

## OPONENTSKÝ POSUDEK DISERTAČNÍ PRÁCE

Název disertační práce: **Stanovení mezního stavu IF oceli při zvýšených rychlostech lokalizované deformace výlisků autokaroserií**

Doktorand: **Ing. Filip Klejch**

Školitel: **prof. Ing. Eva Schmidová, Ph.D.**

Školitel specialista: **Ing. Jakub Vágner, Ph.D.**

Oponent: **prof. Dr. Ing. Antonín Kříž, IWE**

Pracoviště: **Ústav strojírenské technologie, Fakulta strojní ČVUT v Praze**

Posudek byl vypracován na základě jmenování oponentem disertační práce Ing. Filipa Klejcha – studijní program P0788D40001 Dopravní prostředky a infrastruktura, specializace P0788D5001 Dopravní prostředky.

### Úvod posuzující aktuálnost zvoleného tématu

Hodnocená disertační práce se zabývá deformačním chováním anizotropního materiálu oceli s označením IF (Interstitial Free steel). Disertační práce se po vědecké i výzkumné stránce věnuje studiu a prokázání materiálové odezvy na zatížení reálného plechu z IF oceli. Při svém studiu doktorand sleduje mikrostrukturní změny v souvislosti s napětím, deformací, ale i stavem napjatosti a rychlostí silového zatížení. Pozornost je částečně věnována také vlivu tření při tváření plechů v reálných podmínkách (sledování vlivu tření nebylo cílem experimentu). Významným přínosem autora i předložené disertační práce je přenesení experimentem i rešerší získaných poznatků do praktického procesu a hledání souvislostí s dosaženými zkušenostmi. Za pokrokové považují rovněž snahu uplatnit nedestruktivní metodu Barkhausenova šumu při měření stavu plastické deformace.

Disertační práce obsahuje 11 kapitol, které jsou rozděleny do dvou částí – rešeršní a experimentální. Úvodní kapitoly správně a logicky zdůvodňují potřebnost výzkumu lokalizace deformací ve vazbě na sledovaná kritéria. Rovněž je uvedena absence vědeckých výzkumů k danému tématu, a to především ve spojení s praktickými aplikacemi. Na tento úvod navazuje druhá kapitola popisující současný stav problematiky. Jsou představeny jednotlivé oceli, které se využívají na karosářské plechy v automobilovém průmyslu. Jejich uvedení není pro disertační práci a její výstupy zásadní, proto je otázkou, zda je toto zařazení přínosem. Diskutabilní je to i proto, že jsou pouze vyjmenovány a velmi krátce představeny, ale již se nevztahují k tématu práce. Naopak větší pozornost mohla být věnována povrchovým úpravám, a to ve vazbě na tváření, tření a dopad na proces rozložení napětí a deformací. Rovněž další procesy, které mají dopad na tváření plechů mohly být více rozepsány, např. difúze vodíku a jeho degradační dopad. Za velmi dobře začleněnou i provedenou rešerší považují kapitolu popisující lisování tenkých plechů. Dále jsou popsány vybrané metody nedestruktivního testování ve vazbě na proces tváření plechů a analýzu jejich vlastností. S ohledem na to, že analýza stavu plechu pomocí Barkhausenova šumu je stěžejní bod disertační práce, měl autor této metodě věnovat více pozornosti, a to především z hlediska korelací výsledků, praktických zkušeností, ale rovněž omezení využití, popř. nevýhody. V disertační práci jsou uvedeny principy metody Barkhausenova šumu, ale chybí hlubší vazby na praktické zkušenosti.

Na druhou stranu jakékoliv uplatnění nedestruktivních metod v aplikační sféře je velkým přínosem pro poznání technologického procesu, eliminaci defektů a zefektivnění výroby. Za zcela zásadní pro téma disertační práce považuji kapitolu popisující mezní stav a plasticitu. Tato kapitola dodává rešerši disertační práce velmi vysokou odbornou úroveň. Autor ji správně člení na jednotlivé podkapitoly a uvádí v logickém sledu potřebné informace vycházející z vhodně zvolených odborných zdrojů. Za přínosnou považuji rovněž kapitolu popisující využití metody difrakce zpětně odražených elektronů (EBSD). Pro následující experimentální část mohla být tato kapitola více rozepsána i z hlediska metodiky a popisu poskytujících informací (mapa fází, mapa hranic zrn, pólový (inverzní) obraz, distribuce velikosti zrna).

