,71			10,35	2,18
	0,30	11,14	11,19	12,00			11,44	2,72
z6	0,05	6,71	6,88	7,25	7,46	7,43	7,15	0,57
	0,10	6,71	6,76	6,82	7,18	8,62	7,22	0,61
	0,15	10,98	10,29	9,83	10,46	10,07	10,33	2,16
	0,20	11,10	10,93	11,79			11,27	2,64
	0,25	12,54	13,46	12,50			12,83	3,42
	0,30	15,52	15,05	17,16			15,91	4,96
mk10	0,05	11,26	11,34	11,34			11,31	0,66
	0,10	13,11	12,28	13,13			12,84	1,42
	0,15	14,59	14,68	14,32			14,53	2,27
	0,20	17,12	15,78	18,05			16,98	3,49
	0,25	18,11	18,31	18,45			18,29	4,15
	0,30	16,66	19,50	19,81			18,66	4,33
go10	0,05	10,91	10,91	10,74			10,85	0,43
	0,10	11,25	11,50	11,67			11,47	0,74
	0,15	13,41	11,82	11,63			12,29	1,14
	0,20	13,34	13,34	15,68			14,12	2,06
	0,25	14,88	15,13	15,68			15,23	2,62
	0,30	16,07	15,88	17,01			16,32	3,16
z10	0,05	12,31	12,45	13,11			12,62	1,31
	0,10	12,13	13,65	14,52			13,43	1,72
	0,15	15,64	14,46	18,98			16,36	3,18
	0,20	15,01	17,12	18,68			16,94	3,47
	0,25	17,76	17,41	19,08			18,08	4,04
	0,30	19,16	19,30	20,01			19,49	4,75
z10 předvrtáno	0,05	10,41	10,53	10,63			10,52	0,26
	0,10	10,63	10,70	11,30			10,87	0,44
	0,15	11,82	11,51	11,60			11,64	0,82
	0,20	11,55	11,63	12,06			11,75	0,87
	0,25	12,36	12,62	12,97			12,65	1,32
	0,30	12,58	12,40	13,35			12,78	1,39

Delaminace povrchových vrstev laminátu byla při vrtání nástroji z6, z10 podle očekávání velmi vysoká, jak dokumentují obrázky 9.12 a 9.13. Tyto nástroje nemají žádnou úpravu (podbrus) příčného ostří, čímž dochází ke zvýšení posuvové síly. Při použití vrtáku z10 dosáhla velikost delaminace již při posuvu $f=0,05$ mm hodnoty $F_d=1,31$ mm. Vztah pro výpočet delaminačního faktoru F_d je uveden v kapitole 8.1, viz rovnice (8.3). Při zvyšování posuvu na $f = 0,3$ mm současně narůstala velikost delaminace až na hodnotu $F_d=4,75$ mm, viz tab. 9.7.



Obr.9.12



Obr.9.13

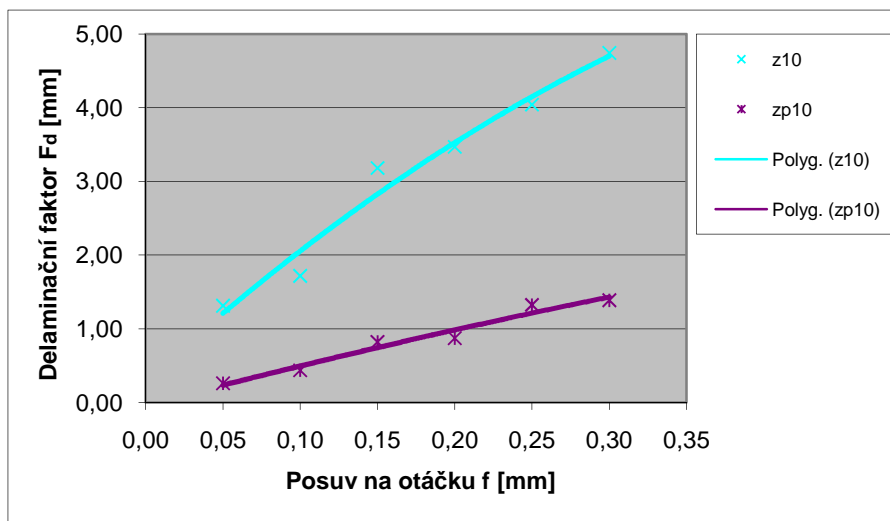
V případě vrtáků z6 se velmi zajímavým jeví fakt, že poškození oblasti kolem vrtané díry je větší než u vrtáků go10. To potvrzuje předpoklad, že hlavní vliv má příčné ostří vrtáku. Vrták z6 má sice o 4 mm menší průměr, délka jeho příčného ostří je však větší o 0,52 mm, viz tab. 9.6. Při porovnání stejných průměrů z10/go10; z6/go6 jsou hodnoty delaminačního faktoru F_d přibližně 2,15x; 2,05x menší (délka příčného ostří 1,95x; 2,8x kratší).

Pozn.: Pro každou vrtanou díru musel být použit nový nástroj, protože intenzita opotřebení vrtáků z rychlořezných ocelí je při obrábění kompozitů s uhlíkovými vlákny velmi vysoká a opotřebované ostří by vedlo ke značně skresleným výsledkům.

U vrtáků mk6;10 byla předpokládána nejvyšší kvalita (nejmenší poškození) v okolí vrtané díry a to z toho důvodu, že tyto nástroje mají výrazný rovinný podbrus hřbetní plochy, čímž je zcela odstraněno příčné ostří. Ve skutečnosti jsou hodnoty delaminačního faktoru F_d v porovnání s nástroji z6;10 jen mírně nižší a ve srovnání s nástroji go6;10 jsou hodnoty F_d naopak vyšší. S tím také souvisí naměřená velikost posuvové síly, kdy pořadí vrtáků od nejmenší po největší sílu je následující: go6; mk6; go10; z6; mk10; z10, viz tab. 9.8. Stejně pořadí platí pro velikost vzniklé delaminace. Logicky plyne přímá úměra, čím vyšší posuvová síla, tím větší poškozená oblast v okolí výstupu vrtáku.

Pozn.: Vrtáky mk6;10 jsou ze slinutého karbidu s povlakem TiN, tudíž všechny díry byly vrtány jedním nástrojem.

Pro jednoznačné posouzení vlivu příčného ostří byly vrtány díry do kompozitu s již předvrtanými otvory, které odpovídaly velikosti příčného ostří. Pro experiment byl vybrán nástroj z10, u kterého byly zaznamenány nejvyšší hodnoty delaminace. Porovnání delaminačního faktoru F_d při vrtání do plného materiálu a do již předvrtaného otvoru je uvedeno na obr. 9.14. Z vykreslených průběhů na obr. 9.14 a tab. 9.7 je patrné, že dochází ke snížení vzniku delaminace o cca 70 %. To koresponduje s faktem, že příčné ostří může tvořit až 70 % posuvové síly. Analogicky lze usuzovat, že zbylých 30 % delaminace způsobuje účinek hlavního ostří. Výše uvedený závěr je zjednodušený, protože vždy je nutno uvažovat vliv obráběného materiálu, řezné podmínky (nástrojový materiál), tuhost stroje, upnutí a opotřebení nástroje.




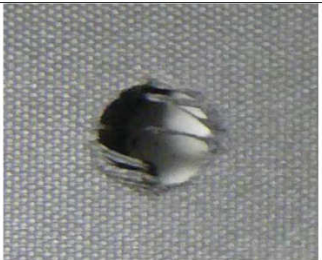



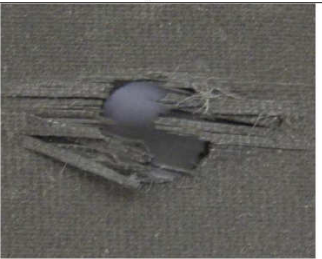
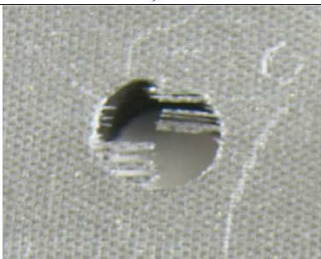
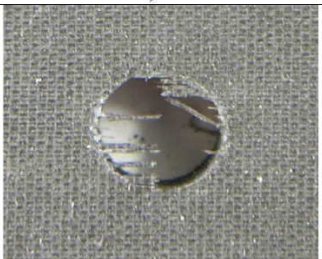


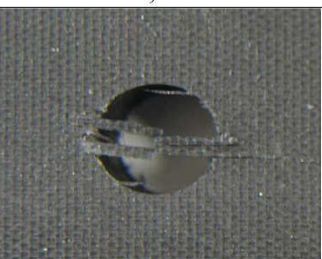





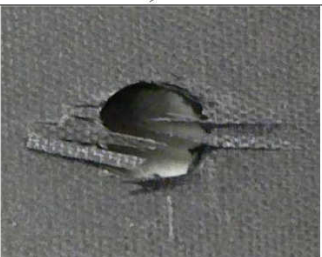

Obr.9.14

Tab.9.8 Naměřené hodnoty posuvové síly a kroutícího momentu při zkouškách delaminace



