

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE  
FAKULTA STROJNÍ  
ÚSTAV MATERIÁLOVÉHO INŽENÝRSTVÍ



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

ANALÝZA TVÁŘITELNOSTI UHLÍKOVÝCH OCELÍ  
ANALYSIS OF CARBON STEEL FORMABILITY

AUTOR: Alfred Ducháč

STUDIJNÍ PROGRAM: Výroba a ekonomika ve strojírenství

VEDOUCÍ PRÁCE: Ing. Jakub Horník, Ph.D.

PRAHA 2017

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Ducháč** Jméno: **Alfred** Osobní číslo: **434471**  
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**  
Zadávající katedra/ústav: **Ústav materiálového inženýrství**  
Studijní program: **Výroba a ekonomika ve strojírenství**  
Studijní obor: **Technologie, materiály a ekonomika strojírenství**

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Analýza tvařitelnosti uhlíkových ocelí**

Název bakalářské práce anglicky:

**Analysis of formability of carbon steel**

Pokyny pro vypracování:

1. Teoretická příprava a studium odborné literatury v oblasti vlivu materiálu a podmínek tváření za studena na vznik defektů.
2. Materiálové vlivy způsobující vznik defektů při tváření uhlíkových ocelí.
3. Návrh a provedení experimentu pro posouzení vlivu chemického složení na mechanické vlastnosti a tvařitelnost vybrané oceli.
4. Vyhodnocení experimentu, diskuse výsledků, závěry.

Seznam doporučené literatury:

- [1] ŽÍDEK, M.: Metalurgická tvařitelnost ocelí za tepla a za studena. Praha : Aleko, 1995. ISBN 80-85341-45-X.  
[2] Technologie I: (slévání, tváření, svařování a povrchové úpravy). Vyd. 2. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2001. ISBN 80-010-2351-6.  
[3] Hannon, A., Tieman, P.: A review of planar biaxial tensile test systems for sheet metal. Journal of Materials Processing Technology, Vol. 198, Issues 1-3, 3 March 2008, p. 1-13, ISSN: 0924-0136

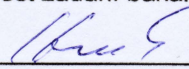
Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

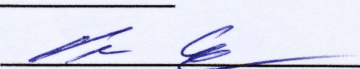
**Ing. Jakub Horník Ph.D., ústav materiálového inženýrství FS**

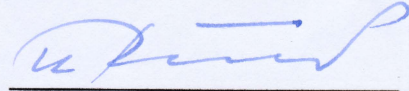
Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **24.04.2017** Termín odevzdání bakalářské práce: **31.07.2017**

Platnost zadání bakalářské práce: \_\_\_\_\_

  
Podpis vedoucí(ho) práce

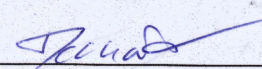
  
Podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

  
Podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

28.4.2017  
Datum převzetí zadání

  
Podpis studenta

# Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval samostatně a to výhradně s použitím pramenů a literatury uvedených v seznamu citovaných zdrojů.

V Praze dne: .....

.....

Podpis

# Anotace

Vysoká škola: České vysoké učení technické v Praze  
Fakulta strojní  
Ústav: Ústav materiálového inženýrství  
Vedoucí ústavu: Prof. RNDr. Petr Špatenka, CSc.

Téma diplomové práce: Analýza tvářitelnosti uhlíkových ocelí  
Akademický rok: 2016 / 2017  
Autor: Alfred Ducháč  
Vedoucí diplomové práce: Ing. Jakub Horník, Ph.D.

Klíčová slova: Hlubokotažná ocel, lisování, mechanické vlastnosti, metalografie

Abstrakt: Tato práce se zabývá problematikou hlubokotažných ocelí. Obsahuje informace o základním rozdělení ocelí používané v automobilovém průmyslu a jejich zkoušení. Experimentální část řeší porovnání dvou materiálových šarží oceli DC06 z různých hledisek od struktury přes chemické složení až po mechanické parametry.

## **Rozsah práce a příloh**

Počet stran	54
Počet obrázků	28
Počet tabulek	14
Počet příloh	4

# Annotation

University: Czech Technical University in Prague  
Faculty of Mechanical Engineering  
Department: Department of Material Engineering  
Head of the Department: Prof. RNDr. Petr Špatenka, CSc.

Theme of work: Analysis of carbon steel formability  
Academic year: 2016 / 2017  
Author: Alfred Ducháč  
Supervisor: Ing. Jakub Horník, Ph.D.

Keywords: Deep drawing steel, stamping, mechanical properties, metallography

Abstract: This thesis deals with topic of the deep-drawing steel. It contains information about the basic divisions of steel used in the automotive industry and about their testing. The experimental part compares two material batches of DC06 steel from different points of view, such as structure, chemical composition and mechanical parameters.

## **Volume of work**

Number of pages	53
Number of pictures	28
Number of tables	14
Number of appendix	4

## Poděkování

Rád bych touto cestou poděkoval panu Ing. Jakubovi Horníkovi, Ph.D. za odborné vedení této práce a cenné připomínky při jejím řešení. Dále bych rád poděkoval společnosti Škoda Auto a.s. a především Ing. Tomáši Pilvousekovi, Ph.D., IWE za umožnění vzniku mé bakalářské práce a poskytnuté zázemí pro výkon mé praxe. Dále bych rád poděkoval pánům Ing. Vojtěchovi Lichorobíecovi, Ing. Jaroslavovi Petr-Soiniovi a celému oddělení Technického servisu lisoven a svařoven (PFS-K) za cenné rady, připomínky z praxe a pomoc při realizaci této závěrečné práce.

Poděkování také patří mé rodině za jejich podporu a poskytnuté zázemí, které mi věnovali po dobu mého studia.

## Obsah:

<b>Seznam použitých symbolů a zkratek.....</b>	<b>9</b>
<b>1 Úvod.....</b>	<b>11</b>
<b>2 Oceli v automobilovém průmyslu .....</b>	<b>13</b>
2.1 Hlubokotažné oceli .....	14
2.2 Žárově pozinkované plechy .....	15
2.3 Elektrolyticky pozinkované plechy .....	16
<b>3 Zpracování hlubokotažných ocelí v automobilovém průmyslu .....</b>	<b>18</b>
3.1 Technologie lisování .....	18
<b>4 Komplexní posouzení materiálových charakteristik .....</b>	<b>20</b>
4.1 Základní materiálový rozbor .....	20
4.2 Povrchový profil .....	21
4.2.1 Střední aritmetická hodnota drsnosti Ra .....	21
4.2.2 Výšková nerovnost Rz.....	21
4.2.3 Počet vrcholů profilu RPc .....	22
4.3 Metalografie .....	22
4.4 Chemické složení .....	23
4.5 Zkouška technických parametrů materiálu .....	23
4.5.1 Mechanické vlastnosti materiálu.....	24
<b>5 Hodnocení tvárnosti za pomoci technologických zkoušek.....</b>	<b>29</b>
5.1 Zkouška hloubení dle Erichsena.....	29
5.2 Zkouška dvouosým tahem.....	30
5.3 Zkouška kalíškovací .....	31
5.4 Zkouška rozšiřováním otvoru podle Siebela a Pompa .....	32
5.5 Zkouška Nakajima test .....	32
<b>6 Experimentální část.....</b>	<b>33</b>
6.1 Hodnocení povrchu.....	33

6.2	Analýza chemického složení .....	34
6.3	Metalografie .....	35
6.3.1	Příprava vzorku .....	35
6.4	Velikost zrn .....	37
6.5	Porovnání mechanických vlastností .....	38
6.6	Zkouška dle Erichsena .....	41
<b>7</b>	<b>Celkové zhodnocení .....</b>	<b>45</b>
<b>8</b>	<b>Závěr .....</b>	<b>46</b>
<b>9</b>	<b>Citovaná literatura .....</b>	<b>47</b>
<b>10</b>	<b>Seznam použitých obrázků .....</b>	<b>51</b>
<b>11</b>	<b>Seznam tabulek .....</b>	<b>52</b>
<b>12</b>	<b>Seznam příloh.....</b>	<b>53</b>



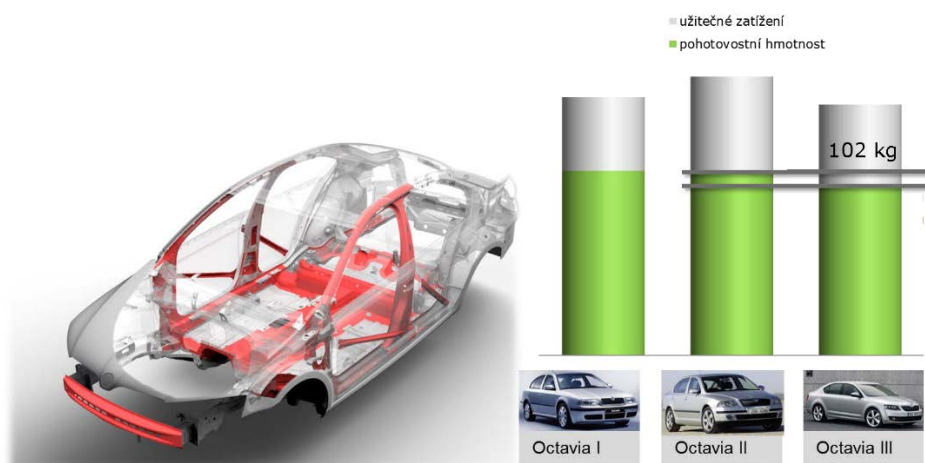
## Seznam použitých symbolů a zkratek

Symbol	Význam	Jednotky
$\bar{n}$	Vážený průměr exponentu zpevnění	[–]
$\bar{r}$	Normálová anizotropie	[–]
$\Delta r$	Plošná anizotropie	[–]
<b>A</b>	Tažnost	[%]
<b>A<sub>80</sub></b>	Tažnost (počáteční měřená délky 80 mm)	[%]
<b>Al</b>	Hliník	[–]
<b>C<sub>koef</sub></b>	Pevnostní koeficient	[–]
<b>C</b>	Uhlík	[–]
<b>Cu</b>	Měď	[–]
<b>E</b>	Modul pružnosti v tahu	[Pa]
<b>EI</b>	Hodnota hloubení dle Erichsena	[mm]
<b>F<sub>e</sub></b>	Síla na mezi kluzu	[N]
<b>F<sub>m</sub></b>	Maximální síla před přetržením zkušební tyče	[N]
<b>F<sub>max</sub></b>	Maximální dosažené napětí před vytvořením praskliny	[N]
<b>F<sub>p0,2</sub></b>	Síla na smluvní mezi kluzu	[N]
<b>IT</b>	Index tvárivosti	[–]
<b>K</b>	Poměr tažnosti a smluvní meze kluzu	[%]
<b>KUT</b>	Komplexní ukazatel tvárivosti	[–]
<b>L<sub>0</sub></b>	Počáteční měřená délka zkušební tělesa	[mm]
<b>L<sub>u</sub></b>	Konečná měřená délka zkušební tělesa	[mm]
<b>Mn</b>	Mangan	[–]
<b>n</b>	Exponent deformačního zpevnění	[–]
<b>Nb</b>	Niob	[–]
<b>P<sub>koef</sub></b>	Poměr smluvní meze kluzu a meze pevnosti	[–]
<b>P</b>	Fosfor	[–]
<b>R</b>	Modul pružnosti v tahu	[N · mm <sup>-2</sup> ]
<b>r<sub>0</sub>, r<sub>45</sub>, r<sub>90</sub></b>	Anizotropie v daném směru	[–]

<b><math>r_a</math></b>	Součinitel normálové anizotropie	[–]
<b>Ra</b>	Drsnost materiálu	[ $\mu\text{m}$ ]
<b><math>R_e</math></b>	Mez kluzu v tahu	[ $\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$ ]
<b><math>R_m</math></b>	Mez pevnosti v tahu	[ $\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$ ]
<b><math>R_{p0,2}</math></b>	Smluvní mez kluzu v tahu	[ $\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$ ]
<b>RPC</b>	Počet vrcholů povrchu materiálu	[ $\mu\text{m}$ ]
<b>Rz</b>	Výšková nerovnost povrchu materiálu	[ $\mu\text{m}$ ]
<b>S</b>	Síra	[–]
<b><math>S_0</math></b>	Počáteční průřez zkušebního tělesa	[ $\text{mm}^2$ ]
<b>Si</b>	Křemík	[–]
<b>Ti</b>	Titan	[–]
<b>ZP</b>	Zásoba plasticity	[ $\text{N} \cdot \text{mm} \cdot \text{mm}^{-2}$ ]
<b><math>\varepsilon</math></b>	Poměrná deformace	[–]
<b><math>\varphi</math></b>	Stupeň deformace	[–]
<b><math>\sigma</math></b>	Skutečné napětí v tahu	[Pa]
<b>EG</b>	Elektrolyticky pozinkované plechy (Electrolytical Galvanizing)	
<b>HDG</b>	Žárově pozinkované plechy (Hot Dip Galvanizing)	
<b>Vzorek č. 1</b>	Dobrý plech, z kterého lze lisovat	
<b>Vzorek č. 2</b>	Špatný plech, z kterého nelze lisovat	

# 1 Úvod

V dnešní době, kdy se osobní automobily staly samozřejmostí denního života, vznikly vztahy mezi výrobcem, zákazníkem, ale i státem, kde každý klade na automobil různé nároky. Pokud si je detailněji rozebereme, tak snahou výrobce je prodávat co nejvíce automobilů, ale také snížit výrobní náklady a maximalizovat zisk. Zákazník však požaduje minimální cenu, atraktivní design, dostatečnou výbavu, bezpečnost, spolehlivost a další požadavky. Stát všechny tyto vztahy zastřešuje předepisováním sjednocených norem a požadavků především na bezpečnost a ekologii provozu. To nutí automobilky vyvíjet stále nové modely a technologie, které tyto zájmy a nároky splňují. Například pokud porovnáme Škodu Octavii I. generace se současnou III. generací, které od sebe dělí 17 let, můžeme vidět obrovský posun v samotné vyspělosti vozu a to jak na poli ekologie, bezpečnosti, komfortních prvků a samozřejmě i designu. První generace byla vzhledově oblá na rozdíl od třetí generace, u které převládají ostré designové hrany. Neustále se zvyšující požadavky na ekologii (například aktuální emisní norma EURO 6) nutí výrobce k hledání nových technologií a postupů ke snížení celkového dopadu provozu vozidel na životní prostředí. Kromě vývoje nových pohonných ústrojí a úpravy aerodynamiky vozidla se naskytá výrobcům také možnost snižovat celkovou hmotnost vozidla. Z tohoto pohledu je nejúčinnějším nástrojem snížení hmotnosti karoserie. Toho lze dosáhnout nejen použitím nových typů ocelí, tak i snížením tloušťky současně používaných jakostí. Na Obr. 1. je vyobrazeno snížení hmotnosti karoserie napříč všemi generacemi modelu Škoda Octavia.