Cíle projektu jsou uvedeny na straně 46, kde ve třetí kapitole je uvedeno 10 bodů. Cílům disertační práce se věnuje samostatná kapitola hodnocení. Následuje praktická část, která je členěna podle jednotlivých experimentů. Je popsán analyzovaný materiál, kterým je IF ocel třídy DC06. Následují jednotlivé kapitoly popisující provedené experimenty a jejich výsledky. Tyto kapitoly měly být více provázány s cíli. Pozitivně hodnotím, že za každou kapitolou je uvedeno shrnutí a diskuse výsledků. Významným přínosem disertační práce je kapitola č. 9, která se věnuje analýzám kritických míst reálných výtisků. Na tuto praktickou kapitolu navazuje i další, v níž je popsán vliv metalurgické kvality na plasticitu. Tato kapitola je vztažena pouze na výskyt karbonitridů. Tato kapitola mohla být obsažnější a sledovat i další metalurgické faktory, na druhou stranu se věnuje defektům, které byly v reálném materiálu zachyceny. Jedenáctou kapitolou je shrnutí a diskuse výsledků. Tato kapitola se dělí do podkapitol popisující přínos disertační práce z pohledu praxe a perspektivy pro navazující výzkum. Následuje přehled vlastních publikací doktoranda a seznam použitých zdrojů.

## **Metody zpracování**

Literární rešerše je koncipována ve smyslu navrženého experimentálního programu. V některých směrech mohl doktorand popsat ve větším měřítku daný problém a rovněž vést polemiku k dosaženým poznatkům a z ní následně postavit cíle disertační práce. Literární rešerše obsahuje 114 zdrojů, z nichž je 69 mladších 10 let. Rešeršní zdroje jsou vhodně využity k popisu dané problematiky, a to především ve vazbě na IF plechy, tváření, strukturní změny, testy a mezní stavy. Téma disertační práce vyžaduje, aby byla rešerše provedena ve vazbě na jednotlivé (dílčí) body zájmu, protože neexistují citace popisující komplexně danou problematiku. Z tohoto hlediska je rešerše správně provedena. Jediné, co lze vytknout je slabší polemika s citovanými poznatky a rovněž menší pozornost věnovaná praktickým výsledkům NDT testu využívající Barkhausenova šumu, a to i z hlediska jeho omezení a nepřesností. V praktické části jsou uvedeny kapitoly ve vazbě na provedené experimenty a výsledky jsou doplněny dalšími odkazy na rešeršní zdroje. Poněkud slabší stránkou je popis orientace zkušebního vzorku pro zkoušku plasticity a umístění v reálném plechu. U použitých parametrů testování mohla být větší provázanost s rešeršní částí, popř. vysvětlena jejich volba (např. rozsahy testované deformační rychlosti). Rovněž některé mapy fází vyplývající z EBSD analýzy mohly být šířeji diskutovány. Některé výsledky a závěry mohly být více vzájemně provázány, konkrétně výsledky deformací, rychlostí deformace a strukturního stavu, popř. dalších doplňujících analýz.

## **Cíle disertační práce**

Cíle jsou uvedeny po rešeršní části a bylo by vhodné, kdyby jejich znění více korespondovalo s provedenou rešerší. Po úvodu v dané kapitole, která sice obsahuje odkazy na rešerši, ale již s těmito odkazy více nepracuje, je uvedeno 10 dílčích cílů. Toto množství je hodně obsáhlé, a ačkoliv jsou cíle konkrétní nejsou natolik kvantifikovány, že je následně obtížná kontrola jejich dosažení. Kromě toho není experimentální část členěna dle uvedených dílčích cílů a rovněž diskuse dosažených výsledků není odpovídajícím způsobem provázána. Disertační práce naplnila svoje cíle, které vyplývají z doktorandského studia, ale i z požadavků praxe a především chybějícího rešeršního fundamentu k danému tématu, ale již slaběji prokazuje vazbu na vlastní dílčí cíle, které si doktorand stanovil.