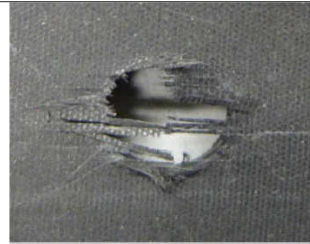

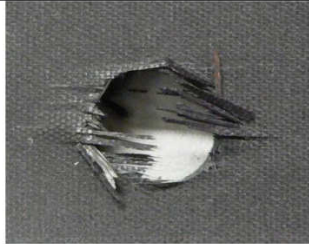









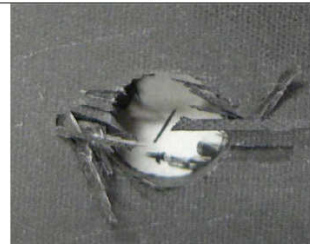
Číslo díry	Označení nástroje (výrobce)	F _f	M _c	F _f	M _c	F _f	M _c	F _f	M _c	F _f	M _c	F _f	M _c
		[N]	[Nm]	[N]	[Nm]	[N]	[Nm]	[N]	[Nm]	[N]	[Nm]	[N]	[Nm]
		f=0,05 mm		f=0,10 mm		f=0,15 mm		f=0,20 mm		f=0,25 mm		f=0,30 mm	
1	z6	135	0,206	152	0,314	181	0,350	226	0,450	242	0,510	263	0,570
2		130	0,205	159	0,305	175	0,346	234	0,459	239	0,505	258	0,565
3		141	0,210	149	0,310	189	0,352	221	0,448	249	0,514	269	0,573
4		128	0,201	161	0,320	183	0,351						
5		134	0,195	157	0,318	190	0,357						
1	go6	72	0,170	86	0,240	99	0,280	140	0,365	170	0,420	193	0,492
2		82	0,180	91	0,239	101	0,291	137	0,360	171	0,401	189	0,489
3		78	0,175	90	0,249	97	0,285	143	0,369	171	0,450	195	0,499
4		75	0,173	89	0,233	104	2,287						
5		82	0,179	93	0,238	104	2,283						
1	mk6	95	0,180	118	0,260	140	0,302	187	0,388	204	0,451	233	0,512
2		100	0,182	125	0,263	146	0,305	182	0,367	207	0,450	244	0,516
3		98	0,180	121	0,266	137	0,299	179	0,386	210	0,435	249	0,521
4		93	0,188	115	0,261	142	0,300						
5		95	0,179	124	0,260	150	0,307						
1	z10	208	0,547	244	0,723	285	0,860	324	0,990	368	1,340	400	1,420
2		219	0,550	251	0,735	271	0,856	319	0,988	352	1,351	409	1,429
3		211	0,543	254	0,730	292	0,863	336	0,997	375	1,346	418	1,417
1	go10	126	0,498	157	0,654	188	0,785	200	0,890	228	1,059	265	1,261
2		134	0,505	139	0,642	163	0,792	203	0,899	212	1,050	250	1,250
3		122	0,518	150	0,650	178	0,778	210	0,884	239	1,046	256	1,257
1	mk10	200	0,529	229	0,720	253	0,850	293	0,970	337	1,324	360	1,380
2		197	0,525	216	0,715	261	0,841	282	0,973	345	1,330	372	1,377
3		196	0,537	225	0,728	249	0,848	298	0,964	326	1,334	352	1,386
1	zp10	168	0,529	175	0,705	185	0,845	198	0,940	210	1,251	221	1,370
2		162	0,523	187	0,719	194	0,839	203	0,933	218	1,240	239	1,360
3		171	0,535	180	0,711	191	0,849	206	0,941	218	1,246	228	1,380

Snímky vybraných povrchů vrtaných děr, tab. 9.9 a 9.10, pouze potvrzují výše uvedené skutečnosti. Již při prvním pohledu je nejvíce patrná delaminace u vrtáků z6;10, zatím co nejméně poškozeno je okolí děr vrtaných nástroji go6;10. Z vizuálního hodnocení je taktéž patrné, že v ani jednom případě nebyla díra vrtána „čistě“ bez okolního poškození. Ve všech případech docházelo k delaminaci povrchových vrstev výhradně ve směru os vyztužujících vláken a kromě samotné delaminace se často na okraji děr objevovala nedostatečně obrobena (popř. vytažená) vlákna.

Tab.9.9 Vzhled vybraných povrchů vrtaných děr ϕ 6

označení	Posuv na otáčku f [mm]		
	0,05	0,10	0,15
z6			
			
			
			
			
			

Tab.9.10 Vzhled vybraných povrchů vrtaných děr $\phi 10$

označení	Posuv na otáčku f [mm]		
	0,05	0,10	0,15
z10			
	0,20	0,25	0,30
			
go10	0,05	0,10	0,15
			
	0,20	0,25	0,30
mk10			
	0,20	0,25	0,30
			

9.3 Opotřebení vrtáku vs. delaminace

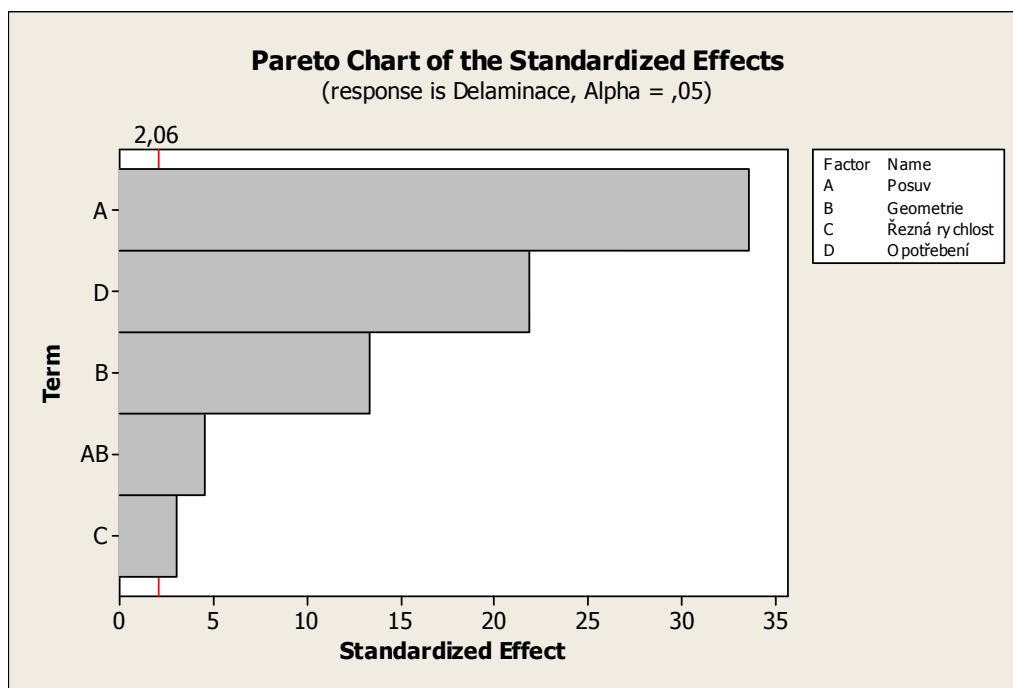
Po provedení praktických zkoušek bylo zjištěno, že kromě řezných podmínek má na tvorbu delaminace významný vliv také stav ostří nástroje. Jestliže nástroj není dostatečně ostrý, vlákna nejsou podrobena stříhové deformaci, tzn. mají sklon se před nástrojem ohýbat, jsou vytahována (odvíjena) z matrice a opotřebení nástroje navíc zvyšuje posuvovou sílu a tím i delaminaci materiálu. Aby bylo možno vyloučit interakci opotřebení nástroje s dalšími faktory, byl návrh experimentu v kapitole 9.1 doplněn o faktor hřbetního opotřebení VB s úrovněmi: VB=0,1 mm a VB=0,3 mm. Obě úrovně (kritéria) VB nelze přesně zaručit, protože k delaminaci dochází při výstupu nástroje a tudíž musí být k připravenému opotřebení přičteno opotřebení vzniklé při vrtání aktuální sledované díry. Abrasivní účinek uhlíkových vyztužujících vláken je při použití HSS vrtáků tak vysoký, že pro úroveň VB=0,1 mm je nutno, při tloušťce kompozitu 6 mm, použít vždy nový nástroj a pro VB=0,3 mm nástroj s předem připraveným opotřebením VB=max. 0,25 mm (tomu odpovídají pouze tři vyvrtané díry).

Naměřené výsledky, velikost delaminace F_d dle rovnice (8.3), jsou zapsány v sloupci C9, viz tab. 9.11. Protože v dříve navrženém 2^3 faktoriálním experimentu byla každá díra vrtána vždy novým nástrojem, byla naměřená data přejata do nového 2^4 faktoriálního experimentu pro úroveň VB=0,1 mm. Tyto nástroje byly dále opotřebeny na hodnotu VB=0,25 mm a použity pro úroveň VB=0,3 mm.

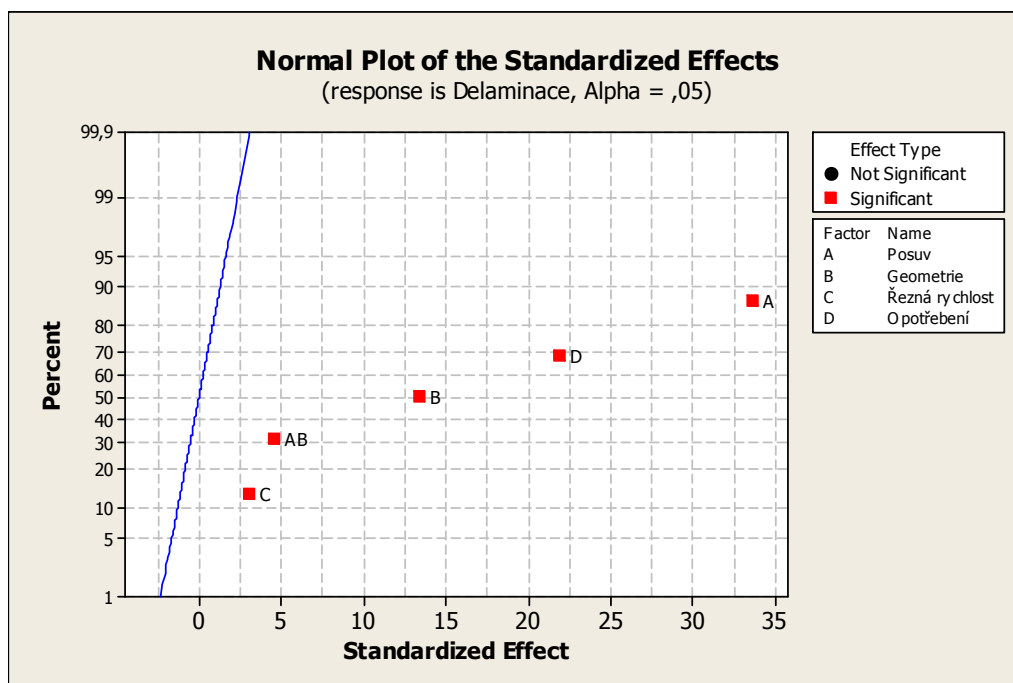
Tab.9.11 Pracovní list s naměřenými výsledky delaminace F_d