Obr. 1 Příklad redukce váhy karoserie modelu Škoda Octavia [1]

Snižování tloušťky materiálu ovšem přináší značné technologické problémy při lisování, zejména při současných požadavcích na design. Prolínání těchto dvou trendů klade na technologii výroby značné nároky, které se v jisté míře přenáší i na samotný materiál. Základní materiálové vlastnosti, jak mechanické tak chemické, jsou předepsané normou. Bohužel normy pro oceli válcované za studena mají z pohledu odběratele velmi široké rozmezí mechanických parametrů, v kterých se dodavatel oceli může pohybovat. To může mít za následek odlišné chování stejné jakosti plechu při tváření, přestože standardně kontrolované mechanické parametry odpovídají předepsané normě. Novou výzvou je tedy porozumění odlišnému chování materiálu při stejných mechanických vlastnostech a tím upřesnit požadavky, kladené na nakupovaný materiál.

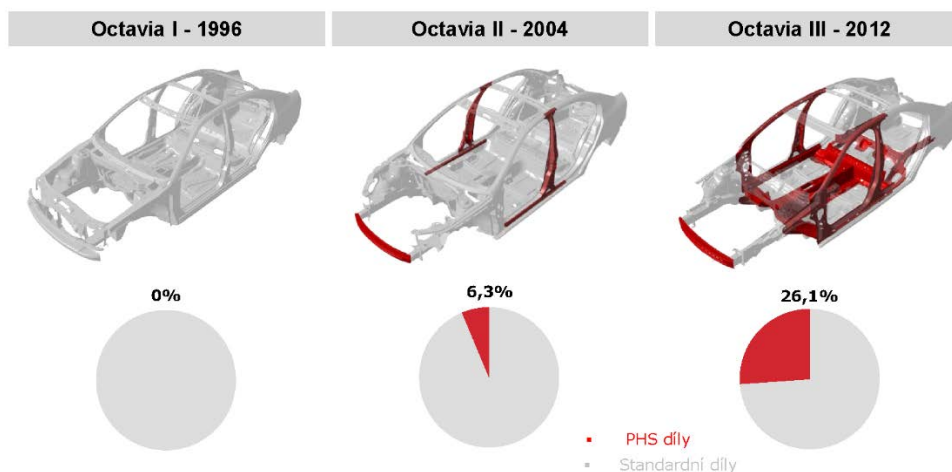
Cílem této práce je popsat a prohloubit znalosti o mechanických parametrech dvou materiálů stejné jakosti, které splňují předepsanou normu, avšak v procesu lisování se chovají odlišně. Tím poskytnout zpětnou vazbu výrobě a pomoci ke stabilizaci výrobního procesu. To vše za pomoci zkoušek ke zjištění mechanických vlastností materiálu, chemického složení a také strukturních analýz matrice a povrchu.

## 2 Oceli v automobilovém průmyslu

Výrobní technologie ocelových plechů je dnes vyvíjena pod silným vlivem automobilového průmyslu v reakci na jeho aktuální potřeby. Zejména snížení hmotnosti automobilu, kvůli zmenšení ekologických dopadů provozu vozidla a přísným předpisům na odolnost při nárazu se zvyšují nároky na pevnost a celkovou tuhost karoserií osobních automobilů. Tento trend vede k trvale rostoucím nárokům na jakost a mechanické parametry zpracovávaných plechů a lze tvrdit, že materiály používané v automobilovém průmyslu vstoupily do éry ultrapevných ocelí. [2]

Ve 20. století se v automobilovém průmyslu staly nejpoužívanějším materiálem plechy válcované za studena, a to nízko a středně pevné. [3] Což v dnešní době, kdy nové předpisy kladou důraz jak na bezpečnost, tak i na hmotnost, nestačí. Z tohoto důvodu je snaha stále vyvíjet moderní oceli a slitiny. Postupným vyvíjením moderních ocelí pro automobilový průmysl a díky novým technologiím v oblastech svařování a lepení se začalo s postupným nahrazováním určitých částí konstrukce vozu vysokopevnými materiály. Právě kvůli tomu vzniklo profilování jednotlivých druhů ocelí pro konkrétní použití na dané karoserii a to vedlo ke zvýšení celkové tuhosti samotného vozu. Současně, díky možnosti snížit tloušťky použitých dílů, bylo možné i snížení hmotnosti samotného vozu.

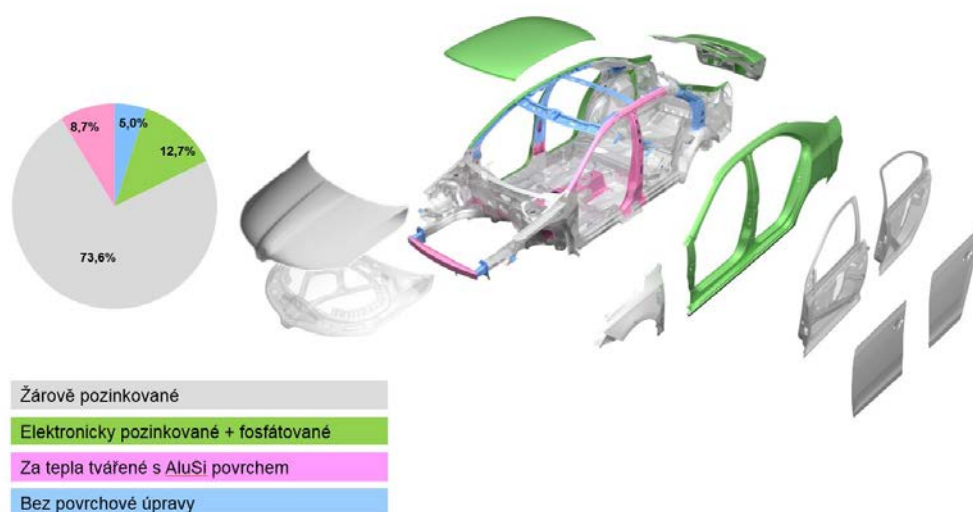
Moderní vysokopevné oceli používané v automobilovém průmyslu dělíme na čtyři základní třídy podle pevnosti a to na nízkopevnostní oceli LSS (Low Strength Steel), standardní oceli HSS (High Strength Steel), speciální oceli AHSS (Advanced High Strength Steel) a ultra pevné oceli (Ultra High Strength Steel), do jejichž skupiny patří i za tepla tvářené oceli PHS (Press Hardened Steel). [4] Procentuální zastoupení této oceli v jednotlivých generacích Škoda Octavia můžete vidět na Obr. 2. V této práci se ovšem budu zabývat výhradně nízkopevnostními hlubokotažnými oceli.



Obr. 2: Srovnání zastoupení vysokopevnostních dílů u Octavia I, II a III [1]

## 2.1 Hlubokotažné oceli

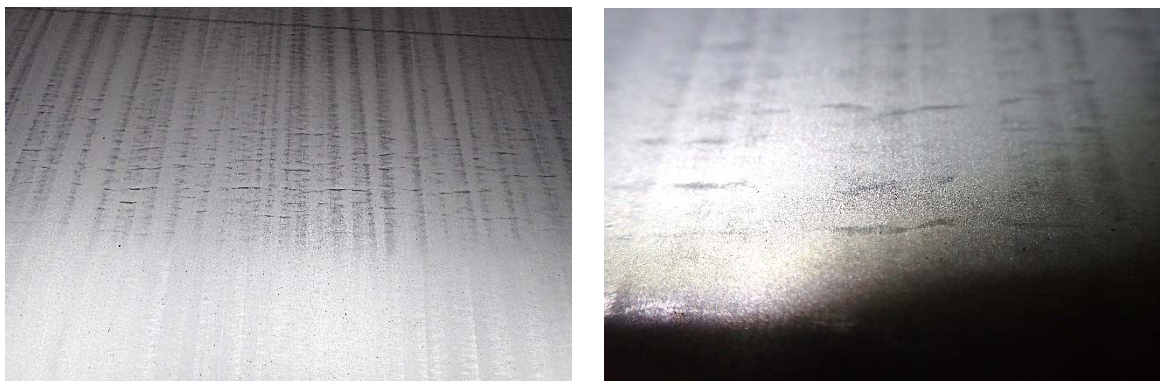
Hlubokotažné oceli (LSS) známé také jako IF oceli, jsou nízkouhlíkové mikrolegované oceli, které jsou charakteristické velmi nízkým obsahem intersticiálních atomů uhlíku a dusíku, které by zpevňovaly strukturu těchto ocelí. [4] Z tohoto důvodu mají velmi vysokou tažnost a jsou vhodné pro tváření tvarově složitých dílů karosérie automobilů. Hlubokotažné oceli mají feritickou matici a jsou mikrolegovány titanem [Ti] nebo niobem [Nb]. [3] Tyto prvky zastávají funkci stabilizátorů - karbonitridů, díky kterým se dokáže snížit obsah uhlíku [C] v matici na velmi nízké hodnoty v porovnání s běžnou konstrukční ocelí, a to až pod hodnotu 0,05 % hm. Právě díky tomu mají výborné plastické a mechanické vlastnosti. Tyto oceli nemají výraznou mez kluzu, ale mají výrazně vyšší tažnost a houževnatost. Později, vzhledem ke zvyšujícím se požadavkům na protikorozní odolnost, se postupně začaly zavádět jak žárově, tak elektrolyticky pozinkované plechy na díly, které jsou více korozně náchylné jako třeba kapota či dveře. [3] Dnes se využívají na převážně většině dílů karoserie. Vlastnosti jednotlivých jakostí hlubokotažných ocelí popisují normy ČSN EN 10152 a ČSN EN 10346.



**Obr. 3 Zastoupení jednotlivých povrchových úprav hlubokotažných ocelí [1]**

Nelegované a nízkolegované oceli mohou po rekrystalizačním žhání vykazovat výraznou mez kluzu, která má negativní vliv na proces lisování a kvalitu výlisků. [5] Výrazná mez kluzu je způsobena nahromaděním intersticiálních atomů především uhlíku nebo dusíku v oblasti přetvoření. Tím mohou vznikat nechtěné povrchové vady – např. vrásky, neboli tzv. Lüdersovy čáry Obr. 4. Aby se předešlo těmto nechtěným jevům, instaluje se na výstupu moderních pozinkovacích linek drezírovací stolice, která zajišťuje mírnou plastickou deformaci a vytváří dislokace v materiálu. IF-oceli (Interstitial Free) tento jev nevykazují, proto jsou zpravidla pouze mírně drezírovány, aby bylo dosaženo předepsané textury

a drsnosti na pozinkovaném povrchu, ale současně nebyla tak silně ovlivněna mez kluzu. Vhodně zvolená textura a drsnost povrchu mají dále pozitivní vliv na další procesní kroky, jako je lisování a lakování. Pro podporu procesu lisování je nezbytně nutný vhodný poměr hydrodynamického tření. Ten může být dosažen pomocí velkého počtu rovnoměrně rozmístěných prohlubní v povrchu zpracovávaného plechu, kdy tyto prohlubně slouží jako lokální zásobníky maziva a zabraňují jeho stečení z povrchu. Vhodnou drezírovací strukturou také dochází ke zlepšení vizuálního vjemu lakovaných dílů. Proto musí být drezírovací parametry pečlivě stanoveny dle požadavků automobilky. [6]



**Obr. 4 Ukázka Lüdersových čár neboli vrásek**

## **2.2 Žárově pozinkované plechy**

Žárově pozinkované plechy (HDG) s potlačeným zinkovým květem a vysokou kvalitou povrchu dle ČSN EN 10346 se v dnešní době používají jak na vnitřní, tak na vnější díly automobilové karoserie. Tato technologie má své úskalí při nedodržení požadované kvality povrchu, kdy usazování zinkové strusky na povrchu zinkovací lázně, ale i její postupnou kontaminací nečistotami, dochází ke znečištění povrchu pozinkovaného plechu, které má negativní vliv na kvalitu povrchu. Další úskalím při zpracování žárově pozinkovaného plechu je jeho vyšší otěr v lisovacím nářadí ve srovnání s EG pozinkem. Avšak nově vyvíjené technologie ochrany žárově pozinkové vrstvy vedou ke snížení celkového otěru zinku v lisovacím nástroji. Tato ochrana částečně vyrovnává rozdíl mezi elektrolytickým a žárově pozinkovaným plechem. Nejpoužívanější jakosti pro stavbu ocelové karoserie jsou HX a DX. Výkresové označení oceli je zpravidla:

Tab. 1 Vysvětlení značení HDG ocelí [7]

Symbol z označení	Význam symbolu
DX / HX	Nízkouhlíková / vysokopevnostní ocel
51–57	Klasifikace oceli dle normy
D	Určený k žárovému pozinkování
Z	Žárově zinkováno
100	množství vyloučeného zinku na povrchu plechu v $g \cdot mm^{-2}$
M	Minimalizace zinkového květu
B	Střední jakost povrchu
O	Konzervace olejem

Vývoj, jak bylo již výše zmíněno, vede k postupnému nahrazování novými materiály, u HDG plechů je to na příklad změna zinkového povlaku za zinek-hořčík.