## **Výsledky a vědecký přínos práce**

V disertační práci je velmi zdařile provázána teoretická rešeršní část s požadavky aplikační sféry. Pro dosažení požadovaného poznání jsou zvoleny vhodné metody laboratorních analýz, jejich výsledky jsou následně využity v praktickém případě. Za velmi cenné považují využití EBSD technik, jejich výsledky prokazují strukturní stav ovlivněný sledovanou deformací. Tyto výsledky dovolují vytvořit chybějící základ pro další sledování chování IF ocelí v procesu tváření a stanovit nové okrajové podmínky pro jejich průmyslové využití v oblasti automotive. Jak již bylo uvedeno, slabším místem je využití Barkhausenova šumu, protože dosažené výsledky nejsou dostatečně korigovány se stavem mikrostruktury, nejsou stanoveny podmínky pro využití této NDT techniky v praxi a také chybí představení dalších možností jejího studia a následné zavedení do praxe.

## **Formální úprava disertační práce a její jazyková úroveň**

Disertační práce je z hlediska textu přehledná a srozumitelná, poskytuje potřebné informace, a to jak k rešerši, tak i k experimentu. Pro lepší orientaci v textu měly být lépe rozkresleny jednotlivé směry metalografických analýz, v nichž se prováděly EBSD analýzy. Rovněž u některých grafů měly být propojeny dosažené výsledky s analyzovanou lokalitou. Disertační práce by měla obsahovat jednoznačný a shrnující závěr, který zde chybí.

Po formální stránce hodnotím práci dobře zpracovanou. Její struktura a náplň poskytne cenné studijní podklady nejen pro další studenty, akademické pracovníky, ale také pro průmyslovou praxi, konkrétně pro deformační zpracování karosářských plechů.

## **Celkové zhodnocení disertační práce**

Doktorand Ing. Filip Klejch prokázal nejen na základě hodnocené disertační práce, ale i dle jeho velmi bohaté publikační činnosti hluboké znalosti v oblasti deformačního chování tvářených IF ocelí. Jeho poznatky budou využity nejen v dalších vědecko-výzkumných činnostech, ale i v konkrétních průmyslových aplikacích. Rovněž prokázal, že dokáže dosažené výsledky vhodně publikovat a v této souvislosti doporučuji, aby z uvedené disertační práce

vznikly další odborné publikace, aby nejen mezní stavy tvářených IF ocelí našly širší ohlas ve vědecké komunitě, ale rovněž byly publikovány výsledky EBSD analýz. Tím bude povědomí o této analýze a jejím praktickým možnostem více propagováno nejen u výzkumných organizací a univerzit, ale také přínos pro konkrétní průmyslové aplikace, kde stále ještě nemá odpovídající zastoupení. Disertační práce má povahu experimentální vědecké práce s úzkým propojením na aplikační sféru. Hodnocená disertační práce tak prokázala hluboký vědecko-výzkumný potenciál autora.

### **Doporučení k obhajobě**

Posuzovaná disertační práce autora Ing. Filipa Klejcha naplňuje věcné a formální kritéria pro disertační práci. Autor prokázal dostatečné teoretické a praktické znalosti, které mu umožnily získat cenné výsledky a následně je správně analyzovat a vyhodnotit.

Na základě výše uvedeného posudku **doporučuji**, aby byla tato disertační práce předložena k obhajobě před komisí daného doktorského studijního programu. Po úspěšné obhajobě, aby byl Ing. Filipu Klejchovi dle zák. č. 111/1998 Sb. § 47 **udělen vědecko-akademický titul *philosophiae doctor (Ph.D.)***.

### **Otázky k obhajobě:**

- 1) Jaké jsou společné a jaké rozdílné znaky BH a IF ocelí?
- 2) Popište nebezpečí obsaženého vodíku na vlastnosti studovaných plechů a co lze provést pro odstranění negativního dopadu?
- 3) Jaké jsou slabé stránky Barkhausenova šumu a jak je lze v praxi eliminovat? Jaké bude další konkrétní využití Barkhausenova šumu v oblasti popisu strukturního stavu tvářených plechů?
- 4) Jak si vysvětlujete, že nebyl experimentem prokázán vliv zvyšující deformační rychlosti na chování tvářeného plechu (zpevnění)? (viz str. 80; 81)
- 5) Jaká doporučení týkající se požadované anizotropie vstupních polotovarů - plechů byste učinil, aby je bylo možné použít pro další průmyslové zpracování?

V Praze, 17. listopadu 2024

prof. Dr. Ing. Antonín Kříž, IWE