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9
	StdOrder	RunOrder	CenterPt	Blocks	Posuv	Geometrie	Řezná rychlost	Opotřebení	Delaminace
1	1	1	1	1	0,05	0,91	16	0,1	0,29
2	2	2	1	1	0,30	0,91	16	0,1	3,04
3	3	3	1	1	0,05	1,77	16	0,1	0,96
4	4	4	1	1	0,30	1,77	16	0,1	4,61
5	5	5	1	1	0,05	0,91	32	0,1	0,46
6	6	6	1	1	0,30	0,91	32	0,1	3,51
7	7	7	1	1	0,05	1,77	32	0,1	1,16
8	8	8	1	1	0,30	1,77	32	0,1	5,01
9	9	9	1	1	0,05	0,91	16	0,3	2,24
10	10	10	1	1	0,30	0,91	16	0,3	5,10
11	11	11	1	1	0,05	1,77	16	0,3	2,80
12	12	12	1	1	0,30	1,77	16	0,3	6,60
13	13	13	1	1	0,05	0,91	32	0,3	2,32
14	14	14	1	1	0,30	0,91	32	0,3	5,55
15	15	15	1	1	0,05	1,77	32	0,3	3,30
16	16	16	1	1	0,30	1,77	32	0,3	7,10
17	17	17	1	1	0,05	0,91	16	0,1	0,43
18	18	18	1	1	0,30	0,91	16	0,1	2,56
19	19	19	1	1	0,05	1,77	16	0,1	1,18
20	20	20	1	1	0,30	1,77	16	0,1	4,29
21	21	21	1	1	0,05	0,91	32	0,1	0,37
22	22	22	1	1	0,30	0,91	32	0,1	2,94
23	23	23	1	1	0,05	1,77	32	0,1	1,23
24	24	24	1	1	0,30	1,77	32	0,1	4,65
25	25	25	1	1	0,05	0,91	16	0,3	2,44
26	26	26	1	1	0,30	0,91	16	0,3	4,31
27	27	27	1	1	0,05	1,77	16	0,3	3,32
28	28	28	1	1	0,30	1,77	16	0,3	6,11
29	29	29	1	1	0,05	0,91	32	0,3	2,35
30	30	30	1	1	0,30	0,91	32	0,3	4,91
31	31	31	1	1	0,05	1,77	32	0,3	3,32
32	32	32	1	1	0,30	1,77	32	0,3	6,50

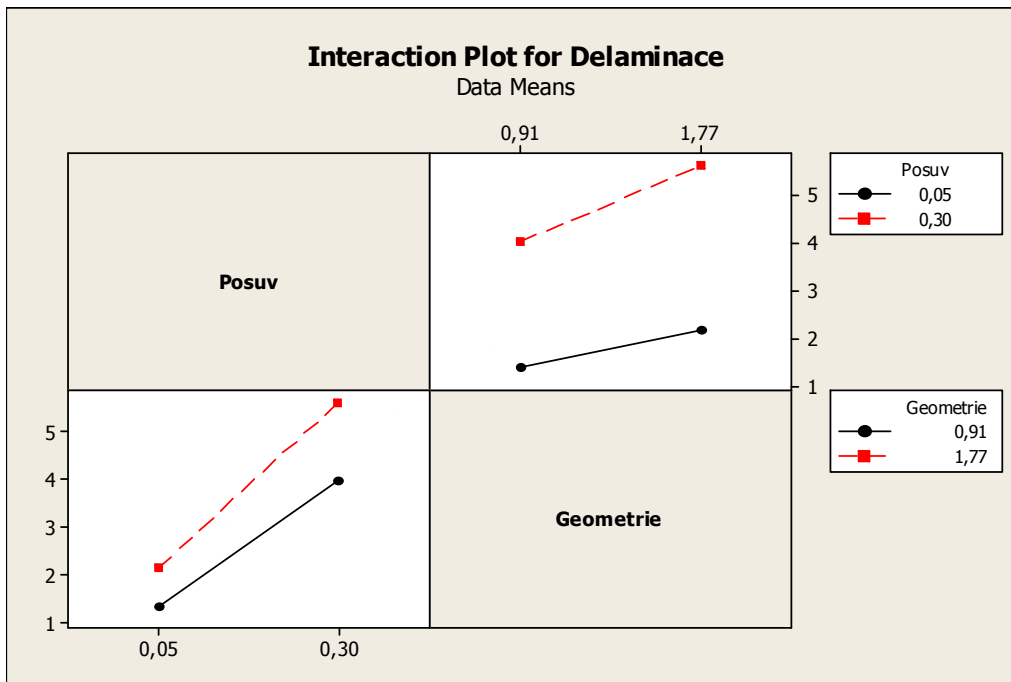
Z grafu pravděpodobnosti normovaného účinku (obr. 9.16) i z Paretova diagramu (obr. 9.15) je patrné, že opotřebení nástroje výrazně ovlivňuje kvalitu vrtané díry (delaminaci). Vliv opotřebení je dokonce větší než vliv geometrie nástroje a řezné rychlosti. Provedený experiment taktéž vyloučil možnost interakce faktoru opotřebení s ostatními faktory. Jedinou významnou interakcí je i po rozšíření z 2^3 na 2^4 faktoriální experiment opět interakce posuv*geometrie, která zůstala beze změny viz porovnání obr. 9.6 a 9.17.



Obr.9.15



Obr.9.16



Obr.9.17

Dříve navržený regresní model delaminace (rovnice 9.1) lze po doplnění koeficientů z analýzy, viz tab. 9.12, přepsat do tvaru:

$$F_d = -2,218 + 7,029 \cdot f + 0,735 \cdot \text{geometrie} + 0,017 \cdot v_c + 9,869 \cdot VB + 3,826 \cdot f \cdot \text{geometrie} \quad (9.2)$$

Tab.9.12 Odhadované koeficienty modelu delaminace

Term	Coef
Constant	-2,21773
Posuv	7,02872
Geometrie	0,734593
Řezná rychlost	0,0171875
Opotřebení	9,86875
Posuv*Geometrie	3,82558

Protože se opotřebení nepodílí na žádné (významné) interakci, byl dále proveden jednoduchý experiment, kdy HSS vrtákem o $\phi 6$ mm bylo vrtáno postupně 23 děr do uhlíkového kompozitu, viz kapitola 5. Měřena byla velikost delaminace, řezné síly a opotřebení nástroje viz tab. 9.14. Řezné podmínky a geometrie nástroje jsou uvedeny v tab. 9.13.

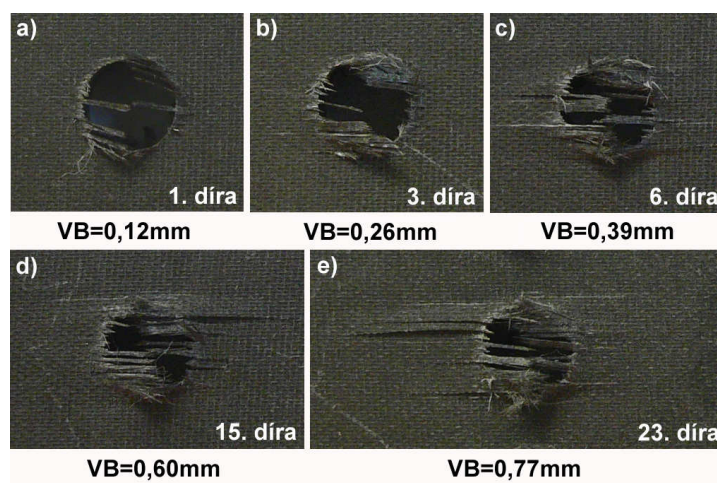
Závislost delaminace na opotřebení je znázorněna na obr. 9.19, snímky vybraných vyvrtaných děr na obr. 9.18. Vzhled díry vyvrtané neopotřebovaným nástrojem nelze posoudit, protože šířka fazetky hřbetního opotřebení na obvodu vrtáku dosáhla již po 2,25 sekundách (1. díra) hodnoty $VB=0,12$ mm. Opotřebení nástroje výrazně ovlivnilo sledované parametry (v menší míře M_c , velmi intenzivně F_f). Po necelých 52 sekundách celkové čisté doby funkce vrtáku (23 děr), narostly hodnoty kroutícího momentu M_c v souladu s rostoucím opotřebováním zhruba 1,5x, hodnoty posuvové síly F_f dokonce téměř 4x, což se následně projevilo na vzhledu vyvrtaných děr.

Tab.9.13 Řezné podmínky a geometrie vrtáku

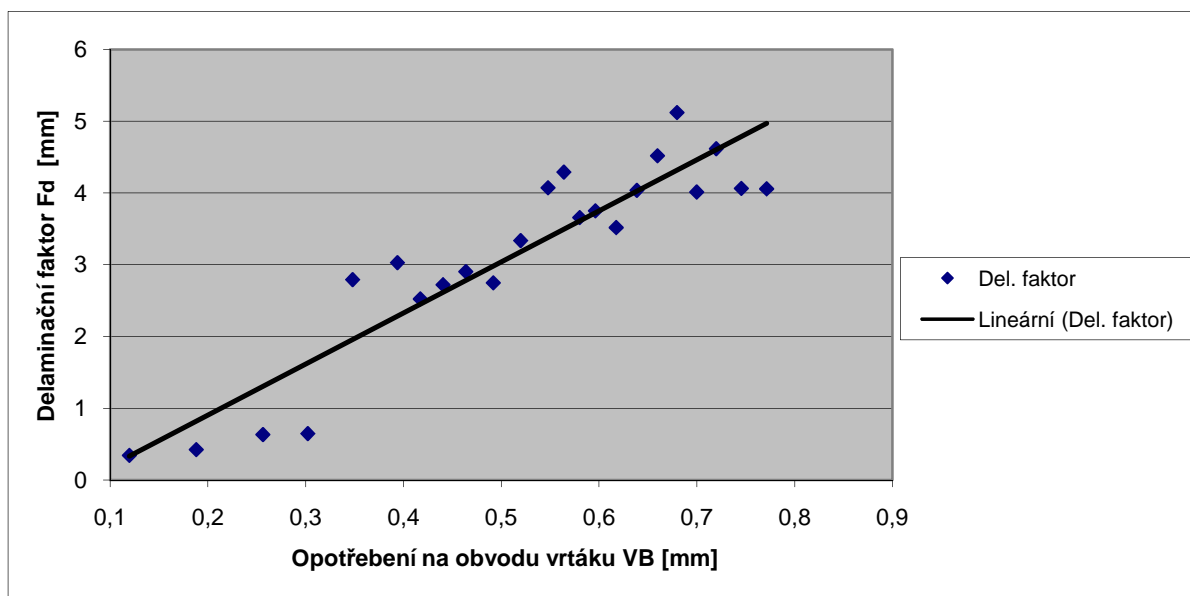
Řezná rychlost v_c [m.min ⁻¹]	Posuv na otáčku f [mm]	Geometrie vrtáku		
		κ_r	α_f	Příčné ostří [mm]
30,2	0,1	59°	13°	1,43

Tab.9.14 Naměřená data při zkouškách vlivu opotřebení na delaminaci

Označení nástroje	Číslo vrtané díry	Maximální průměr delaminace D_{Max} [mm]	Delaminační faktor F_d [mm]	Hřbetní opotřebení VB [mm]			F_f [N]	M_c [Nm]
				břit 1	břit 2	\bar{x}		
z6	1	6,68	0,34	0,13	0,11	0,12	157	0,295
	2	6,84	0,42				206	0,334
	3	7,26	0,63	0,24	0,28	0,26	242	0,370
	4	7,29	0,65				297	0,404
	5	11,58	2,79				316	0,402
	6	12,05	3,03	0,37	0,42	0,40	349	0,412
	7	11,04	2,52				381	0,439
	8	11,44	2,72				403	0,439
	9	11,80	2,90	0,45	0,48	0,47	404	0,432
	10	11,49	2,75				456	0,440
	11	12,67	3,34				457	0,445
	12	14,14	4,07	0,53	0,57	0,55	466	0,441
	13	14,58	4,29				495	0,440
	14	13,31	3,66				510	0,438
	15	13,50	3,75	0,57	0,62	0,60	528	0,441
	16	13,03	3,52				547	0,461
	17	14,07	4,04				548	0,448
	18	15,03	4,52	0,64	0,68	0,66	565	0,422
	19	16,24	5,12				600	0,438
	20	14,02	4,01				589	0,425
	21	15,23	4,62	0,70	0,74	0,72	619	0,426
	22	14,12	4,06				619	0,434
	23	14,11	4,06	0,75	0,79	0,77	624	0,442



Obr.9.18 Vliv opotřebení vrtáku na delaminaci



Obr.9.19

10. Shrnutí dosažených výsledků

Delaminace byla shledána jako nejzávažnější a nejčastější typ poškození povrchových vrstev při obrábění kompozitních materiálů. Ve všech případech docházelo k delaminaci povrchových vrstev výhradně ve směru os vyztužujících vláken a kromě samotné delaminace se často na okraji děr objevovala nedostatečně obrobená (popř. vytažená) vlákna.