**Zinko-hořčíkové povlaky** jsou povlaky, které mají vyšší odolnost proti korozi, než čistě žárově pozinkované oceli. Díky mechanickým vlastnostem tohoto povlaku byly ve Škoda Auto a.s. zjištěny menší problémy při lisování, a to zejména se zadíráním samotného plechu v raznici. Povlaky na bázi zinek-hořčík jsou označovány jako perspektivní galvanická ochrana budoucích ocelí. [8]

### 2.3 Elektrolyticky pozinkované plechy

Elektrolyticky pozinkované plechy (EG) dle ČSN EN 10152 se používají především na vzhledově náročné díly. [3] Jsou to plechy válcované za studena, kde plech projde drezírovacími válci, následně je elektrolyticky pozinkován a poté je zinková vrstva zakonzervována fosfátováním. Fosfátování má za následek zvýšení odolnosti zinkové vrstvy. I když elektrolyticky nanesený zinek má lepší vzhledové vlastnosti, má oproti žárově nanesenému zinku méně ekologickou výrobu a nepatrně vyšší cenu, což se projevuje i na použití v automobilovém průmyslu (Obr. 5.), kde jeho zastoupení při výrobě postupně klesá. Jakost těchto ocelí se značí DC. [9] Výkresové označení oceli je zpravidla:

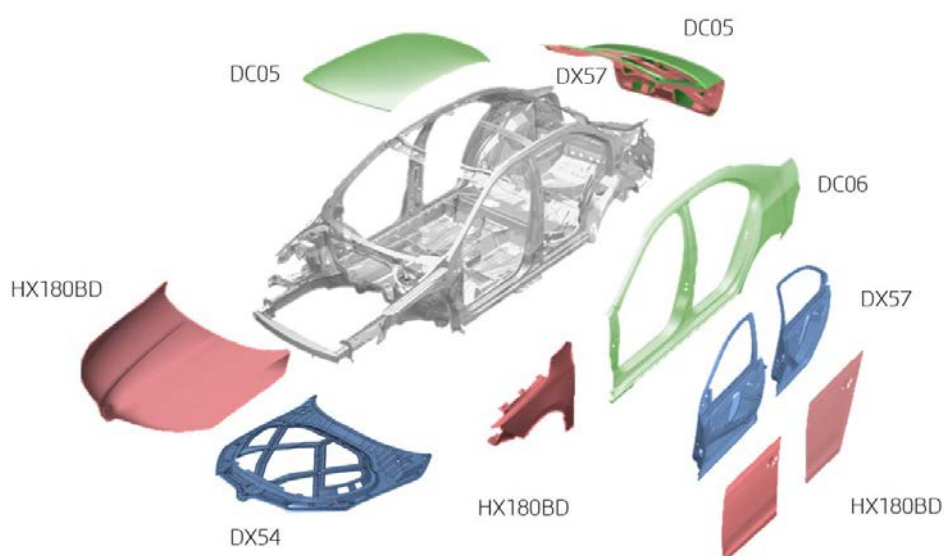


Tab. 2 Vysvětlení značení EG ocelí [9]

Symbol z označení	Význam symbolu
DC	Ocel za studena válcovaná
01-06	Klasifikace oceli dle normy
ZE	Elektrolyticky nanesený zinek
50/50	5 $\mu\text{m}$ Naneseného zinku na obou stranách plechu
B	Nejvyšší kvalita povrchu
P	Fosfátování
O	Konzervace olejem

## Vlastnosti DC06+ZE50/50-B-PO:

Mechanické vlastnosti			Chemické složení				
$R_{p0,2}$ [MPa]	$R_m$ [MPa]	$A_{80}$ [%]	C [%]	P [%]	S [%]	Mn [%]	Ti / Nb [%]
130 – 180	270 - 350	$\geq 41$	$\leq 0,021 \%$	$\leq 0,02 \%$	$\leq 0,02 \%$	$\leq 0,25 \%$	$\leq 0,3 \%$



Obr. 5: Zastoupení jednotlivých jakostí hlubokotažných ocelí [1]

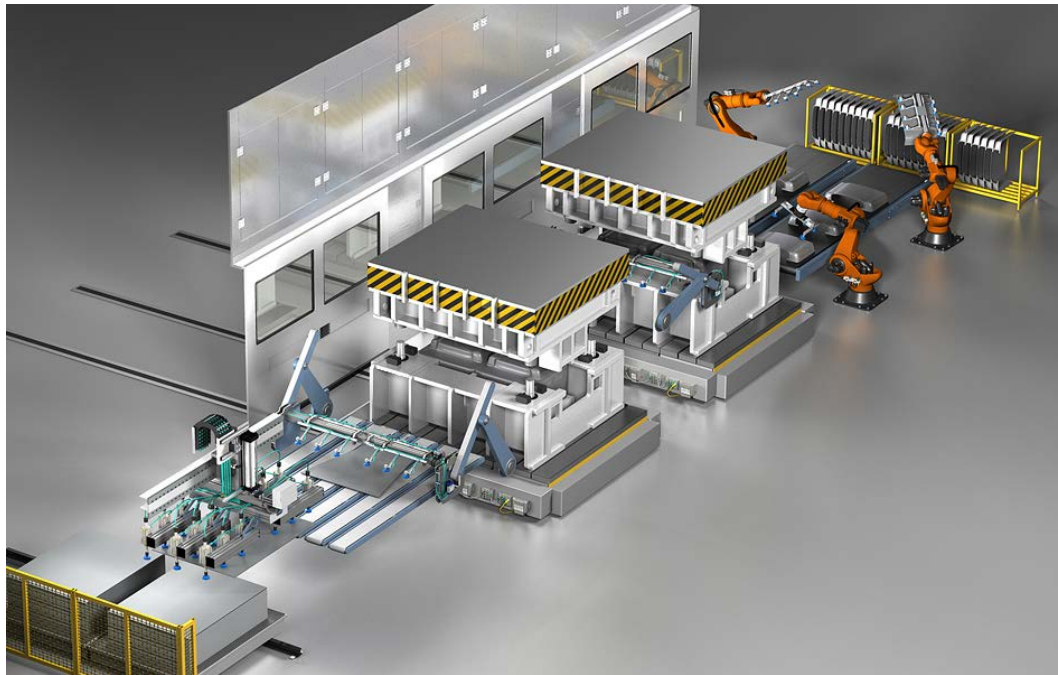
### 3 Zpracování hlubokotažných ocelí v automobilovém průmyslu

Tváření kovů je nedestruktivní technologický proces zpracování materiálu, při kterém dochází k postupné přeměně polotovaru za působení vnějších sil. [10] Tváření se dělí na tváření za tepla a za studena. V automobilovém průmyslu se používají hlavně oceli tvářené za studena, zejména kvůli zpevnování samotného materiálu a přesnosti. Mezi technologie tohoto odvětví patří především lisování, které se používá zejména k hlubokému tažení a stříhání. Obě tyto technologie se ve Škoda Auto a.s. používají, kdy stříhání se provádí na nástřihové a samotné lisování na lisovací lince.

#### 3.1 Technologie lisování

Lisování je technologický a výrobní proces tváření, který se odehrává pod rekrystalizační teplotou a je ovlivněné do velké míry vnitřní stavbou materiálu a vnějšími podmínkami lisování. [11] Nepříznivý faktor při zpracování plechů touto technologií je ve vyšší míře přítomnost uhlíku a manganu, kde tyto prvky zvyšují tvrdost, pevnost, křehkost, ale zároveň snižují houževnatost. [12] Na materiálu se lisování projevuje plastickou deformací pohybem dislokací, nejčastěji skluzem [13], při kterém dochází k trvalé změně tvaru výrobku nebo polotovaru působením velkých vnějších sil v závislosti na požadavku přetvoření. [8] Tento výrobní proces se používá především pro svou opakovatelnost, kdy je možné vyrobit velké série jednotlivých dílů s velmi vysokou přesností a kvalitou povrchu. [14] Lisování v automobilovém průmyslu (Obr. 6) patří k jednomu z nejtěžších, právě kvůli dnešním designovým trendům, které udávají ostré přechody karoserie, kdy pak tato technologie naráží na své limity. Tyto limity pak jsou přenášeny na materiál jako takový. V automobilovém průmyslu se používají hlubokotažné oceli, které umožňují jak složité, tak hluboké tahy. Tyto výlisky podléhají prostorovému ohybu s minimálním zeslabením tloušťky materiálu. Samotný materiál před hlubokým tažením musí být řádně ustaven a přidržen pomocí přidržovačů a brzdících lišt tak, aby nedocházelo k vlnění a zeslabení materiálu. [11] Při samotném lisování nepůsobí prostorová napjatost stejnoměrně, tím je zajištěno celkové přetvoření materiálu v požadovaném směru a místě.

Proces lisování ovlivňuje mnoho parametrů. Mezi hlavní parametry se řadí lisovaný materiál, u kterého záleží na chemicko-mechanických vlastnostech, konstrukční návrh lisovaného dílu, dále pak technologické podmínky lisování, které jsou spojené s nastavením samotného lisu, ale i tvářecího nástroje. [11]



**Obr. 6 Model lisovací linky [15]**

## 4 Komplexní posouzení materiálových charakteristik

Škoda Auto a.s. patří k jedné z mnoha firem, které mají zavedenu normu ISO 9001 a také jí vyžadují po svých dodavatelích. Tato norma je určitým standardem zajišťujícím kvalitu jak výrobků, tak služeb. Právě kvůli této normě zákazníci důvěřují dodavatelům, že kupovaný plech odpovídá určité kvalitě, kterou si objednali. Může se ale někdy stát, že výrobci plechu ve výrobní lince zůstanou zbytky předešlého produktu a tím pádem kontaminuje stávající, který nebude odpovídat objednaným parametrům. Pokud se takovýto plech dostane do výrobní linky automobilky a jeho zpracováním vzniknou problémy, nastává otázka, zda je to technologická či materiálová chyba. Pokud se bude jednat o chybu technologickou, tak určitou úpravou lisovacích podmínek se problém rychle odstraní, ale pokud se zjistí, že chyba je materiálová, musí dojít k reklamaci. Právě posuzování materiálových charakteristik patří mezi první postupy, které se uplatňují, pokud chceme přijít na důvod, proč daný svitek nelze lisovat. Požadované zkoušky stanoví přímo norma. Například ČSN EN 10152 předepisuje přesné mechanické vlastnosti, chemické složení ale i vzhled povrchu. Mechanické vlastnosti lze ověřeny zkouškou tahem dle ČSN EN ISO 6892-1.

### 4.1 Základní materiálový rozbor

Pokud chceme materiál hodnotit komplexně, je nutné postupovat od povrchu přes metalografické hodnocení, mikročistotu, chemii až po mechanické vlastnosti.

**Hodnocením povrchu** můžeme získat přehled o mikrogeometrii povrchu, jako je drsnost Ra, počet vrcholů RPc a výšková nerovnost Rz. Kvalita povrchu má přímý vliv jak na lisování tak i samotné lakování. Ve Škoda Auto a.s. je kvůli výrobnímu procesu požadováno zpravidla Ra 1 - 1,5 a minimálně RPc 40, se kterými souvisí i kvalita povrchu po drezírování.

**Metalografie** pomáhá hodnotit velikosti zrn, tvar zrna a mikročistotu, které významně ovlivňují jak fyzikální, tak mechanické vlastnosti. Čím je struktura jemnější, tím výrazně lepší jsou mechanické vlastnosti. Zkoumání mikročistoty umožňuje objasnit lokální vady materiálu, které způsobují vměstky. Hodnocení mikročistoty se standartě neprovádí, k tomuto kroku se přistupuje jen tehdy, pokud se na výliscích objevují nestandardní vady (např. praskání).