Kritická tlaková síla při níž nastane šíření trhliny (delaminace) vychází z lineární elastické lomové mechaniky LELM, za předpokladu zatěžování existující trhliny Módem I (aplikované napětí působí kolmo na rovinu lomu). Kritická tlaková síla je funkcí neobrobené (delaminované) tloušťky h pod nástrojem a vlastností obráběného materiálu G_{IC} a E_1 .

Verifikace matematicko fyzikálního modelu delaminace byla provedena na základě experimentálních zkoušek. Použité nástroje: z10; go10, obráběný materiál: uhlíko/epoxidový laminát, posuv na otáčku $f=0,10; 0,20; 0,30$ mm. Uvažována byla pouze síla od příčného ostří, protože právě příčné ostří tlačí na povrchové vrstvy laminátu a tvoří převážnou část posuvové síly. Navržený model delaminace byl shledán jako adekvátní, s výjimkou posuvu $f=0,1$ mm u vrtáku go10, kdy posuvová síla od příčného ostří nepřekročila kritickou sílu danou výpočtem, ale přesto byla delaminace pozorována. Tuto neshodu lze vysvětlit následovně:

- na vzniku delaminace se kromě příčného ostří částečně podílí taktéž hlavní ostří vrtáku,
- bylo zjištěno, že když příčné ostří dosahuje povrchu vrtané desky, dochází k poklesu posuvové síly z důvodu vydutí neobrobeného materiálu pod nástrojem. V tomto případě nejsou splněny podmínky LELM, ze kterých navržený model delaminace vychází a tudíž je jej nutno dále zpřesnit (podrobit další analýze).

Dalším bodem kontroly modelu delaminace bylo měření tloušťky odštípnuté vrstvy. Ve všech případech byla naměřená tloušťka delaminovaného materiálu rovna násobkům jedné vrstvy laminátu. Tím byl potvrzen předpoklad, že při obrábění vrstvených kompozitů dochází

k delaminaci výhradně na rozhraní jednotlivých lamin, a že vyjma vrtáku go10, $f=0,1\text{mm}$, navržený model správně stanovuje i počet delaminovaných vrstev.

Za pomoci statistického nástroje plánování experimentu (DOE) byly stanoveny faktory a jejich interakce, které mají vliv na delaminaci: posuv, opotřebení, geometrie nástroje, interakce posuv*geometrie a řezná rychlost. Dále byly provedeny zkoušky zaměřené pouze na ty faktory, které dle Paretova diagramu nejvíce ovlivňují tvorbu delaminace, tj. posuv, opotřebení a geometrie nástroje (délka příčného ostří).

Enormní vliv velikosti posuvu byl patrný již na první pohled. Zatímco např. při posuvu $f=0,05\text{ mm}$ dosáhla velikost delaminace hodnoty $F_d=1,31\text{ mm}$, při zvyšování posuvu na $f=0,3\text{mm}$ narostla velikost delaminace až na hodnotu $F_d=4,75\text{ mm}$.

V případě geometrie se nejhorší kvalita projevila u nástrojů s největší hodnotou délky příčného ostří. Zajímavý je fakt, že vrtáky o průměru 10 mm dosáhly menších hodnot delaminace v porovnání s vrtáky o menším průměru 6 mm, ale příčným ostřím delším o 0,52 mm. Na druhou stranu provedené zkoušky prokázaly, že i u nástrojů s nulovou délkou příčného ostří došlo k výrazné delaminaci a překvapivě vysoké byly taktéž hodnoty posuvových sil, na kterých se projevil účinek relativně velkého úhlu špičky nástroje cca 141° . Platí tedy, že čím vyšší posuvová síla, tím větší poškozená oblast v okolí výstupu vrtáku. Velikost vzniklé delaminace nezávisí tedy pouze na příčném ostří, ale na velikosti celkové posuvové síly, kterou u klasických vrtáků (bez speciální úpravy špičky) tvoří z více než 50 % právě příčné ostří.

Vliv opotřebení nástroje byl hned po posuvu na otáčku shledán jako faktor nejvíce ovlivňující delaminaci. Vzhled díry vyvrtané neopotřebovaným nástrojem nelze posoudit, protože šířka fazetky hřbetního opotřebení na obvodu vrtáku dosáhla již po 2,25 sekundách (1. díra) hodnoty $VB=0,12\text{ mm}$. Opotřebení nástroje výrazně ovlivnilo sledované parametry (v menší míře M_c , velmi intenzivně F_f). Po necelých 52 sekundách celkové čisté doby funkce vrtáku (23 děr), narostly hodnoty kroutícího momentu M_c v souladu s rostoucím opotřebováním zhruba 1,5x, hodnoty posuvové síly F_f dokonce téměř 4x, což se následně projevilo na vzhledu vyvrtaných děr. Zatímco při opotřebování $VB=0,12\text{ mm}$ jsou běžné hodnoty delaminace $F_d\approx 0,3\text{ mm}$, při opotřebování $VB=0,40\text{ mm}$ byla naměřena již hodnota $F_d=3,03\text{ mm}$ a v případě $VB=0,77\text{ mm}$ dosáhla delaminace dokonce hodnoty $F_d=4,06\text{ mm}$.

Provedené zkoušky prokázaly, že posuvová síla a kroutící moment jsou při vrtání vláknově vyztužených kompozitů mnohem nižší, než při vrtání ocelí. Anizotropie mechanických vlastností kompozitů a uspořádání vyztužujících vláken však způsobují poměrně velké dynamické změny sledovaných parametrů (M_c , F_f) v průběhu každé otáčky nástroje.

Intenzita opotřebení vrtáků z rychlořezných ocelí při vrtání kompozitu vyztuženého skleněnými vlákny je velmi vysoká. Hlavní příčinou intenzivního opotřebení nástroje je abrazivní účinek vyztužujících vláken. Po necelých dvou minutách celkové čisté doby funkce se šířka fazetky hřbetního opotřebení na obvodu nástroje pohybuje v hodnotách, které jsou při vrtání kovových slitin zcela neobvyklé, $VB>1,2\text{ mm}$ u nepovlakovaných vrtáků a $VB>1,0\text{ mm}$ u povlakovaných vrtáků. Mnohem lepších výsledků dosáhly monolitní vrtáky ze slinutého karbidu, u kterých se opotřebení po počátečním nárůstu ustálilo na hodnotě $VB=0,12\text{ mm}$, která zůstala beze změny i po více než pěti minutách čistého času vrtání

Mechanismus vzniku a oddělování třísky je naprosto odlišný od kovových materiálů. U kompozitních materiálů, nedochází při vnikání břitu do nástroje k téměř žádné plastické deformaci obráběného materiálu, tříska je ve většině případů elementární, ve formě prachu. Důležitou roli při tvorbě třísky sehrává orientace vyztužujících vláken θ , model mechanismu vzniku třísky pro $\theta = 0^\circ$ až 90° byl představen, odvození modelu pro $90^\circ < \theta < 180^\circ$ je námětem pro další výzkumné práce.

11. Perspektiva dalších výzkumných prací

Na základě dosažených výsledků, předpokládané spolupráce s jinými ústavu FSI VUT v Brně a s ohledem na nové poznatky v oblasti obrábění kompozitních materiálů lze očekávat tyto výzkumné práce:

- Využití matematicko fyzikálního modelu delaminace pro návrh a realizaci kontrolní jednotky posuvové síly.
- Propojení kontrolní jednotky se servomechanismem CNC stroje (regulace posuvové síly změnou velikosti otáček servomotoru).
- Experimentální zkoušky pro ověření funkčnosti navrženého zařízení pro vrtání bez vzniku delaminace.

Seznam použité literatury

1. JAHANMIR, S., RAMULU M., KOSHY, P. *Machining of ceramics and composites*. New York: Marcel Dekker, Inc. 1999. 704 s. ISBN 0-8247-0178-X.
2. MALLICK, P.K. *Composites Engineering handbook*. New York: Marcel Dekker, Inc. 1997. 1249 s. ISBN 0-8247-9304-8.
3. MAZUMDAR, S.K. *Composites manufacturing : materials, product, and process engineering*. Boca Raton: CRC Press LLC, 2000. 396 p. ISBN 0-8493-0585-3.
4. BRATUKHIN, A.G., BOGOLYUBOV, V.S. *Composite Manufacturing Technology*. London: Chapman & Hall, 1995. 433 p. ISBN 0 412 58250 3.
5. HUMÁR, A., PÍŠKA, M., JANSKÝ, M., PODRÁBSKÝ, T., ČECH, V. *Technologie zpracování nových kompozitních materiálů tuzemské výroby. Závěrečná zpráva grantového projektu GAČR č.101/98/0855*. Brno: Ústav strojírenské technologie VUT-FSI, prosinec 2000. 154 s.
6. JANČÁŘ, J. *Úvod do materiálového inženýrství polymerních kompozitů*. 1. vydání Brno: FCH VUT v Brně, 2003. 194 s. ISBN 80-214-2443-5.
7. AB SANDVIK COROMANT - SANDIK CZ s.r.o. *Příručka obrábění - Kniha pro praxe*. Přel. M. Kudela. 1. vyd. Praha: Scientia, s. r. o., 1997. 857 s. Přel. z: Modern Metal Cutting - A Practical Handbook. ISBN 91-97 22 99-4-6.
8. OZAKI, M. *Supervisory Control of Drilling of Composite Materials*. Disertační práce v oboru: „Strojní inženýrství“. Berkeley: University of California. 2000. 156 s.
9. ZHANG, L., ZHANG, H., WANG, X. A Force Prediction Model for Cutting Unidirectional Fibre-reinforced Plastics. *Machining Science and Technology*. Volume 5. Number 3/2001. pp. 293-305. ISSN 1091-0344.
10. HOCHENG, H., TSAO, C.C. Comprehensive analysis of delamination in drilling of composite materials with various drill bits. *Journal of Materials Processing Technology*. 2003, Vol. 140, pp. 335-339. ISSN 0924-0136.
11. ZHANG, H., CHEN, W., CHEN, D., ZHANG, L. Assessment of the Exit Defects in Carbon Fibre-Reinforced Plastic Plates Caused by Drilling. *Key Engineering Materials*. 2001, Vol. 196, pp. 43-52. ISSN 1013-9826.
12. SEDLÁČEK, J. Nástroje pro obrábění kompozitních materiálů. *MM Průmyslové spektrum*. Červen 2006, č.6, s. 28-30. ISSN 1212-2572.
13. SEDLÁČEK, J. Problémy při obrábění kompozitních materiálů. *MM Průmyslové spektrum*. Duben 2007, č.4, s. 66-67. ISSN 1212-2572.
14. MAZURA, M. Kompozitní povlak nikl – diamant. *MM průmyslové spektrum*. Říjen 2004, č. 10, s. 27. ISSN 1212-2572.

15. HUMÁR, A., HAI, D. V. Trendy v povlakování slinutých karbidů. *MM Průmyslové spektrum*. Červenec 2001, č.7,8, s. 43-45. ISSN 1212-2572.
16. ČERNOHORSKÝ, J. Nejrozšířenější využití kompozitů v České republice je ve výrobě malých sportovních letounů. *Technický týdeník*, 2006, roč. 54, č. 11, s. 4. ISSN 0040-1064.
17. ARONSON, R.B. Machining composites. *Manufacturing Engineering*, January 1999. [online]. [cit. 30. Apr. 2007]. Dostupné na World Wide Web: <http://findarticles.com/p/articles/mi_qa3618/is_199901/ai_n8828361>.
18. *Cutting advanced composite materials* COMPOSITE CUTTING TOOLS Ltd. [online]. [cit. 30. April 2007]. Dostupné na World Wide Web: <http://www.compositecuttingtools.com/cct_news/News_New/cutting_article_new.htm>.
19. MALLIKA, K., KOMANDURI, R. Diamond coatings on cemented tungsten carbide tools by low-pressure microwave CVD. *Wear*. 1999, Vol. 224, pp. 245-266, ISSN
20. *Chip formation fundamentals* [online]. [cit. 2. May 2007]. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.makinamuhendisi.com/mechanical/mechanical-engineering-archives/77-Chip-formation-fundamentals.html>>.
21. HEGEMAN, J.B.J.W., De HOSSON, J.Th.M., de WITH, G. Grinding of WC-Co hardmetals. *Wear*. 248 (2001). pp. 187-196. ISSN 0043-1648
22. BEŇO, J. *Teória rezania kovov*. Košice: Vienaľa, 1999. 255 s. ISBN 80-7099-429-0.
23. *Diamond core drill bit* LONGCHENG TOOLS. [online]. [cit. 14. May 2007]. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.longchengtools.com/2006web/longchengtools/DIAMOND%20CORE%20DRILL%20BITS%20ELECTRO-PLATED.htm>>.
24. *Průručka obrábění*. PRAMET TOOLS s.r.o. [online]. [cit. 2. května 2007]. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.pramet.cz/pramet.cz/index.html>>.
25. HUMÁR, A. *Slinuté karbidy a řezná keramika pro obrábění*. Brno: CCB spol. s.r.o., 1995. 265 s. ISBN 80-85825-10-4.
26. FOREJT, M., PÍŠKA, M. *Teorie obrábění, tváření a nástroje*. Brno: CERM spol. s.r.o., 2006. 225 s. ISBN 80-214-2374-9.
27. MACEK, K., ZUNA, P. a kol. *Strojírenské materiály*. 1. vydání Praha: ČVUT, 2003. 204 s. ISBN 80-01-02798-8.
28. KOŘÍNEK, Zdeněk. *Vlákna*. 67 s. [online]. [cit. 27. listopadu 2008]. Dostupné na World Wide Web: <www.volny.cz/zkorinek/vlakna.pdf>.
29. KOŘÍNEK, Zdeněk. *Polymerní matrice*. 29 s. [online]. [cit. 27. listopadu 2008]. Dostupné na World Wide Web: <www.volny.cz/zkorinek/matrice.pdf>.

30. UN., ECONOMIC. *Review of Science and Technology in ESCWA Member Countries*. United Nations Publications, 2001. 152 s. ISBN 92-1-128244-6.
31. MERRILL, L.M. *Electronic Materials Handbook*. ASM International, 1989. 1224 s. ISBN 0-87170-285-1.
32. BLACK, J., GARTH, W., HASTING, S. *Handbook of Biomaterial Properties*. Springer, 1998. 590 s. ISBN 0-412-603306.
33. MYTYSKOVÁ, Iveta. *Mechanické a tepelné vlastnosti tkaninových kompozitů sklo/polysiloxan*. Diplomová práce v oboru „Hodnocení textilií“. Liberec: TU-FT, Katedra hodnocení textilií. 2008. 48 s.
34. *Laminování – materiály* [online]. [cit. 27. listopadu 2008]. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.rcmodely.com/technika/materialy.htm>>.
35. MACEK, K., ZUNA, P. a kol. *Nauka o materiálu*. 2. vydání Praha: ČVUT, 2002. 209 s. ISBN 80-01-02543-8.
36. JANOVEC, J., CEJP, J., - STEIDL J. *Perspektivní materiály*. 2. vydání Praha: ČVUT, 2001. 135 s. ISBN 80-01-02341-9.
37. *KEVLAR Technical Guide*. Dupont. [online]. [cit. 27. listopadu 2008]. Dostupné na World Wide Web: <http://www2.dupont.com/Kevlar/en_US/assets/downloads/KEVLAR_Technical_Guide.pdf>.
38. MILITKÝ, J. VANÍČEK, J. *Ultimativní mechanické chování a porušení vláken*. Studijní opory pro podporu samostudia. TU Liberec, FT, Katedra textilních materiálů, 10 s. [online]. [cit. 27. listopadu 2008]. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.ft.vslib.cz/depart/ktm/files/20060106/VlastnostiVlaken-prednaska9.pdf>>.
39. MOORE, D.R., PAVAN, A., WILLIAMS, J.G. *Fracture Mechanics Testing Methods for Polymers Adhesives and Composites*. Elsevier, 2001. 375 s. ISBN 0-08-043689-7.
40. *Design of Experiments/Taguchi approach*. [online]. [cit. 27. listopadu 2008]. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.pqm.cz/doe.htm>>.
41. LAŠ, Vladislav. *Mechanika kompozitních materiálů*. 2. vydání Plzeň: TYPOS a.s., 2008. 204 s. ISBN 978-80-7043-689-9.
42. LUBAS Aleš. *Stanovení vlastností oceli S355J2G3 z hlediska křehkého lomu*. Písemná práce ke státní doktorské zkoušce ve studijním programu „Stavební inženýrství“. Praha: ČVUT, Konstrukce a dopravní stavby. Zář 2003. 30 s.
43. VLACH, Bohumil. *Základy lomové mechaniky*. 12s. [online]. [cit. 29. listopadu 2008]. Dostupné na World Wide Web: <<http://ime.fme.vutbr.cz/files/vyuka/GS0/06%20-%20Lomova%20mechanika.doc>>.
44. VLACH, Bohumil. *Elasticko-plastická lomová mechanika a měření lomové houževnatosti*.

- 7 s. [online]. [cit. 29. listopadu 2008]. Dostupné na World Wide Web: <<http://ime.fme.vutbr.cz/files/vyuka/GS0/07%20-%20Mereni%20-%20LM.doc>>.
45. ANDERSON, T.L. *Fracture Mechanics: Fundamentals and Applications*. CRC Press, 2005. 621 s. ISBN 0-8493-1656-1
46. KOŘÍNEK, Zdeněk. *Definice a historie kompozitů*. 15 s. [online]. [cit. 24. ledna 2009]. Dostupné na World Wide Web: <www.volny.cz/zkorinek/historie.pdf>.
47. *Prefa Kompozity - Reference*. PREFA KOMPOZITY a.s. [online]. [cit. 24. ledna 2009]. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.prefa-kompozity.cz/spolecnost/reference>>.
48. *Eurofighter Typhoon – Materials*. [online]. [cit. 24. ledna 2009]. Dostupné na World Wide Web: <http://www.eurofighter.gr/1024/en/eurofighter_typhoon/technical_data/technical_data_characteristics/materials.html>.
49. *Eurofighter Typhoon – Materials* [online]. [cit. 24. ledna 2009]. Dostupné na World Wide Web: <http://www.eurofighter.com/et_mp_ma_cf.asp>.
50. *Eurofighter Typhoon*. [online]. [cit. 24. ledna 2009]. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.military.cz/international/air/eurofighter/eurofighter.htm>>.
51. *Drak letadla*. [online]. [cit. 24. ledna 2009]. Dostupné na World Wide Web: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Drak_letadla>.
52. VLK, M., FLORIAN, Z. *Mezní stavy a spolehlivost*. 235 s. [online]. [cit. 10. dubna 2009]. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.zam.fme.vutbr.cz/~vlk/meznistavy.pdf>>.
53. TSAO, C.C., HOCHENG, H. Taguchi analysis of delamination associated with various drill bits in drilling of composite material. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. 2004, Vol. 44, pp. 1085-1090. ISSN 0890-6955.
54. DAVIM, J.P., CAMPOS, J.R., ABRAO, A.M.A. Novel approach based on digital image analysis to evaluate the delamination factor after drilling composite laminates. *Composites Science and Technology*. 2007, Vol. 67, pp. 1939-1945. ISSN 0266-3538.
55. MOHAN, N. S, KULKARNI, S. M., RAMACHANDRA, A. Delamination analysis in drilling process of glass fiber reinforced plastic (GFRP) composite materials. *Journal of Materials Processing Technology*. 2007, Vol. 186, pp. 265-271. ISSN 0924-0136.
56. HUMÁR, Anton. *Technologie obrábění – 2. část*. Studijní opory pro magisterskou formu studia. VUT-FSI v Brně, Ústav strojírenské technologie, Odbor technologie obrábění. 2004. 94 s. [online]. [cit. 10. dubna 2009]. Dostupné na World Wide Web: <<http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/?page=opory>>.
57. MATHEW, J., RAMAKRISHNAN, N., NAIK, N.K. Trepanning on unidirectional composites: delamination studies. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 1999, pp. 951-959. ISSN 1359-835X.