**Chemický rozbor** materiálů říká, z jakých prvků se daný materiál skládá. Hlubokotažnost ocelí ve značné míře ovlivňuje uhlík a mangan, kde tyto dva prvky zvyšují pevnost a tvrdost, ale snižují houževnatost. Další nežádoucím prvkem je křemík, který ocel rovněž zpevňuje, ale zároveň tím zhoršuje plastické vlastnosti. Dále pak fosfor, síra

a doprovodné prvky jako je chrom, nikl, měď, molybden a cín, kde tyto prvky se do materiálu dostávají ze surového železa a kovového šrotu. Také prvky jako jsou dusík, kyslík a vodík jsou rovněž nežádoucí. Většinu těchto vyjmenovaných prvků je potřeba snižovat na minimální či požadované hodnoty. [12]

**Kontrola mechanických parametrů** ověřuje, zda kupovaný materiál splňuje vlastnosti předepsané normou.

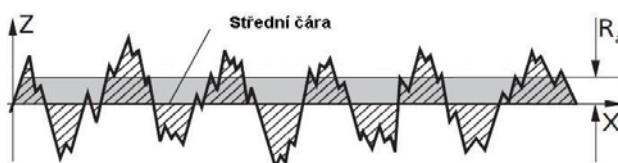
## 4.2 Povrchový profil

Geometrii povrchu měříme dle ČSN EN ISO 4287, která charakterizuje povrchovou strukturu materiálu. Mezi základní hodnocené parametry patří:

### 4.2.1 Střední aritmetická hodnota drsnosti Ra

Střední aritmetická odchylka drsnosti je definovaná jako aritmetický střed absolutních odchylek filtrovaného profilu drsnosti od střední čáry uvnitř základní délky  $l_r$ . [11]

$$R_a = \frac{1}{l_r} \int_0^{l_r} |Z(x)| dx \quad [\mu\text{m}] \quad (1)$$

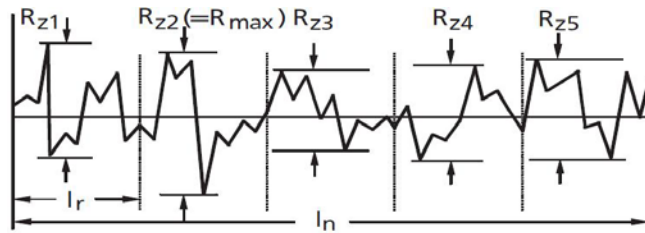


Obr. 7 Znárodnění střední aritmetické hodnoty Ra [11]

### 4.2.2 Výšková nerovnost Rz

Výšková nerovnost je definovaná jako střední hodnota vzdálenosti mezi 5-ti nejnižšími body prohlubní a 5-ti nejvyššími body výstupků. [11]

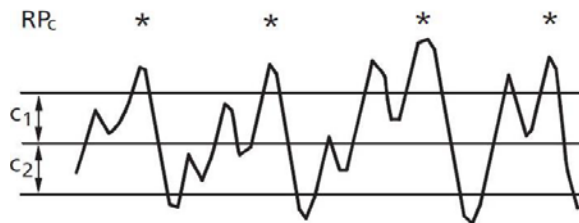
$$R_z = \frac{1}{n} (R_{z_1} + R_{z_2} + R_{z_3} + \dots + R_{z_n}) \quad [\mu\text{m}] \quad (2)$$



**Obr. 8 Znáznornění výškové nerovnosti Rz [11]**

#### 4.2.3 Počet vrcholů profilu $RP_c$

Počet vrcholů je definován jako počet výstupků na 10 mm délky, která stanovenou řeznou hladinu  $c_1$  překračuje a následně klesá pod spodní řeznou hranici  $c_2$ . [11] Znáznornění je vidět na Obr. 12



**Obr. 9 Znáznornění počtu vrcholů profilu  $RP_c$  [11]**

Po drezírování povrchu plechu jsme schopni porovnat jeho strukturu, která je důležitá pro ulpívání maziva, které snižuje tření v raznici při hlubokém tažení. K tomu to účelu se používá nejčastěji světelný mikroskop. [5]

### 4.3 Metalografie

Pojednává o vnitřní stavbě materiálu, jako jsou kovy a jejich slitiny. Cílem je zviditelnit strukturu materiálu a umožnit její hodnocení. Mezi hodnocené parametry patří velikost zrna jejich orientace, deformace zrna, případně vměstky a vady krystalové mřížky (hustota a rozložení dislokací) za pomoci světelného či elektronového mikroskopu. Do metalografie patří i příprava vzorku - metalografický výbrus - skládá se z odběru vzorku, jeho přípravy, zalévání, broušení, leštění a leptání povrchu. [16]

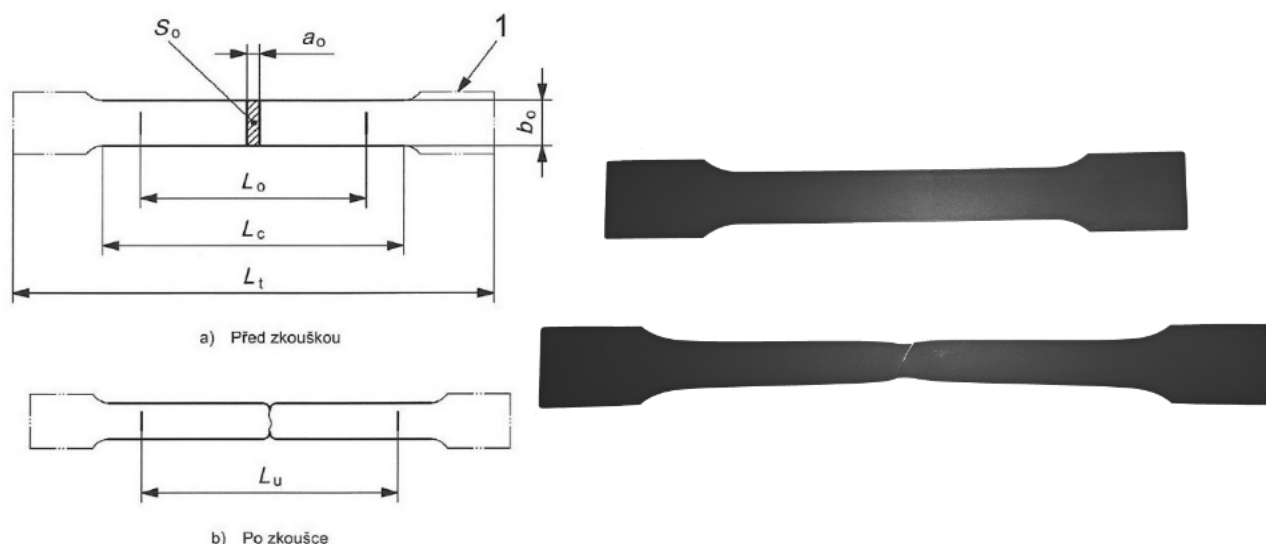
#### 4.4 Chemické složení

Za pomoci rozboru chemického složení jsme schopni rozeznat jednotlivé druhy atomů a jejich procentuální zastoupení ve zkoumaném materiálu a tím jednoznačně tento materiál identifikovat. U kovových materiálů se pro rozbor chemického složení používají jiskrové nebo energodisperzní fluorescenční spektrometry [17] [18]

#### 4.5 Zkouška technických parametrů materiálu

Zkouška tahem dle ČSN EN ISO 6892-1 patří v dnešní době díky své jednoduchosti a rychlosti mezi jednu z nejzákladnějších mechanických zkoušek.

Tato zkouška se používá k hodnocení pevnostních a plastických vlastností materiálu. Při zkoušce dochází k postupnému jednoosému zatěžování zkušební vzorku až do samotného lomu. Z důvodu postupného zatěžování vzorku vzniká elastická a následně plastická deformace v materiálu. Oblast pružné (elastické) deformace je popisována dle Hookova zákona, který uvádí závislost deformace a síly dle vzorce 7 [19]. Zkušební tyč je normovaná (Obr. 10, Tab. 3). Měření probíhá za pomoci siloměru a extenzometru, kterými lze stanovit mechanické vlastnosti materiálu jako je například mez kluzu, smluvní mez kluzu, mez pevnosti, tažnost, modul pružnosti a spotřebovaná energie. Všechny zjištěné hodnoty jsou zaznamenávány do protokolu o zkoušce. [20]



Obr. 10 Schéma zkušební tělesa pro jednoosý tah a reálné zkušební těleso [21]

**Tab. 3 Vysvětlení značení zkušebního tělesa [21]**

Symbol z obrázku	Význam symbolu
$a_0$	Počáteční tloušťka plochého zkušebního tělesa
$b_0$	Počáteční šířka zkoušené délky plochého zkušebního tělesa
$S_0$	Počáteční průřezová plocha zkoušené délky
$L_0$	Počáteční měřená délka
$L_t$	Celková délka zkušebního tělesa
$L_c$	Zkoušená délka
$L_U$	Konečná měřená délka po lomu
1	Upínací konec

#### 4.5.1 Mechanické vlastnosti materiálu

##### Mez kluzu

Mez kluzu je definována jako první napětí, při kterém se zkoušený materiál začíná intenzivně plasticky deformovat. Přechod mezi plastickou a elastickou deformací je dán materiálem a dělí se na varianty bez výrazné meze kluzu (4), kde se používá smluvní mez kluzu a s výraznou mezí kluzu (3). [22]

##### Mez kluzu

$$R_e = \frac{F_e}{S_0} \quad [\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}] \quad (3)$$

Smluvní mez kluzu je definovaná nejčastěji jako napětí dosažené při předepsané hodnotě poměrné plastické deformace (obvykle 0,2 %).

$$R_{p0,2} = \frac{F_{p0,2}}{S_0} \quad [\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}] \quad (4)$$

##### Mez pevnosti

Mez pevnosti v tahu je definována jako napětí odpovídající největšímu dosaženému zatížení zkušební tyče. [22]

$$R_m = \frac{F_m}{S_0} \quad [\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}] \quad (5)$$



### Tažnost

Tažnost je definovaná jako trvalé poměrné prodloužení měřené délky po přetržení tyče. [22]

$$A = \frac{L_u - L_0}{L_0} \quad [\%] \quad (6)$$

### Modul pružnosti

Modul pružnosti v tahu je jednou z materiálových konstant charakterizující tuhost materiálu. Hookeův zákon říká, že v oblasti elastické deformace je poměrné prodloužení  $\varepsilon$  přímo úměrné napětí  $R$ . [20]

$$R = E \cdot \varepsilon \quad [\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}] \quad (7)$$

### Anizotropie

U plechů tvářených za studena dochází vlivem válcování k přednostní deformaci zrn v jednom směru. Tato deformace má za následek vznik různých pevnostních a plastických závislostí závislých na směru. Tato nestejnomyšlnost mechanicko-materiálových vlastností v různých směrech je označována jako anizotropie. Při odběru vzorku pro jednoosou tahovou zkoušku je nutno poznamenat i orientaci odebíraného vzorku. V praxi se většinou odebírají ve třech směrech:  $r_0$  – směr válcování,  $r_{45}$  – pod úhlem  $45^\circ$  na směr válcování a  $r_{90}$  – kolmo na směr válcování [23]. Anizotropie se dělí na anizotropii normálovou a plošnou.

### Součinitel plastické anizotropie

je definován jako poměr skutečné plastické deformace šířky a skutečné plastické deformace tloušťky materiálu při zkoušce jednoosým tahem. [24]

$$r = \frac{\varepsilon_b}{\varepsilon_a} = \frac{\ln\left(\frac{b}{b_0}\right)}{\ln\left(\frac{L_0 \times b_0}{L \times b}\right)} \quad [-] \quad (8)$$

**Tab. 4 Vysvětlení symbolů rovnice pro součinitel plastické anizotropie**

Symbol z rovnice	Význam symbolu	Jednotky
$\varepsilon_b$	Skutečná plastická deformace tloušťky	[-]
$\varepsilon_a$	Skutečná plastická deformace šířky	[-]
$b_0$	Počáteční měřená šířka	mm
$b$	Konečná měřená šířka	mm
$L_0$	Počáteční měřená délka	mm
$L$	Konečná měřená délka	mm

### Vážený průměr součinitele plastické anizotropie

neboli normálová anizotropie je definován jako vážený průměr hodnot součinitele plastické anizotropie pro různé orientace zkušebního tělesa. [24]

$$\bar{r} = \frac{r_0 + 2r_{45} + r_{90}}{4} \quad [-] \quad (9)$$

### Plošná anizotropie

vyjadřuje nebezpečí vzniku cípatosti příruby výtažku a je definovaná tímto vzorcem: [11]

$$\Delta r = \frac{r_0 - 2r_{45} + r_{90}}{2} \quad [-] \quad (10)$$

Pokud  $\Delta r$  je  $> 0$  dochází k cípatění ve směru válcování ( $0^\circ$ ) a kolmo na směr válcování ( $90^\circ$ )

Pokud  $\Delta r$  je  $= 0$  nedochází k cípatění

Pokud  $\Delta r$  je  $< 0$  dochází k cípatění ve směru  $45^\circ$  na směr válcování [25]

Významný vliv na anizotropii má struktura a její pravidelné uspořádání, které je závislé na tváření a tepelném zpracování. Pro lisování plechů je nejvýznamnější poměr anizotropie plošné  $\Delta r$  a normálové  $\bar{r}$ , protože deformace materiálu probíhá na úkor šířky a ne tloušťky. V průběhu zatěžování materiálu vnějšími silami dochází k jeho zpevnění, které je způsobeno vzájemnou interakcí dislokací s poruchami krystalové mřížky [3] [13]. Deformační zpevnění je popsáno pomocí exponentu deformačního zpevnění.