58. DURAO, L.M.P., MAGALHAES, A.G., MARQUES, A.T., BAPTISTA, A.M., FIGUEIREDO, M. Drilling of Fibre Reinforced Plastic Laminates. *Materials Science Forum*. 2008, Vols. 587-588, pp. 706-710. ISSN 1662-9752.
59. DAVIM, J.P., REIS, P., ANTONIO, C.C. Drilling fiber reinforced plastics (FRPs) manufactured by hand lay-up: influence of matrix (Viapal VUP 9731 and ATLAC 382-05). *Journal of Materials Processing Technology*. 2004, Vols. 155-156, pp. 1828-1833. ISSN 0924-0136.
60. VIJAYARAGHAVAN, A., DORNFELD, D., DHARAN, C. K. H. *Quantifying Edge Defects in Drilled FRP Composites*. UC Berkeley, Laboratory for Manufacturing and Sustainability. 2006. [online]. [cit. 10. ledna 2009] Dostupné na World Wide Web: <<http://escholarship.org/uc/item/85w135ks>>.

Seznam tabulek

Tab.2.1 Mechanické vlastnosti a tepelná odolnost některých čistých pryskyřic ²⁹	16
Tab.2.2 Technologické parametry a teplotní odolnost epoxidové pryskyřice DGEBA s různými tvrdidly ^{29,31}	19
Tab.2.3 Složení skloviny vláken (hmotnostní %) ²⁸	19
Tab.2.4 Vlastnosti skleněných vláken ³⁴	21
Tab.2.5 Vlastnosti skleněných vláken ²⁸	21
Tab.2.6 Vlastnosti uhlíkových vláken z PAN při teplotě 20°C firmy Toray Industries ²⁸	23
Tab.2.7 Vlastnosti vysokomodulových uhlíkových vláken Dialed [®] z uhelné mezofátové smoly firmy Mitsubishi Chemical Corporation ²⁸	23
Tab.2.8 Vlastnosti uhlíkových vláken ³⁴	23
Tab.2.9 Mechanické vlastnosti některých typů aramidových vláken v porovnání s klasickým polyamidovým vláknem PA66 (Nylon [®]) ²⁸	24
Tab.2.10 Druhy APA od firmy DuPont ²⁸	25
Tab.2.11 Vlastnosti aramidových vláken ³⁴	25
Tab.2.12 Srovnání pevnosti, modulu a hustoty vláken ³⁴	25
Tab.3.1 Odvod tepla [%] při obrábění kompozitních materiálů ve srovnání s ocelí ⁴	29
Tab.3.2 Doporučené nástrojové úhly vrtáků pro obrábění kompozitů ⁴	30
Tab.5.1 Sklo/polyesterový kompozit	38
Tab.5.2 Uhlíkovo/epoxidový laminát	38
Tab.5.3 Naměřené hodnoty lomové houževnatosti G_{IC}	40
Tab.6.1 Geometrie použitých vrtáků	47
Tab.6.2 Řezné podmínky pro zkoušky opotřebení	47
Tab.8.1 Naměřené a vypočtené hodnoty posunových sil a kroutících momentů	63
Tab.9.1 Navržený plán experimentu	68
Tab.9.2 Pracovní list s naměřenými výsledky delaminace F_d	68
Tab.9.3 Odhadované koeficienty modelu delaminace	71
Tab.9.4 Použité nástroje	72
Tab.9.5 Řezné podmínky pro zkoušky delaminace	72
Tab.9.6 Geometrie použitých vrtáků	75
Tab.9.7 Naměřené hodnoty delaminace + delaminační faktor F_d	75
Tab.9.8 Naměřené hodnoty posuvové síly a kroutícího momentu při zkouškách delaminace	78
Tab.9.9 Vzhled vybraných povrchů vrtaných děr $\phi 6$	79

Tab.9.10 Vzhled vybraných povrchů vrtaných děr $\phi 10$	80
Tab.9.11 Pracovní list s naměřenými výsledky delaminace F_d	81
Tab.9.12 Odhadované koeficienty modelu delaminace	83
Tab.9.13 Řezné podmínky a geometrie vrtáku	84
Tab.9.14 Naměřená data při zkouškách vlivu opotřebení na delaminaci	84

Seznam použitých symbolů

<i>symbol</i>	<i>jednotka</i>	<i>význam</i>
A	mm ²	delaminovaná plocha, lomová plocha
A _H	mm ²	plocha vyvrtané díry bez delaminace
A _D	mm ²	jmenovitý průřez třísky
B	mm	tloušťka vzorku (CT tělesa)
C _{Fc}	-	konstanta zahrnující vliv obráběného materiálu
C _{Ff}	-	konstanta zahrnující vliv obráběného materiálu
C _M	-	konstanta zahrnující vliv obráběného materiálu
D	mm	průměr vrtáku, průměr vyvrtané díry
D _{Max}	mm	maximální průměr delaminované oblasti
E	MPa, GPa	modul pružnosti v tahu
E ₁	MPa, GPa	modul pružnosti v tahu ve směru vláken
F	N	celková řezná síla
F _A	N	axiální delaminační síla
F _c	N	řezná síla
F _d		delaminační faktor
F _{del.výstup(h)}	N	kritická tlaková (delaminační) síla při výstupu vrtáku
F _{D,del.výstup(h)}	N	diskrétní kritická tlaková (delaminační) síla při výstupu vrtáku
F _{del.vstup(h)}	N	kritická (axiální) delaminační síla při vstupu vrtáku
F _{D,del.vstup(h)}	N	diskrétní kritická (axiální) delaminační síla při vstupu vrtáku
F _f	N	posuvová síla
F _{f,po}	N	posuvová síla od příčného ostří
F _p	N	pasivní síla
F _{sh}	N	tangenciální síla v rovině stříhu
F _{shN}	N	normálová síla v rovině stříhu
F _{sh1}	N	průmět tangenciální (střížné) síly kolmo na osy vyztužujících vláken
F _{sh2}	N	průmět tangenciální (střížné) síly do os vyztužujících vláken
F _x	N	tlaková síla od vrtáku
F _y	N	vertikální síla
F _z	N	horizontální síla
F _γ	N	tangenciální síla na čele nástroje
F _{γN}	N	normálová síla na čele nástroje
G	kJ/m ² , N/mm	rychlost uvolňování energie, hnací síla trhliny
G _C	kJ/m ² , N/mm	kritická rychlost uvolňování energie, lomová houževnatost
H	mm	celková tloušťka kompozitu (laminátu)
J	kJ/m ²	J-integrál
K	MPam ^{1/2}	součinitel (faktor) intenzity napětí
K _C	MPam ^{1/2}	kritický součinitel intenzity napětí, lomová houževnatost
M	Nmm	ohybová tuhost desky
M _c	Nm	kroučící moment
M _{c,po}	Nm	kroučící moment od příčného ostří
R	N	celkový řezný odpor
R _{p0,2}	MPa	smluvní mez kluzu
U	Nmm	deformační energie uložená v tělese (vnitřní energie)

VB	mm	šířka fazetky hřbetního opotřebení na obvodu vrtáku
W	mm	rozměr vzorku ve směru trhliny
W	J	celková energie
W_F	J	práce vnějších sil
W_s	J	práce potřebná pro vytvoření nových povrchů
X	mm	posunutí vrtáku
a	mm	délka vrubu
a_p	mm	šířka záběru ostří
b	mm	tloušťka obrobku
d	mm	průměr předvrtané díry
f	mm	posuv na otáčku
f_{ij}	-	funkce polohy (úhlu θ)
f_z	mm/zub	posuv na zub
g_{ij}	-	funkce polohy (úhlu θ)
h	mm	tloušťka (neobrobené) vrstvy pod nástrojem
h_d	mm	hloubka díry
h_t	mm	tloušťka jedné vrstvy laminátu
h_D	mm	jmenovitá tloušťka řezu
h'_D	mm	skutečná tloušťka řezu
h_{Dc}	mm	tloušťka odebrané třísky
k_c	N/mm^2	měrná řezná síla
k_p	-	transformační faktor
l_1, l_2	mm	délky delaminované vrstvy ve směru vláken
l_{AC}	mm	celková délka odřezaného materiálu kolmo k ose vláken
l_{BC}	mm	celková délka odřezaného materiálu rovnoběžně s osou vláken
n	min^{-1}	otáčky nástroje
n	mm	počet vrstev laminátu
n	-	počet replikací
r	mm	vzdálenost k čelu trhliny (polární souřadnice)
r_A	mm	poloměr středového bodu teoretického čela
r_n	mm	poloměr zaoblení ostří nástroje
v_c	$m \cdot min^{-1}$	řezná rychlost
X_{Fc}	-	exponent vyjadřující vliv průměru vrtáku
X_{Ff}	-	exponent vyjadřující vliv průměru vrtáku
X_M	-	exponent vyjadřující vliv průměru vrtáku
Y_{Fc}	-	exponent vyjadřující vliv posuvu na otáčku
Y_{Ff}	-	exponent vyjadřující vliv posuvu na otáčku

<i>řecký symbol</i>	<i>jednotka</i>	<i>význam</i>
Λ	-	součinitel přechování třísky
Π	J	potenciální energie
ϕ	°	úhel roviny stříhu
ψ_r	°	doplňkový úhel nastavení hlavního ostří
α_f	°	nástrojový boční úhel hřbetu
γ_o	°	ortogonální úhel čela
δ_o	°	ortogonální úhel řezu
ϵ_r	°	nástrojový úhel špičky
η_e	-	energetický faktor

θ	°	úhel orientace vláken
θ	°	polární úhel čela trhliny
κ_r	°	úhel nastavení hlavního ostří
λ	°	úhel stoupání šroubovice
μ	-	koeficient tření mezi nástrojem a obrobkem
ν_{12}	-	Poissonovo číslo
σ	MPa	tahové napětí
σ_{ij}	MPa	složky tenzoru napětí
τ_1	MPa	smyskové napětí působící ve směru kolmém na osy vyztužujících vláken
τ_2	MPa	smyskové napětí působící ve směru os vyztužujících vláken
φ_t	°	třecí úhel mezi odcházející třískou a čelem nástroje