### Exponent deformačního zpevnění

Exponent deformačního zpevnění  $n$  je definován jako schopnost daného materiálu se zpevňovat při plastické deformaci za studena a vyjadřuje se pomocí mocné závislosti mezi skutečným napětím a skutečnou plastickou deformací, která probíhá od meze kluzu do meze pevnosti materiálu. [3]

$$\sigma = C_{koef.} \cdot \varphi^n \quad [\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}] \quad (11)$$

Kde  $n$  se získá ze vztahu

$$n = \frac{\log(\sigma) - \log(C_{koef.})}{\log(\varphi)} \quad [-] \quad (12)$$

Exponent deformačního zpevnění závisí na směru válcování stejně jako anizotropie a posuzuje se nejčastěji ve třech směrech a to v  $n_0$  – směr válcování,  $n_{45}$  – pod úhlem  $45^\circ$  na směr válcování a  $n_{90}$  – kolmo na směr válcování. Výslednou hodnotu exponentu zpevnění získáme váženým průměrem hodnot exponentu deformačního zpevnění pro různé orientace zkušební tělesa a vyjadřuje schopnost materiálu rovnoměrně plastické deformace. [11]

$$\bar{n} = \frac{n_0 + 2n_{45} + n_{90}}{4} \quad [-] \quad (14)$$

Hodnocení váženého průměru exponentu deformačního zpevnění

$\bar{n} < 0,215$	Nízká tažnost
$\bar{n} = 0,215 - 0,250$	Dobrá tažnost
$\bar{n} > 250$	Vynikající tažnost [25]

### Zásoba plasticity

Jedná se o nepoužívanější ukazatel a je definována jako množství práce potřebné k plastické deformaci  $1 \text{ mm}^3$  v rovnoměrné deformaci. [25]

$$ZP = \frac{3(R_m - R_{p0,2}) \cdot A_H}{4} \quad [\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}] \quad (15)$$

Kde  $A_H$  vypočítáme dle vztahu: [25]

$$A_H = (e^n - 1) \cdot 100 \quad [\%] \quad (16)$$

### **Index tvářitelnosti**

Index tvářitelnosti dle Lankorda a Lieta:

$$IT = r_s \cdot n_s \cdot 1000 \quad [-] \quad (17)$$

Materiály s velmi dobrou tvářitelností mají  $IT \geq 300$ . [25]

### **Poměr meze kluzu a meze pevnosti**

Poměr by měl být co největší, tím se zvyšuje schopnost tvářet materiál [25] [26].

$$P_{koef.} = \frac{R_m}{R_{p0,2}} \quad [-] \quad (18)$$

### **Komplexní ukazatel tvářitelnosti [26]**

$$KUT = A_{80} \cdot P \quad [-] \quad (19)$$

### **Poměr tažnosti a smluvní meze kluzu [26]**

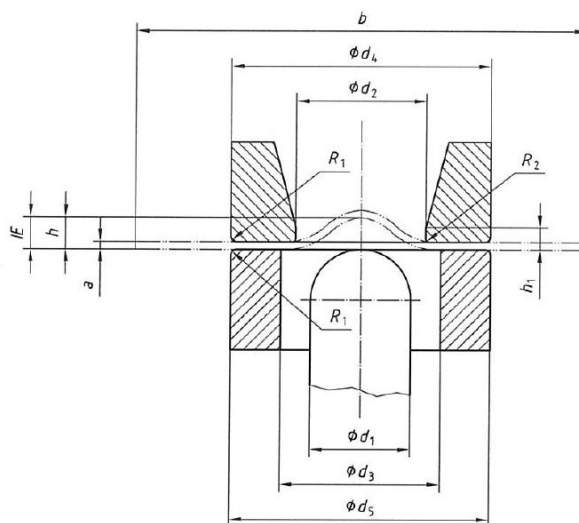
$$K = \frac{A_{80}}{R_{p0,2}} \cdot 100 \quad [\%] \quad (20)$$

## 5 Hodnocení tvářitelnosti za pomoci technologických zkoušek

Zkoušení hlubokotažných ocelí jednoosým tahem, kdy plech není vystaven víceosé napjatosti, neposkytuje kompletní představu o jejich vhodnosti k technologii lisování. Z důvodu přiblížení k reálným procesům lisovacího provozu se začíná uvažovat o využití jiných technologických zkoušek, které by mohly pomoci najít vysvětlení, proč z jednoho svitku plechu daný produkt lisovat lze a z druhého svitku nelze, za předpokladu, že oba svitky mají podobné mechanické parametry, předepsané normou. Celosvětově existuje mnoho uznávaných zkoušek, jako například zkouška hloubení dle Erichsena, zkouška dvouosým tahem, zkouška rozšiřováním otvoru podle Siebela a Pompa, kalíškovací zkouška, Nakajima test a jiné. [12] Každá z těchto zkoušek hodnotí materiál z jiného pohledu, proto se nemusí vždy shodnout na stejném výsledku či si dokonce mohou odporovat. Z toho důvodu je důležité před samotným zkoušením materiálu zhodnotit, která z těchto zkoušek je vhodná k technologii lisování.

### 5.1 Zkouška hloubení dle Erichsena

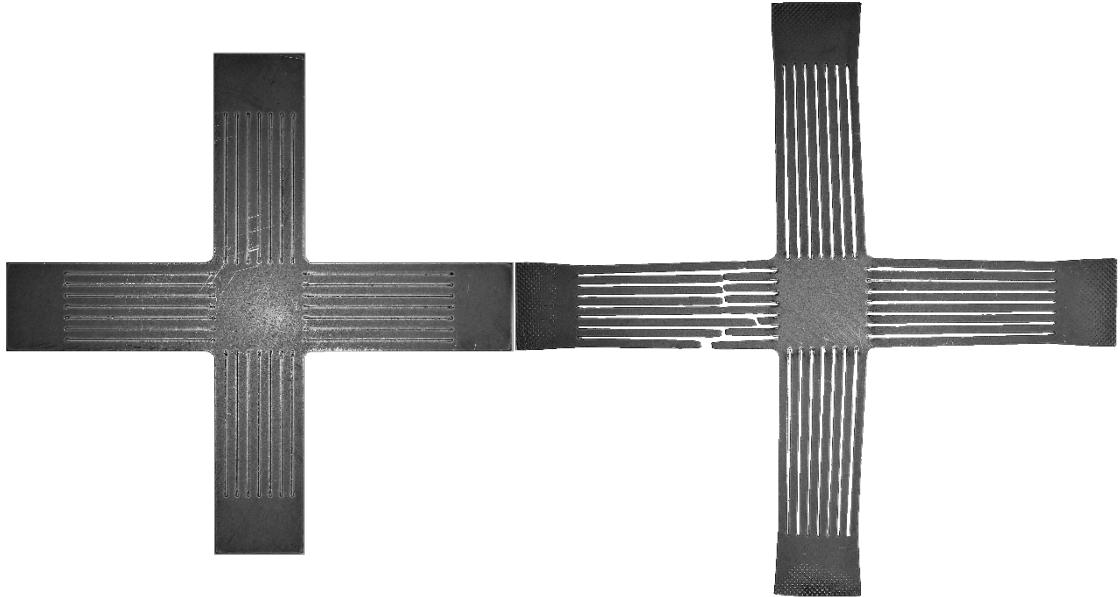
Zkouška je normovaná dle ČSN EN ISO 20482 a používá se k hodnocení vhodnosti plechů k hlubokému tažení. Probíhá za pomoci razníku s půlkulovým zakončením, který se zatlačuje do zkušebního tělesa upnutého mezi přidržovačem a raznicí. Zatlačováním se vytváří prohloubení až do vzniku průchozí trhliny. Ve zkoušce se hodnotí hloubka prohloubení  $h$  známá také jako hodnota hloubení dle Erichsena (IE), založeném na pohybu razníku a směr trhliny. Výhoda této zkoušky je jednoduchost a nenáročnost přípravy zkušebního plechu. [27]



Obr. 11 Schéma zkušebního přípravku dle ČSN EN ISO 20482 [27]

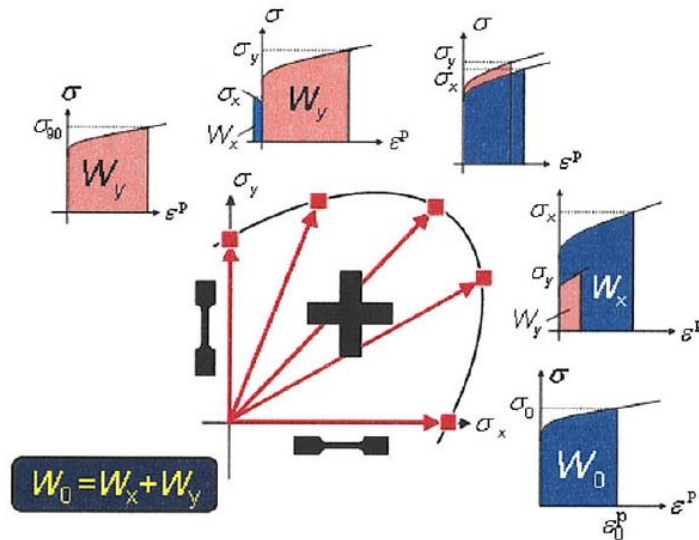
## 5.2 Zkouška dvouosým tahem

Zkouška dvouosým tahem je předepsána normou ČSN EN 16842. Tato zkouška není v automobilovém průmyslu zcela běžná. I přes jednoduché provedení zkoušky má výrazně vyšší náročnost přípravy zkušebního tělesa, než výše zmiňovaná zkouška jednoosým tahem. Zároveň je i náročnější vyhodnocení zkoušky.



**Obr. 12 Zkušební těleso tvaru kříže dle normy ČSN EN 16842 před a po přetržení**

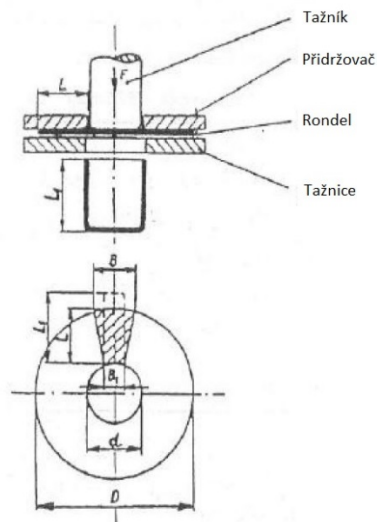
Zjišťuje napětí na mezi kluzu a křivky napětí – deformace zkušebních těles za dvouosého tahového napětí současným a kontinuálním měřením dvouosých tahových sil deformačních složek aplikovaných na měřenou oblast zkušebního tělesa ve tvaru kříže (Obr. 15). Dvouosé tahové síly jsou aplikovány v na sebe kolmých směrech rovnoběžnými s rameny zkušebního tělesa. Křivky napětí a deformace ve směru  $x$  a  $y$  u zkušebního tělesa se musí stanovit pomocí naměřených hodnot  $(F_x, F_y)$  a  $(e_x, e_y)$ . Tyto křivky se použijí ke stanovení izochar plastické práce (Obr. 16) pro zkoušený materiál. [28]



Obr. 13 Schéma pro stanovení izočar plastické práce [28]

### 5.3 Zkouška kalíškovací

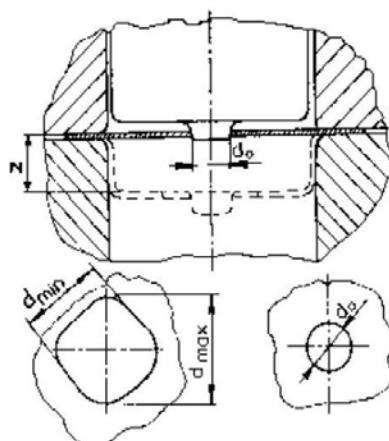
Kalíškovací zkouška (známá také jako Schmidtova nebo Swiftova) věrně napodobuje proces hlubokého tažení. Mírou hlubokotažnosti je součinitel tažení  $M$ , který je definován jako poměr  $d/D$ , kde  $d$  je průměr tažníku,  $D$  průměr přístřihu. Jedná se o nenormovanou zkoušku, která je určena především pro hlubokotažné plechy, rotačně symetrického tvaru výtazku. [29]



Obr. 14 Schéma kalíškovací zkoušky [12]

## 5.4 Zkouška rozšiřováním otvoru podle Siebela a Pompa

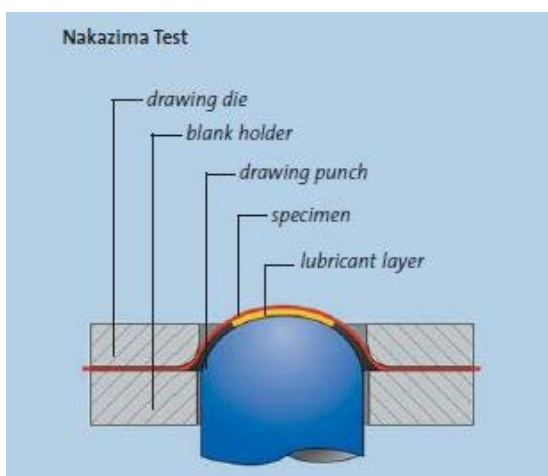
Jedná se znovu o nenormovanou zkoušku, jejíž princip spočívá v tažení zkušební tělesa ve tvaru čtverce s předpřipraveným otvorem (Obr. 16), kdy zkušební těleso je přidržováno přidržovačem a taženo tažníkem. Postupným tažením se předpřipravený otvor zvětšuje do doby vzniku první trhliny [12]



Obr. 15 Schéma zkoušky dle Siebela a Pompa [12]

## 5.5 Zkouška Nakajima test

Nakajima test, stejně jako zkouška dle Erichsena, staví z 90 % na deformování zkušební tělesa půlkulovým razníkem až do samého prasknutí jak je znázorněno na Obr.17. Maximální charakteristika deformace spočívá (před prasknutím) v různých tvarech zkušebních vzorků a tím jsou definovány limitní křivky tváření materiálu. Limitní křivky tváření jsou předepsány dle ČSN ISO 12004. [30]



Obr. 16 Schéma Nakajima testu [30]

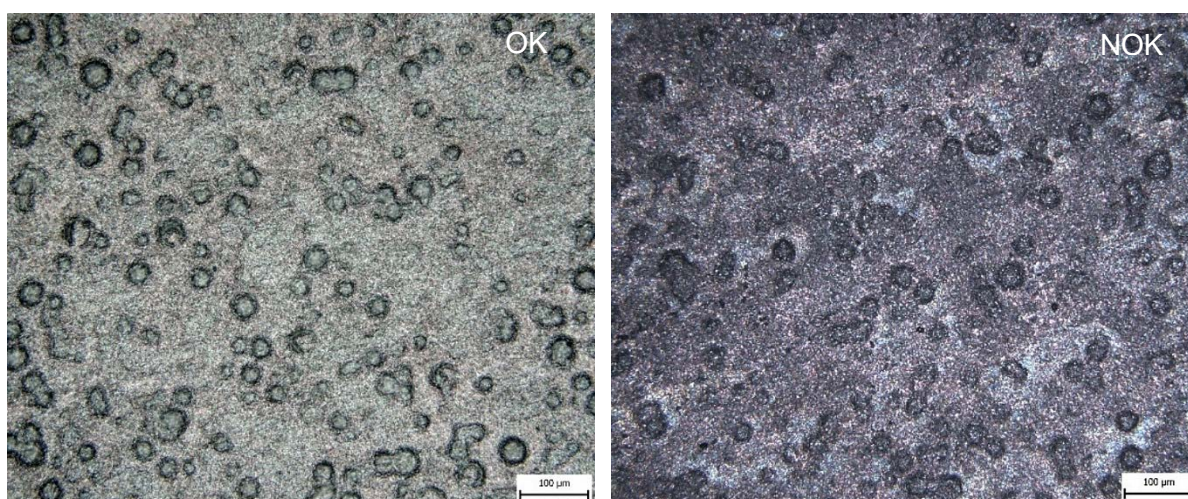


## 6 Experimentální část

V praktické části bakalářské práce se budu zabývat porovnáváním dvou materiálů stejné jakosti DC06+ZE50/50-B-PO, které vykazují rozdílné chování během procesu lisování. Lisování vzorku č. 1 bylo stabilní, zatímco vzorek č. 2 tvoří namoženiny (oblast materiálu s vyčerpanou plasticitou, kde dochází k tvorbě krčku) nebo propadliny nebo dokonce praskliny. Právě z důvodu zajištění stability lisovacího procesu, se bude materiál hodnotit od povrchu přes chemické složení, metalografii, mechanické zkoušení až po speciální techniky zkoušení mechanických hodnot. To vše ve snaze zjistit rozlišenosti mezi vzorky a tím najít důvody nemožnosti vzorek č. 2 lisovat a tím zlepšit stabilitu výrobního procesu

### 6.1 Hodnocení povrchu

Pozorování povrchu a mikrostruktury bylo prováděno na mikroskopu Olympus GX71. Jedná se o inverzní světelný mikroskop pro metalografické použití. K měření drsnosti povrchu byl použit drsnoměr MarSurf PS1 od firmy Mahr. Jedná se o kontaktní přenosný drsnoměr.



Obr. 17 Vzorek č. 1 vlevo a č. 2 vpravo (povrch s texturou)

Tab. 5 Naměřené hodnoty drsnosti

	Ra [ $\mu\text{m}$ ]	RPc [ $\mu\text{m}$ ]	Rz [ $\mu\text{m}$ ]
Předpis závodu	1,0 – 1,5	> 70	-
Doporučená hodnota lisovny	1,0 – 1,3	-	-
Vzorek č. 1	1,3	86	7,9
Vzorek č. 2	1,0	95	6,8
Porovnní vzorků	-0,3	9	-1,1

Povrchy vzorku č. 1 a č. 2 mají stochastické rozmístění prohlubní po drezírování, tento druh rozmístění se dodává pod obchodním názvem PRETEX. Z hodnocení obou plechů je patrné, že jsou v pořádku a nevykazují žádné abnormality. Drsnost i počet vrcholů se drží jak v předepsané, tak v doporučené hodnotě dle požadavku Škoda Auto a.s. Hodnota drsnosti vzorku č. 1 je přibližně v půlce intervalu předpisu a na horní hranici doporučené hodnoty, zato u vzorku č. 2 je hodnota na spodní toleranci. Počet vrcholů předpis Škoda Auto a.s. splňují oba. Vzorek č. 1 má nepatrně menší drsnost, ale vyšší výškovou nerovnost, na kterou neexistuje firemní předpis či požadavek.

## 6.2 Analýza chemického složení

Chemický rozbor se prováděl v centrální laboratoři Škoda Auto a.s. na zařízení Q4 Tasman od společnosti Bruker Elemental GmbH (Obr. 18). Jedná se o plně digitální jiskrový optický emisní spektrometr s Bit-Stream plazmovým generátorem a dvojitým CCD optickým systémem, který je určen pro měření velkého množství vzorků. Používá se pro analýzu většiny kovových materiálů. [31]



Obr. 18 Q4 Tasman [32]

Tab. 6 Chemické složení hlubokotažných pleců

[Hmot. %]	C	Si	Mn	P	S	Al	Ti	Cu
ČSN EN 10152	≤ 0,21	-	≤ 0,25	≤ 0,02	≤ 0,02	-	≤ 0,3	-
Vzorek č. 1	0,01	0,07	0,09	0,006	0,006	0,05	0,07	0,01
Vzorek č. 2	0,01	0,096	0,1	0,008	0,005	0,04	0,07	0,02
Porovnání vzorků	0	0,026	0,01	0,002	-0,001	-0,01	0	0,01

Rozbor ukázal, že chemické složení obou materiálů odpovídá předpisu ČSN EN 10152 a vzorky nevykazují velké rozdíly, které by měly zásadní vliv na jakost materiálu. U vzorku č. 2 je mírně vyšší obsah křemíku, manganu, fosforu a mědi, kde tyto prvky ve větší koncentraci ovlivňují mechanické parametry jako tvrdost, křehkost a houževnatost.

## **6.3 Metalografie**

Metalografie pojednává o vnitřní stavbě kovů a slitin, díky které můžeme nahlédnout do struktury materiálu za pomoci světelného mikroskopu. Proces se skládá z přípravy vzorku a ze samotného pozorování. [5] Cílem je porovnat oba vzorky, zda nevykazují nějaké vměstky, hrubozrnnou strukturu, či jiné abnormality.

### **6.3.1 Příprava vzorku**

Před samotným pozorováním vzorku je důležitá příprava, která se skládá z řezání, zalévání, broušení a následného leptání. Vzorky jsem připravil v metalografické laboratoři oddělení PFS-K, kde tento technologický postup začíná řezáním vzorku na speciální metalografické pile. Vzorky se na této pile řežou z důvodu minimalizace deformací a tepelného ovlivnění.

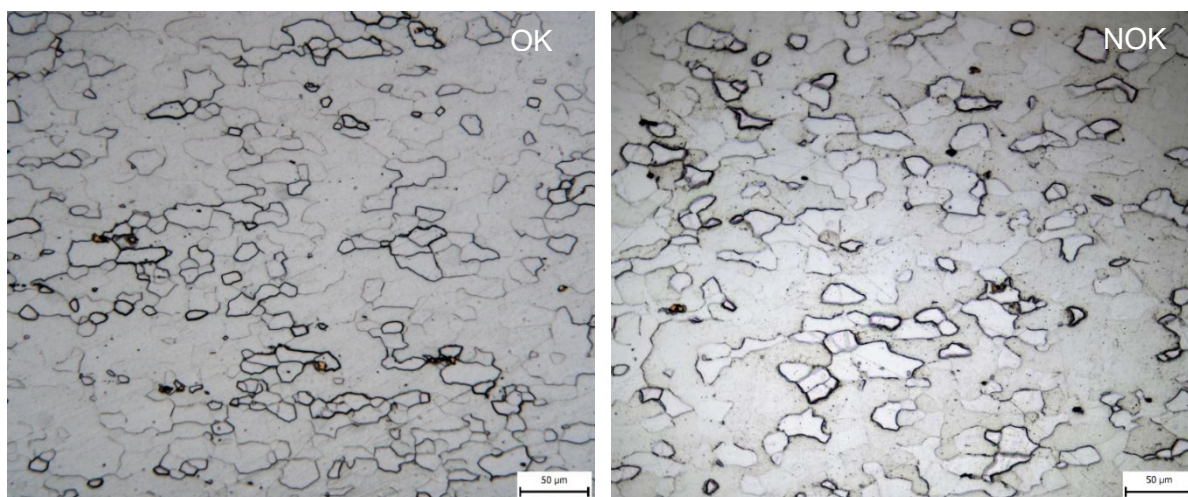
Dalším krokem je zalévání vzorku do speciální zalévací hmoty. Technologie zalévání se provádí buď za tepla, nebo za studena. Ve Škoda Auto a.s. se používají obě tyto technologie. Pro přípravu metalurgických výbrusů jsem použil technologii za studena, kdy se vzorek umístěný v přípravku zalije akrylátovou pryskyřicí a nechá vytvrdit za zvýšeného tlaku zhruba třicet minut.

Předposlední operace je broušení a leštění, kdy se začíná od nejhrubšího brusného papíru po jemné diamantové lešticí suspenze, přičemž každá operace odebírá deformace té předchozí a vytváří tak hladký povrch. Technologický postup použitý k přípravě vzorků, je znázorněn v Tab. 7.

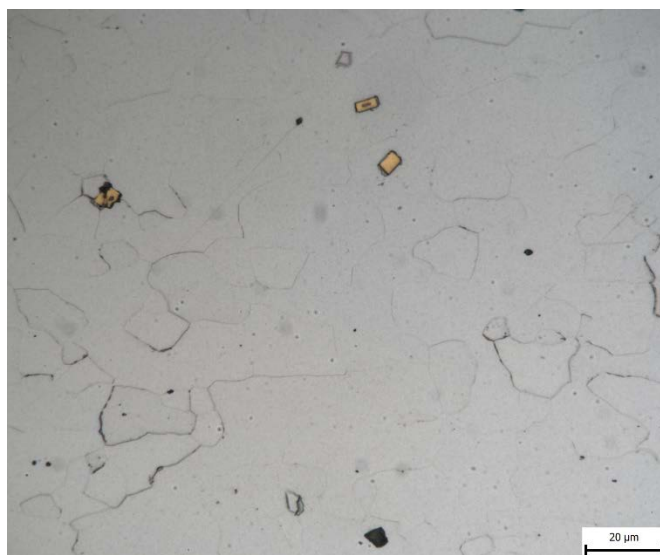
**Tab. 7 Technologický postup broušení a leštění [33]**

Operace	Brusný papír / emulze	Čas	Přítlak a otáčky	Směr otáčení	Smáčení
Broušení	Brusný papír P320	100 s	25N / High	Po směru	Voda
Broušení	Brusný papír P600	100 s	25N / High	Po směru	Voda
Broušení	Brusný papír P1200	100 s	25N / High	Po směru	Voda
Leštění	Emulze 9 $\mu\text{m}$	330 s	25N / Low	Proti směru	Smáčedlo
Leštění	Emulze 3 $\mu\text{m}$	300 s	25N / Low	Po směru	Smáčedlo
Leštění	Emulze 1 $\mu\text{m}$	180 s	25N / Low	Po směru	Smáčedlo
Leštění	Emulze 0,05 $\mu\text{m}$ masterprep	90 s	25N / Low	Proti směru	Voda

Posledním krokem pro zviditelnění struktury materiálu po leštění je vytvoření reliéfu ve vrchní vrstvě obvykle chemicky. To bylo provedeno za pomoci leptadla Adler (kyselina chlorovodíková + chlorid železitý + tetrachloroměďňatan diamonný + destilovaná voda), kdy se vzorek potře leptadlem, opláchne vodou a poté opláchne etanolem a nechá vysušit horkým vzduchem. Leptadlo Adler se používá především pro leptání oceli, svarových spojů a k makro-leptání. Naleptaná mikrostruktura byla poté pozorována na mikroskopu Olympus GX71 a je znázorněna na Obr. 12 a 13. [5], kde je i porovnání mikrostruktury obou vzorků.

**Obr. 19 Mikrostruktura vzorku č. 1 vlevo a č. 2 vpravo**

Oba vzorky mají feritickou mikrostrukturu s polyedrickými zrny s občasným výskytem karbonitridu titanu (Obr. 20).



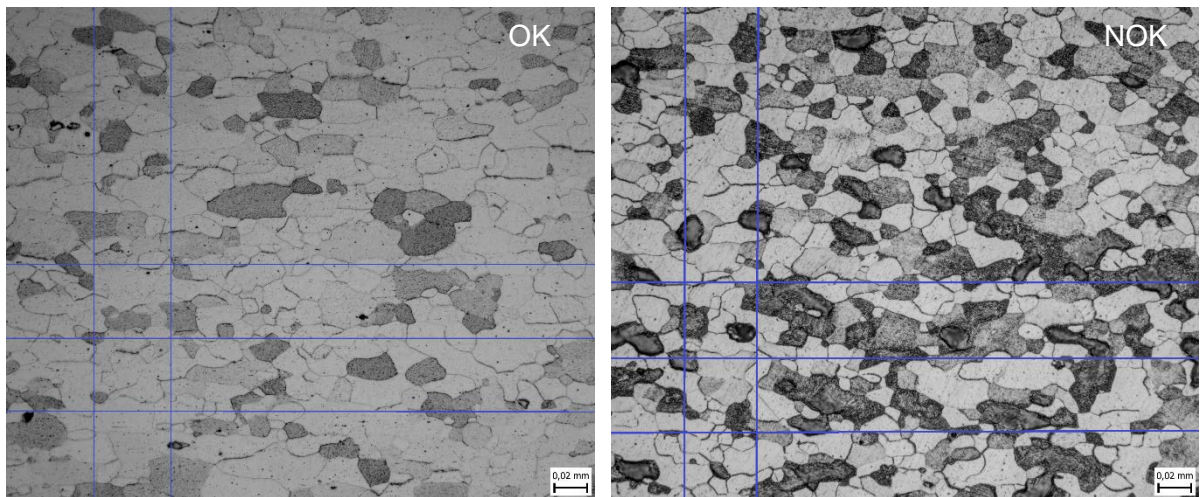
**Obr. 20 Mikrostruktura s výskytem karbonitridu titanu**

#### 6.4 Velikost zrn

Velikost zrna byla měřena pomocí průsečkové metody, kde se stanovuje počet protnutých zrn zkušební čarou. Měření probíhá nanesením zkušební čáry o známé délce na fotografii matrice materiálu při určitém zvětšení. Při měření je potřeba dbát na zachycení minimálně 50 úseků. Proto byly na jednu fotografii použity tři horizontální a dvě vertikální zkušební úsečky s celkovou skutečnou délkou 1,592 mm pro vzorek č. 1 a 2 (Obr. 21). Počet napočítaných úseků zrn, průměrné délky úseku, velikosti zrna a střední hodnoty zrna  $\bar{d}$  jsou shrnuty v Tab. 8.