Publikační činnost

1. SEDLÁČEK, J. The influence of fibres on cutting forces during drilling FRC. In *Sborník Technológia 2005*. Bratislava, Strojnícka fakulta STU, 2005. s.77.
2. SEDLÁČEK, J., HUMÁR, A. Drilling of Fibre Reinforced Composites. In *Proceedings of the 5th International Scientific Conference "Development of Metal Cutting DMC 2005"*. Katedra strojárskkej metalurgie a technológie Strojníckej fakulty TU Košice, Slovensko, 12.-13.9.2005, ISBN 80-8073-303-1, pp.CZ22-CZ26.
3. HUMÁR, A., SEDLÁČEK, J. Materiály pro řezné nástroje. In *Proceedings of the 5th International Tools Conference, ITC 2006*. UTB Zlín, Fakulta technologická, Ústav výrobního inženýrství, 5.-6.9.2006, ISBN 80-7318-448-56.
4. ČERMÁK, J., SEDLÁČEK, J. Nasazení výkonných řezných nástrojů. *Technika a trh*. 2006, roč. 15, č.4, ISSN 1210-5902.
5. SEDLÁČEK, J. Nástroje pro obrábění kompozitních materiálů. *MM Průmyslové spektrum*. Červen 2006, č.6, s. 28-30, ISSN 1212-2572.
6. SEDLÁK, J., SEDLÁČEK, J. Progressive Erstellungsmethoden von urmodellen mittels rapid Prototyping und CAD/CAM Systeme. In *CO-MAT-TECH 2006*. Nezařazené články. Trnava. STU Bratislava, MTF Trnava, 2006. s.1-11.
7. SEDLÁČEK, J., SEDLÁK, J. Opatřebení nástroje při vrtání kompozitních materiálů vyztužených skelnými vlákny. In *CO-MAT-TECH 2006*. Nezařazené články. Trnava. STU Bratislava, MTF Trnava, 2006. s.1-11.
8. SEDLÁČEK, J., SEDLÁK, J., ZOUHAR, J. A force prediction model and cutting forces analysis when machining unidirectional FRP. In *Sborník odborné konference "Frézování IV"*. VUT-FSI, Ústav strojírenské technologie ve spolupráci s PRAMET TOOLS, s.r.o. Šumperk a ZPS - Frézovací nástroje, a.s., Zlín. Brno, 31.1.2007, s. 163-172. ISBN 80-214-3239-X.
9. SEDLÁK, J., PROCHÁZKOVÁ, J., PÍŠA, Z., SEDLÁČEK, J., ZOUHAR, J. Přímá B-spline interpolace dráhy CNC nástroje z mraku bodů. In *Sborník odborné konference "Frézování IV"*. VUT-FSI, Ústav strojírenské technologie ve spolupráci s PRAMET TOOLS, s.r.o. Šumperk a ZPS - Frézovací nástroje, a.s., Zlín. Brno, 31.1.2007, s. 147-154. ISBN 80-214-3239-X.
10. ZOUHAR, J., PÍŠA, Z., SEDLÁK, J., SEDLÁČEK, J. Produktivní obrábění s využitím metod reverzního inženýrství. In *Sborník odborné konference "Frézování IV"*. VUT-FSI, Ústav strojírenské technologie ve spolupráci s PRAMET TOOLS, s.r.o. Šumperk a ZPS - Frézovací nástroje, a.s., Zlín. Brno, 31.1.2007, s. 189-196. ISBN 80-214-3239-X.
11. SEDLÁČEK, J. Problémy při obrábění kompozitních materiálů. *MM Průmyslové spektrum*. Duben 2007, č.4, s. 66-67. ISSN 1212-2572.
12. SEDLÁČEK, J., HUMÁR, A. Analysis of fracture mechanisms and surface quality in drilling of composite materials. *Strength of Materials*, 2008, roč. 40, č. 1, s. 40-43. ISSN: 0556-171X.
13. SEDLÁČEK, J. Analysis of delamination in drilling of composite materials. *MM Science Journal*, June 2010. ISSN 1803-1269.

Přílohy

Seznam příloh

Příloha 1: Naměřené hodnoty posuvové síly, kroutícího momentu a hřbetního opotřebenění při zkouškách trvanlivosti nástrojů

Příloha 2: Kalibrační (korekční) faktory pro SENB zkušební vzorky ³⁹

Příloha 3: Kalibrační (korekční) faktory pro CT zkušební vzorky ³⁹

Příloha 4: Závislost doby vytvrzování uhlíkového prepregu na zvolené teplotě

Příloha 5: Změna toku pryskyřice FT105 v závislosti na délce skladování

Příloha 6a: Napěťová pole před čelem trhliny pro Múd I a Múd II v lineárním elastickém a isotropním materiálu

Příloha 6b: Posunutí před čelem trhliny pro Múd I a Múd II v lineárním elastickém a isotropním materiálu

Příloha 6c: Složky nenulových napětí a posunutí v Módu III v lineárním elastickém a isotropním materiálu

Příloha 7: Technická data piezoelektrických dynamometrů KISTLER

Příloha 1: Naměřené hodnoty posuvové síly, kroutícího momentu a hřbetního opotřebení při zkouškách trvanlivosti nástrojů

Vrták Gühring, HSS, povlak TiN, D = 10 mm								
Díra číslo	Posuvová síla F_f [N]		Krouticí moment M_c [Nm]		VB [mm]			Řezné podmínky
	Rozsah	Střed	Rozsah	Střed	1.břit	2.břit	Střed	
1	118 - 175	142	0,32 - 0,55	0,44	0,07	0,08	0,08	otáčky: $n = 1120 \text{ min}^{-1}$ řezná rychlost: $v_c = 35,2 \text{ m.min}^{-1}$ posuv na otáčku: $f = 0,20 \text{ mm}$
5	175 - 257	211	0,38 - 0,68	0,51	0,20	0,19	0,20	
10	235 - 365	303	0,45 - 0,78	0,62	0,66	0,60	0,63	
15	176 - 488	381	0,47 - 0,95	0,70	0,75	0,65	0,70	
20	395 - 610	517	0,61 - 1,04	0,85	0,81	0,81	0,81	
25	464 - 740	616	0,58 - 1,01	0,83	0,88	0,92	0,90	
30	554 - 822	698	0,61 - 1,14	0,91	0,93	0,96	0,95	
35	651 - 883	788	0,70 - 1,18	0,92	1,02	1,01	1,02	
40	718 - 950	853	0,70 - 1,23	0,97	1,04	1,03	1,04	
Vrták Stim-Zet, HSS, nepovlakovaný, D = 9,6 mm								
Díra číslo	Posuvová síla F_f [N]		Krouticí moment M_c [Nm]		VB [mm]			Poznámka
	Rozsah	Střed	Rozsah	Střed	1.břit	2.břit	Střed	
1	86 - 164	121	0,24 - 0,56	0,38	0,13	0,12	0,13	otáčky: $n = 1120 \text{ min}^{-1}$ řezná rychlost: $v_c = 33,8 \text{ m.min}^{-1}$ posuv na otáčku: $f = 0,20 \text{ mm}$
5	183 - 314	249	-	-	0,38	0,38	0,38	
10	293 - 434	376	0,50 - 0,83	0,67	0,55	0,65	0,60	
15	375 - 553	475	0,58 - 1,04	0,80	0,74	0,73	0,74	
20	455 - 693	581	0,68 - 1,13	0,90	1,05	1,07	1,06	
25	597 - 825	735	0,60 - 1,07	0,84	1,10	1,10	1,10	
30	711 - 921	832	0,70 - 1,16	0,92	1,15	1,16	1,16	
35	710 - 1040	923	0,62 - 1,27	0,89	1,17	1,16	1,17	
40	800 - 1020	975	0,62 - 1,28	0,94	1,22	1,22	1,22	
Vrták Zbrojovka Vsetín, HSS, nepovlakovaný, D = 9 mm								
Díra číslo	Posuvová síla F_f [N]		Krouticí moment M_c [Nm]		VB [mm]			Poznámka
	Rozsah	Střed	Rozsah	Střed	1.břit	2.břit	Střed	
1	128 - 198	169	0,23 - 0,55	0,43	0,20	0,17	0,19	otáčky: $n = 1120 \text{ min}^{-1}$ řezná rychlost: $v_c = 31,7 \text{ m.min}^{-1}$ posuv na otáčku: $f = 0,20 \text{ mm}$
5	197 - 304	248	0,42 - 0,78	0,61	0,39	0,37	0,38	
10	274 - 414	347	0,50 - 0,83	0,66	0,54	0,56	0,55	
15	340 - 529	443	0,60 - 1,03	0,77	0,63	0,66	0,65	
20	451 - 626	542	0,62 - 1,04	0,80	0,73	0,81	0,77	
25	600 - 750	676	0,59 - 1,15	0,90	0,96	0,95	0,96	
30	680 - 820	764	0,69 - 1,16	0,91	1,03	1,13	1,08	
35	860 - 910	866	0,78 - 1,03	0,90	1,08	1,38	1,23	
40	800 - 950	870	0,69 - 1,21	0,97	1,15	1,51	1,33	
Vrták Gühring, SK - K10/K20, povlak TiAlN, D = 10 mm								
Díra číslo	Posuvová síla F_f [N]		Krouticí moment M_c [Nm]		VB [mm]			Poznámka
	Rozsah	Střed	Rozsah	Střed	1.břit	2.břit	Střed	
1	90 - 150	127	0,43 - 0,57	0,52	-	0,09	0,09	otáčky: $n = 1800 \text{ min}^{-1}$ řezná rychlost: $v_c = 56,5 \text{ m.min}^{-1}$ posuv na otáčku: $f = 0,20 \text{ mm}$
10	148 - 179	160	0,25 - 0,54	0,41	0,08	0,10	0,09	
20	149 - 171	156	0,39 - 0,61	0,51	0,08	0,11	0,10	
30	138 - 159	149	0,46 - 0,69	0,56	0,09	0,12	0,11	
50	139 - 161	150	0,43 - 0,68	0,55	0,11	0,12	0,12	
80	110 - 169	152	0,41 - 0,68	0,53	0,11	0,12	0,12	
101	138 - 165	150	0,44 - 0,67	0,56	0,12	0,12	0,12	
150	138 - 169	154	0,43 - 0,68	0,55	0,12	0,12	0,12	
200	139 - 180	158	0,49 - 0,75	0,63	0,12	0,12	0,12	