**Tab. 8 Výsledky z měření velikosti zrn**

	Úseky zrn [mm]	Průměrná délka úseku [μm]	Velikost zrna G	Střední hodnota zrna $\bar{d}$ [μm]
Vzorek č. 1	127	12,5	9,5	11
Vzorek č. 2	133	11,9	9,5	10,5
Porovnání vzorků	6	-0,6	0	-0,5



**Obr. 21 Znáznornění počítání velikosti zrn vzorku 1 a 2 průsečikovou metodou**

## **6.5 Porovnání mechanických vlastností**

Zkušební stroj pro porovnání mechanických vlastností materiálů se skládá z pevného tuhého rámu, kde je v jeho horní části umístěna horní upínací hlava. Uprostřed se nachází střední příčnick, kde je umístěn siloměr spojený se spodní upínací hlavou. V upínacích hlavách jsou zabudovány upínací čelisti, do kterých se umísťuje zkušební tyč (Obr. 10). Mezi upínacími hlavami se nachází extenzometr. Pohybem středního příčnicku dochází k postupnému zatěžování zkoušeného materiálu a jeho deformaci. [5]

V této práci se prováděly experimenty na mechanicky poháněném zkušebním stroji LabTest 6.100 od firmy Labortech (Obr. 22). Zkouška probíhala za rychlosti 10 mm/min a byla ukončena po přetržení nebo po 50% poklesu síly. U obou materiálů se provádělo hodnocení mechanických parametrů pro směry 0°, 45° a 90°. Pro každý směr bylo připraveno 15 zkušebních vzorků.



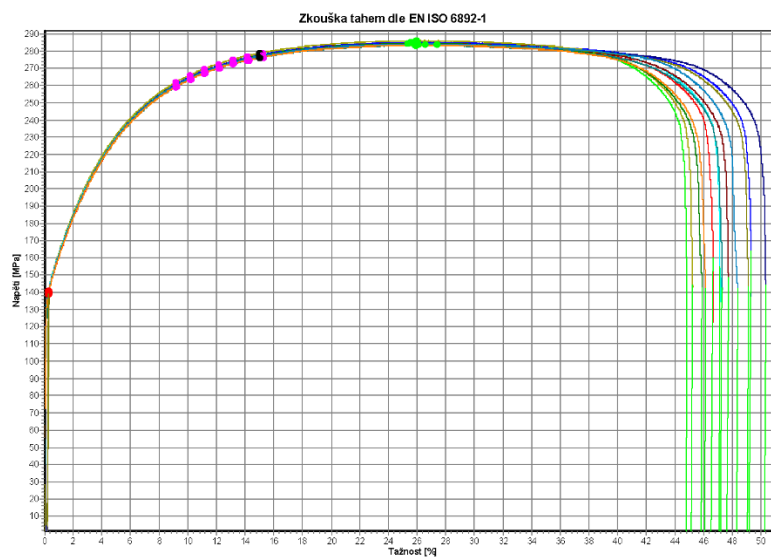
Obr. 22 Zkušební troj LabTest 6.100

Číslo dílu: BP\_Duchac  
 Jakost: DC06+ZE50/50BPO  
 Norma: EN 10152  
 Číslo svitku: 11906003  
 Výrobce:  
 Ra: 1,29; Pc: 88; Úhel: 90

Datum: 17.07.17  
 Zkoušející: Alfred Ducháč  
 Oddělení: PFS-K

### Zkušební parametry

Typ stroje: LabTest 6.100  
 Rozměry vzorku: b = 20,1 mm  
 Zadání délek: Le = 80 mm; Lc = 120 mm; L0 = 80 mm  
 Zkušební rychlosti: V0 = 1 mm/min; V1 = 10 mm/min  
 Kriterium ukončení zkoušky: Síla = 100000 N; dF = 50 %



Obr. 23 Protokol z tahové zkoušky vzorku č. 1

**Tab. 9 Porovnání nenormovaných mechanických parametrů pro směr 0°**

		E [GPa]	R <sub>p0,2</sub> [MPa]	R <sub>m</sub> [MPa]	A <sub>80</sub> [%]	R <sub>m</sub> /R <sub>p0,2</sub>	r <sub>80</sub>	n	Práce [kJ·mm]
0°	Vzorek č. 1	179,0 ± 6,81	137 ± 2	290 ± 2	49,9 ± 0,78	2,11 ± 0,03	2,12 ± 0,11	0,25 ± 0	163,2 ± 2,15
	Vzorek č. 2	187,1 ± 2,09	151 ± 1	303 ± 1	47,4 ± 0,92	2,01 ± 0,01	1,9 ± 0,01	0,24 ± 0	162,6 ± 3,35
Porovnání vzorků		8,1	14	13	-2,5	-0,10	-0,08	-0,01	0,6

**Tab. 10 Porovnání nenormovaných mechanických parametrů pro směr 45°**

		E [GPa]	R <sub>p0,2</sub> [MPa]	R <sub>m</sub> [MPa]	A <sub>80</sub> [%]	R <sub>m</sub> /R <sub>p0,2</sub>	r <sub>80</sub>	n	Práce [kJ·mm]
45°	Vzorek č. 1	207,6 ± 3,36	146 ± 1	293 ± 0	46,0 ± 0	2,02 ± 0,01	2,02 ± 0,10	0,24 ± 0	153,2 ± 2,25
	Vzorek č. 2	208,0 ± 1,95	154 ± 0	303 ± 0	45,5 ± 1,21	1,97 ± 0,01	1,86 ± 0,04	0,24 ± 0	156,1 ± 4,33
Porovnání vzorků		0,4	8	10	-0,5	-0,5	-1,6	0	2,9

**Tab. 11 Porovnání normovaných mechanických parametrů dle normy ČSN [9]**

		E [GPa]	R <sub>p0,2</sub> [MPa]	R <sub>m</sub> [MPa]	A <sub>80</sub> [%]	R <sub>m</sub> /R <sub>p0,2</sub>	r <sub>80</sub>	n	Práce [kJ·mm]
ČSN EN 10152		-	130 - 180	270 – 350	≥ 41	-	≥ 2,1	≥ 0,210	-
90°	Vzorek č. 1	190,9 ± 19,63	140 ± 1	284 ± 1	47,3 ± 1,71	2,03 ± 0,01	2,78 ± 0,24	0,25 ± 0	152,3 ± 5,66
	Vzorek č. 2	202,9 ± 4,9	154 ± 1	300 ± 1	44,3 ± 1,46	1,95 ± 0,01	2,39 ± 0,10	0,24 ± 0	150,3 ± 5,36
Porovnání vzorků		12	14	16	-3	-0,08	-0,39	-0,01	-2

Technické parametry pro normalizovaný směr 90° se liší ve velmi malých hodnotách a splňují předepsanou normu. Více viz Tab. 11 a zkušební protokol Obr. 24.



**Tab. 12 Komplexní posouzení obou zkušebních vzorků**

	P [–]	KUT [–]	ZP [N · mm <sup>-2</sup> ]	IT [–]	K [%]	$\bar{r}$ [–]	$\Delta r$ [–]	$\bar{n}$ [–]
Vzorek č. 1	2,04	96,4	3076,6	547,6	33,8	2,24	0,22	0,25
Vzorek č. 2	1,97	90,1	2970,2	483	29,8	2,01	0,15	0,24
Porovnání vzorků	-0,07	-6,3	-106,4	-64,6	-4	-0,23	-0,07	-0,01

Z poměru meze pevnosti a smluvní meze pevnosti P je vidět, že vzorek č. 1 má nižší smluvní mez kluzu a tím je tento poměr vyšší. To má za následek větší schopnost tvárnosti, což potvrzuje i komplexní ukazatel tvárnosti, který je o 6,5 % větší u vzorku č. 1 než v případě vzorku č. 2. Naopak vzorek č. 1 potřebuje více práce na 1 mm<sup>3</sup> než vzorek č. 2, což v praxi nemá tak významný vliv z důvodu předimenzování lisovacích zařízení. Oba vzorky mají velmi dobrý index tvárnosti, avšak vzorek č. 1 má tento parametr o 11 % vyšší. U vzorku č. 1 je poměr tažnosti a smluvní meze kluzu o 4 % a normálová anizotropie téměř o 10 % vyšší. Plošná anizotropie je větší než nula, to znamená že cípatění se tvoří kolmo 90° a na směr válcování 0°. Exponent zpevnění se pak pohybuje v rozmezí od 0,215 do 0,250. To znamená, že oba vzorky jsou na hranici výborné tažnosti, což jen potvrzuje předešlé výsledky.

## 6.6 Zkouška dle Erichsena

Zkouška se prováděla na mechanicky poháněném zkušebním stroji LabTest 6.100 od firmy Labortech. Zkouška probíhala na zařízení s půlkulovou raznicí s přidržovačem a razníkem za standardních podmínek dle ČSN EN ISO 20482, kdy se mezi přidržovače vloží plech a postupným posouváním razníku do plechu vzniká odpor a deformace ve tvaru kalíšku do samotného prasknutí, jak je možno vidět na Obr. 24, přičemž samotný děj je snímán pomocí videoextenzometru. Zkouška probíhala při předpětí 30 N, rychlosti 15 mm/min a byla ukončena při 10% poklesu síly. Pro oba materiály bylo při této zkoušce připraveno 15 zkušebních vzorků. Zkušební protokol z měření vzorků sady č. 2 je uveden na obrázku 26.



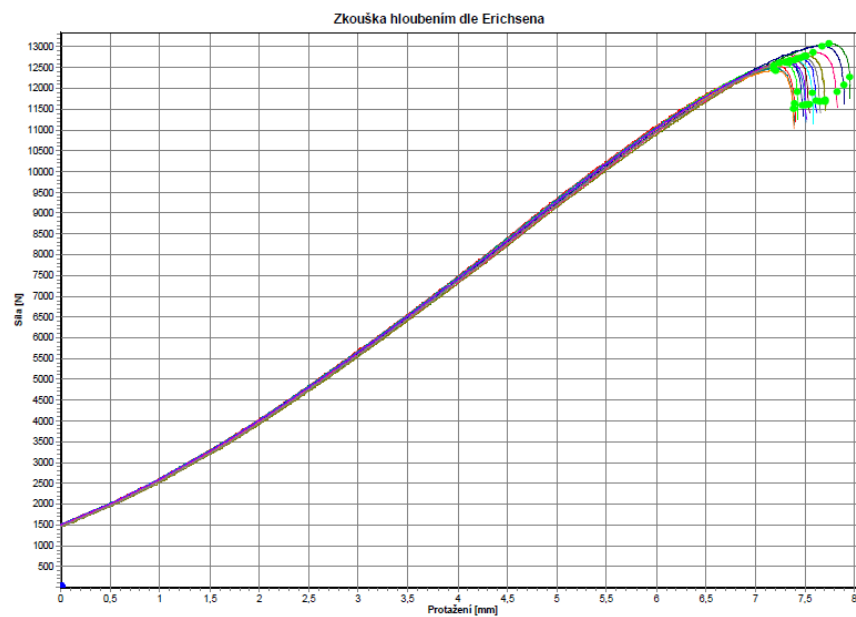
**Obr. 24 Zkušební zařízení pro zkoušku dle Erichsena**

Číslo dílu: BP Ducháč OK  
 Jakost: DC06+ZE50/50  
 Číslo svítku: 839830003  
 Výrobce:  
 Zkoušející: Alfred Ducháč  
 Oddělení: PFS-K

Datum: 14.08.17  
 Cas: 13:55

#### Zkušební parametry

Typ stroje: LabTest 6.100  
 Přepínací body: F0 = 30 N  
 Kriterium ukončení zkoušky: Síla = 50 kN; dF = 10 %



**Obr. 25 Ukázka zkušebního protokolu**

**Tab. 13 Hodnoty ze zkoušky dle Erichsena**

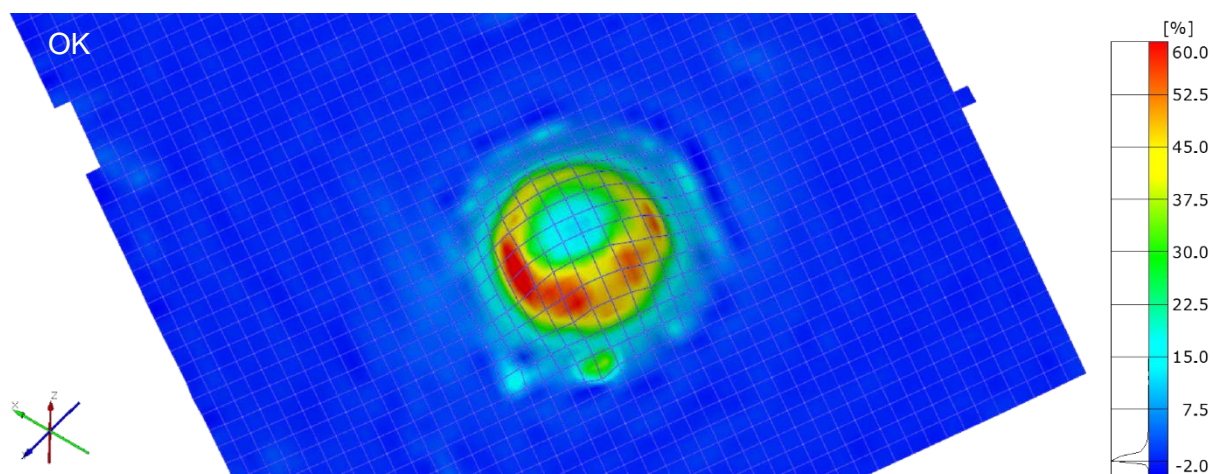
	$F_{max}$ [kN]	EI [mm]
Vzorek č. 1	$12,66 \pm 0,11$	$7,59 \pm 0,13$
Vzorek č. 2	$12,71 \pm 0,17$	$7,59 \pm 0,18$
Porovnání vzorků	-0,05	0

Zkouška hloubení dle Erichsena (Tab. 13) neukázala velké rozdíly mezi vzorkem č. 1 a č. 2. Jediné co je o necelé půl procento větší, je maximální dosažená síla před vytvořením praskliny u vzorku č. 1, jinak hodnota hloubení EI je stejná. Směr trhliny, jak je vidět na Obr.27 je u všech zkušebních vzorků vrstevnicového charakteru.