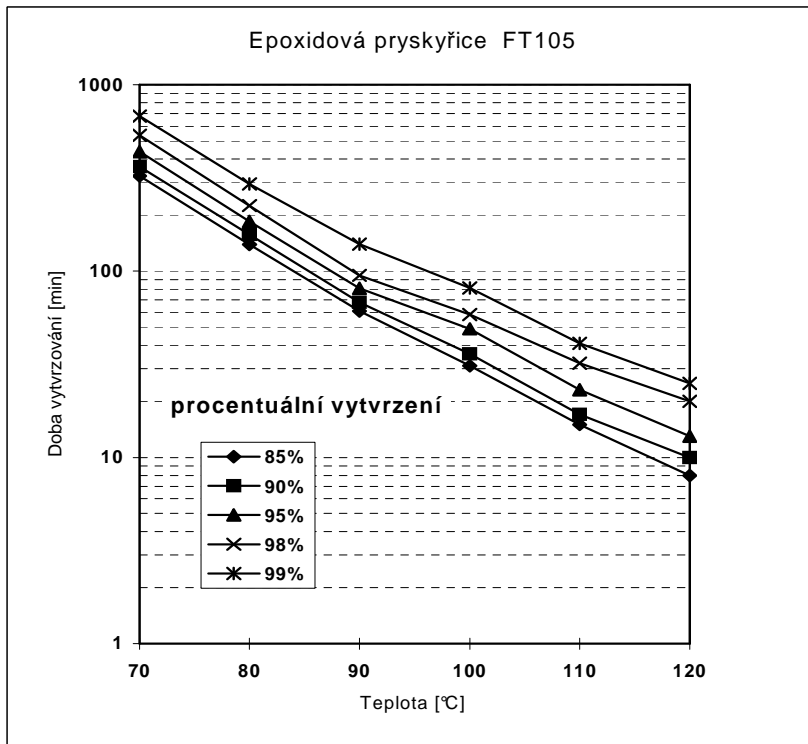
Příloha 2: Kalibrační (korekční) faktory pro SENB zkušební vzorky³⁹

a/W	f	ϕ	ψ	η_e
0,05	2,50	1,502	18,7	0,63
0,10	3,39	0,857	19,7	1,05
0,15	4,07	0,641	21,2	1,33
0,20	4,70	0,526	23,2	1,52
0,25	5,36	0,449	25,7	1,67
0,30	6,09	0,391	28,9	1,79
0,35	6,93	0,345	33,1	1,89
0,40	7,93	0,307	38,5	1,96
0,45	9,14	0,275	45,9	2,00
0,50	10,65	0,246	55,9	2,03
0,55	12,57	0,220	69,6	2,04
0,60	15,09	0,195	88,7	2,05
0,65	18,51	0,170	116,4	2,06
0,70	23,40	0,145	158,5	2,07
0,75	30,84	0,120	228,2	2,08
0,80	43,21	0,096	357,7	2,09
0,85	66,76	0,072	643,7	2,08
0,90	123,30	0,049	1484,6	2,05
0,95	351,62	0,025	6148,3	2,01

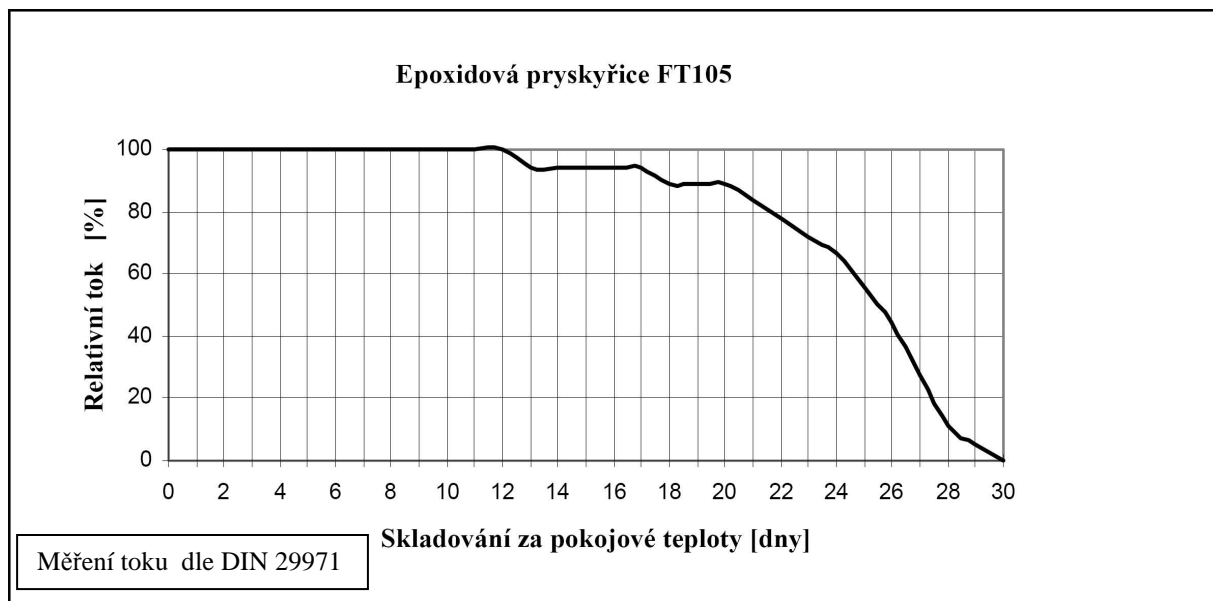
Příloha 3: Kalibrační (korekční) faktory pro CT zkušební vzorky³⁹

a/W	f	ϕ	ψ	η_e
0,25	4,92	0,199	9,6	3,77
0,30	5,62	0,208	13,2	3,36
0,35	6,39	0,213	17,4	3,05
0,40	7,28	0,213	22,5	2,82
0,45	8,34	0,208	28,9	2,64
0,50	9,66	0,199	37,1	2,51
0,55	11,36	0,186	48,1	2,42
0,60	13,65	0,170	63,6	2,35
0,65	16,86	0,152	86,6	2,30
0,70	21,55	0,133	123,2	2,26
0,75	28,86	0,112	186,3	2,23

Příloha 4: Závislost doby vytvrzování uhlíkového prepregu na zvolené teplotě



Příloha 5: Změna toku pryskyřice FT105 v závislosti na délce skladování



Příloha 6a: Napěťová pole před čelem trhliny pro Mód I a Mód II v lineárním elastickém a isotropním materiálu

	Mód I	Mód II
σ_{xx}	$\frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \left[1 - \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \sin\left(\frac{3\theta}{2}\right)\right]$	$-\frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \left[2 + \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \cos\left(\frac{3\theta}{2}\right)\right]$
σ_{yy}	$\frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \left[1 + \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \sin\left(\frac{3\theta}{2}\right)\right]$	$\frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \cos\left(\frac{3\theta}{2}\right)$
τ_{xy}	$\frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \cos\left(\frac{3\theta}{2}\right)$	$\frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \left[1 - \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \sin\left(\frac{3\theta}{2}\right)\right]$
σ_{zz}	0 (rovinná napjatost) $\mu(\sigma_{xx} + \sigma_{yy})$ (rovinná deformace)	0 (rovinná napjatost) $\mu(\sigma_{xx} + \sigma_{yy})$ (rovinná deformace)
τ_{xz}	0	0
τ_{yz}		

Příloha 6b: Posunutí před čelem trhliny pro Mód I a Mód II v lineárním elastickém a isotropním materiálu

	Mód I	Mód II
u_x	$\frac{K_I}{2G} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \left[\kappa - 1 + 2 \sin^2\left(\frac{\theta}{2}\right)\right]$	$\frac{K_{II}}{2G} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \left[\kappa + 1 + 2 \cos^2\left(\frac{\theta}{2}\right)\right]$
u_y	$\frac{K_I}{2G} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \left[\kappa + 1 - 2 \cos^2\left(\frac{\theta}{2}\right)\right]$	$-\frac{K_{II}}{2G} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \left[\kappa - 1 - 2 \sin^2\left(\frac{\theta}{2}\right)\right]$
G je modul pružnosti ve smyku, pro rovinnou deformaci je $\kappa = 3 - 4\mu$, pro rovinnou napjatost je $\kappa = (3 - \mu)/(1 + \mu)$		

Příloha 6c: Složky nenulových napětí a posunutí v Módu III v lineárním elastickém a isotropním materiálu

$\tau_{xz} = -\frac{K_{III}}{\sqrt{2\pi r}} \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)$	$\tau_{yz} = \frac{K_{III}}{\sqrt{2\pi r}} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right)$	$u_z = -\frac{K_{III}}{G} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)$
--	---	--

Příloha 7: Technická data piezoelektrických dynamometrů KISTLER

Označení dynamometru		KISTLER 9271A	KISTLER 9257A	KISTLER 9272
Typ		dvousložkový 1)	třísložkový 2)	čtyřsložkový 1)
Užití		vrtání	frézování, broušení (soustružení)	univerzální
Měřené složky řezné síly		F_x, M_c	F_x, F_y, F_z	F_x, F_y, F_z, M_c
Měřicí rozsah	F_x [kN]	-5 (tah) až 20 (tlak)	-5 (tah) až 5 (tlak)	-5 (tah) až 20 (tlak)
	F_y [kN]	---		-5 (tah) až 5 (tlak)
	F_z [kN]	---	-5 (tah) až 5 (tlak) 0 (tah) až 10 (tlak) 3)	
	M_c [Ncm]	± 10 000	---	± 20 000
Přetížení	F_x [kN]	-7,5 (tah) až 30 (tlak)	-7,5 (tah) až 7,5 (tlak)	-6 (tah) až 24 (tlak)
	F_y [kN]	---		-6 (tah) až 6 (tlak)
	F_z [kN]	---	-7,5 (tah) až 7,5 (tlak) 15 3)	
	M_c [Ncm]	± 15 000	---	± 24 000
Práh necitlivosti F [N], M_c [Ncm]		0,02	< 0,01	F_y, F_z 0,01 F_x, M_c 0,02
Citlivost	F [pC N ⁻¹]	-1,8	F_x, F_y -7,5 F_z -3,5	F_y, F_z -7,3 F_x -3,8
	M_c [pC N ⁻¹ cm ⁻¹]	-1,5	---	-1,6
Tuhost	F_x [kN μm ⁻¹]	6,5	≈ 1	≈ 2
	F_y [kN μm ⁻¹]	---		≈ 0,4
	F_z [kN μm ⁻¹]	---	≈ 2	
	M_c [Ncm deg ⁻¹]	900 000	---	≈ 1 220 000
Rozměry [mm]		125/90x70 4)	šířka x délka x výška 140 x 170 x 60	140/100x70 4)
Hmotnost [kg]		2,9	6,9	4,5

1) Složka F_x kolmá na upínací plochu dynamometru, **2)** Složka F_z kolmá na upínací plochu dynamometru, **3)** pro $F_x, F_y \leq 0,5 F_z$, **4)** průměr upínací základny / průměr těla x výška