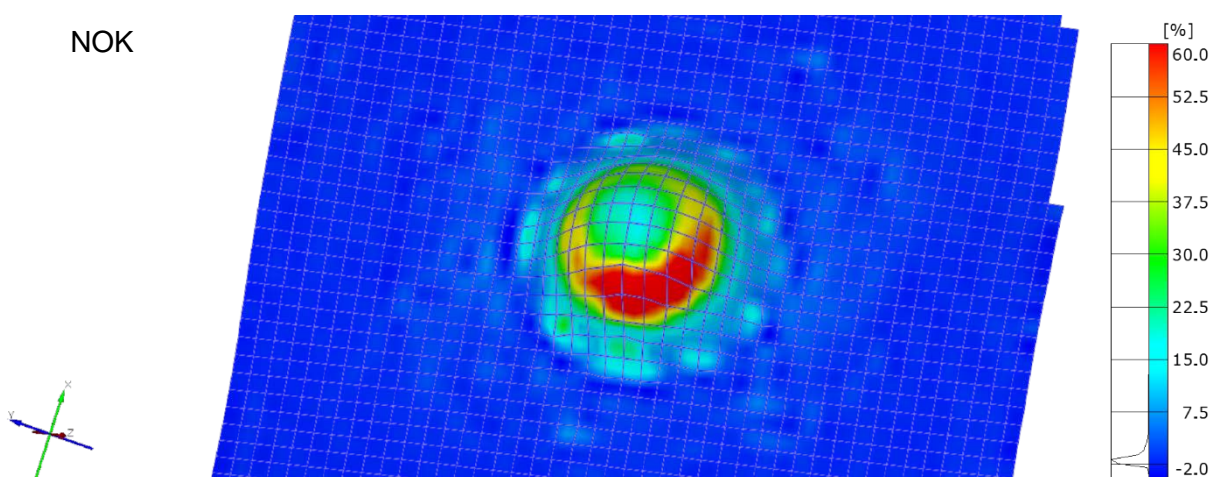


**Obr. 26 Ukázkový zkušební vzorek po zkoušce dle Erichsena**

Na zkušebních tělesech se dále prováděla optická deformační analýza pomocí systému Argus od firmy GOM pro zjištění deformačních napětí a přiblížení průběhu deformace zkušebního tělesa. Z deformační analýzy (Obr. 28 a Obr. 29) je vidět postupná deformace od 0% až po 60% deformaci v místě ztenčení a utvoření praskliny.



**Obr. 27 Deformační analýza vzorku č. 1 (M1V10) pomocí systému Argus**



**Obr. 28 Deformační analýza vzorku č. 2 (M2V3) pomocí systému Argus**

Deformační analýza obou vzorků neprokázala zásadní rozdíly ani v průběhu deformace při zkoušce dle Erichsen. Napětí obou prasklin je podobné.

## 7 Celkové zhodnocení

V rámci řešení bakalářské práce byl porovnáván materiál identické jakosti (DC06) z různých dodávek s rozdílnými kvalitativními výsledky v procesu lisování. Pro analýzu příčin rozdílných vlastností plechů byly zvoleny následující zkušební metody: hodnocení drsnosti a morfologie povrchu, měření chemického složení oceli, hodnocení mikrostruktury a velikosti zrna a porovnání vybraných mechanických vlastností. Výsledky provedených analýz prokázaly, že veškeré naměřené materiálové charakteristiky splňují předepsanou normu a současně i zpřísnující vnitropodnikové předpisy.

V případě povrchových charakteristik byly hodnoty v souladu s interním předpisem firmy, pouze parametr drsnosti Ra vzorku č. 2 se pohyboval na spodní dovolené hranici (viz kapitolu 6.1).

Analýza chemického složení naznačuje u vzorku č. 2 mírně vyšší koncentrace křemíku, manganu, fosforu a mědi oproti vzorku č. 1 (viz kapitolu 6.2).

Porovnání velikosti feritického zrna neprokázalo výraznější rozdíl mezi hodnocenými vzorky plechů (viz kapitolu 6.4).

Měření mechanických vlastností a stanovení parametrů komplexního posouzení materiálu u jednoosé tahové zkoušky ukázalo na zvýšenou pevnost materiálu vzorku č. 2, což se dále projeví zhoršením tažnosti a vyšší anizotropií (viz kapitolu 6.5).

Zkouška dle Erichsena neprokázala rozdíly u analyzovaných šarží materiálů. Rozdíly naměřených hodnot se pohybují v mezích chyby měření (viz kapitolu 6.6).

U dvouosé tahové zkoušky, jež lépe vystihuje skutečné podmínky napjatosti při plošném tváření a kterou bylo plánováno zařadit do této práce, se momentálně naráží na problém praskání zkušební kříže mimo oblast měřenou videoextenzometrem, kterou je ideálně střed vzorku. Tento nepříznivý jev je dokumentován na Obr. 12, kde k přetržení zkušební vzorku dochází na jednom z ramen. Problém se nyní řeší za pomoci počítačových simulací, na jejichž základě by mělo dojít k úpravě stávajících normovaných tvarů zkušebních křížů jinou geometrií či návrhem zcela nového tvaru vzorku.

Porovnání vybraných parametrů zjištěných na vzorcích obou dodávek materiálu je uvedeno v Tab. 14. Je zřejmé, že rozdíly nejsou výrazné, avšak určité rozdíly vykazují výsledky zkoušky tahem a parametry komplexní tvářitelnosti (např. IT a K)

**Tab. 14 Výsledky praktické části**

	$\bar{d}$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_{p0,2}$ [MPa]	$R_m$ [MPa]	$A_{80}$ [%]	P [-]	KUT [-]	IT [-]	K [%]	$\bar{r}$ [-]	$\Delta r$ [-]	$\bar{n}$ [-]
Vzorek č. 1	11	140	284	47,3	2,04	96,4	547,6	33,8	2,24	0,22	0,25
Vzorek č. 2	10,5	154	300	44,3	1,97	90,1	483	29,8	2,01	0,15	0,24
Porovnání vzorků	0,5	-14	-16	3	0,07	6,3	64,6	4	0,23	0,07	0,01

## 8 Závěr

Porovnání vzorků vyhovující a nevyhovující šarže plechu DC06 prokázalo v obou případech shodu s předepsanou technicko-dodací normou a současně i dodržení limitů zpřísnujících vnitropodnikových předpisů.

Byla prokázána souvislost mezi chemickým složením plechů a mechanickými parametry jednotlivých analyzovaných materiálů.

Změny byly zjištěny rovněž v případě tažnosti a následně i u některých parametrů tvářitelnosti (index tvářitelnosti a komplexní ukazatel tvářitelnosti), které byly u nevyhovujícího vzorku 2 vždy horší.

Příčiny, proč se oba materiály chovají při lisování výrazně rozdílně, nejsou jednoznačné. Z tohoto důvodu navrhuji následující kroky k dalšímu řešení problematiky a stanovení problémových faktorů:

- sledování zejména komplexních parametrů tvářitelnosti materiálu v dlouhodobějším časovém horizontu
- zavedení dvouosé zkoušky tahem a následně dalších materiálových a technologických zkoušek, které by dokázaly lépe vystihnout chování materiálu během procesu lisování
- provést detailní analýzu technologického procesu za pomoci sledování lisovacích podmínek za současného prohloubení znalostí o vlivu samotných lisovacích nástrojů.

## 9 Citovaná literatura

- [1] DVOŘÁK, Milan a PILVOUSEK, Tomáš. *Materiály používané pro stavbu karoserie: Přednáška VUT v Brně*. Mladá boleslav, 2014.
- [2] TAKAHASHI, Manabu. Sheet Steel Technology for the Last 100 Years: Progress in Sheet Steels in Hand with the Automotive Industry. *ISIJ International*. 2015, **55**(1), 79-88. DOI: 10.2355/isijinternational.55.79. ISSN 0915-1559. Dostupné také z: [https://www.jstage.jst.go.jp/article/isijinternational/55/1/55\\_79/\\_article](https://www.jstage.jst.go.jp/article/isijinternational/55/1/55_79/_article)
- [3] JANOVEC, Jiří, CEJP, Jiří a STEIDL, Josef. *Perspektivní materiály: revue littéraire mensuelle*. Vyd. 3., přeprac. V Praze: České vysoké učení technické, 2008. ISBN 978-80-01-04167-3.
- [4] LICHOROBIEC, Vojtěch. *Vliv vodíku na pevnost a svařitelnost vysokopevných martenzitických ocelí pro automobilové aplikace*. Pardubice, 2010. Bakalářská práce. Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta Jana Pernera. Vedoucí práce Doc. Ing. Eva Schmidová, Ph.D.
- [5] DVOŘÁK, Milan. *Vliv mikrostruktury materiálu a morfologie povrch na tváritelnost při plošném tváření*. Praha, 2008. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní.
- [6] KOLL, Tomas, Martin BRETSCHIEDER, Tobias KLINKBERG, Frederich LUTHER a Bengt MAAS. Optimierter Dressierprozess verbessert die Eigenschaften verzinkter Stahloberflächen. *Stahl und Eisen* [online]. Düsseldorf: Stahleisen GmbH, 2016, **2016**(10), 53-57 [cit. 2017-07-24]. Dostupné z: [https://www.salzgitter-flachstahl.de/fileadmin/footage/MEDIA/presse/szfg/2017/01/SDR\\_STE\\_10\\_2016\\_S53\\_57.pdf](https://www.salzgitter-flachstahl.de/fileadmin/footage/MEDIA/presse/szfg/2017/01/SDR_STE_10_2016_S53_57.pdf)
- [7] DIN EN 10346. *Continuously hot-dip coated steel flat products - Technical delivery conditions*. 1. Berlin: DIN Deutsches Institut für Normung e. V., 2009.
- [8] KUPILÍKOVÁ, Hana. *Vliv velikost deformace a stavu napjatosti na poškození ochranného povlaku na bázi Zn-Mg*. Liberec, 2014. Diplomová práce. Technická univerzita v Liberci, Fakulta strojní. Vedoucí práce Doc. Ing. Pavel Solfronk, Ph.D.

- [9] DIN EN 10152. *Electrolytically zinc coated cold rolled steel flat products for cold forming*. 1. Berlin: DIN Deutsches Institut für Normung e. V., 2009.
- [10] PROCHÁZKA, Jiří. *Technologie slévání, tváření a svařování*. První. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 1982.
- [11] PILVOUSEK, Tomáš. *Vliv vlastností vybraných šarží materiálu DC06 na tváritelnost při plošného tváření*. Praha, 2009. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní. Vedoucí práce Ing František Tatíček.
- [12] PAGÁČ, Aleš. *Použití technologických zkoušek tváritelnosti při tváření*. Brno, 2012. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. Michaela Císařová.
- [13] JANOVEC, Jiří, MACEK, Karel a ZUNA, Petr. *Fyzikální metalurgie*. Vyd. 1. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2004. ISBN 978-800-1029-350.
- [14] BHATT, Mallika R. a Sanjay H. BUCH. An Expert System of Die Design for Multi Stage Deep Drawing Process. *Procedia Engineering*. 2017, **173**, 1650-1657. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.12.257. ISSN 18777058. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S187770581634663X>
- [15] Prensado y Estampado de Metal. ASCO [online]. Alexandria, Virginie, USA: ASCO Valve, Inc., 2016 [cit. 2017-08-20]. Dostupné z: <http://www.asco.com/es-mx/Paginas/applications-press-room-metal-stamping.aspx>
- [16] *Metalografie I*. Praha, b.r. Dostupné také z: <http://ukmki.vscht.cz/files/uzel/0016736/Metalografie%20I.pdf?redirected>
- [17] Chemické složení. *Wikipedia* [online]. Wikimedia Foundation, 2017 [cit. 2017-08-20]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Chemick%C3%A9\\_slo%C5%BEen%C3%AD](https://cs.wikipedia.org/wiki/Chemick%C3%A9_slo%C5%BEen%C3%AD)
- [18] SPECTRO CS [online]. Ostrava: SPECTRO CS, spol. s r.o., 2017 [cit. 2017-08-20]. Dostupné z: <http://www.spectro.cz/>
- [19] OŠŤÁDAL, Josef. *Zkoušky tváritelnosti a jejich uplatnění v praxi*. Brno, 2011. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. Kamil Podaný, Ph.D.
- [20] MACEK, Karel a ZUNA, Petr. *Strojírenské materiály*. Vyd. 1. Praha: Vydavatelství



ČVUT, 2003. ISBN 80-010-2798-8.

- [21] ČSN EN ISO 6892-1. *Kovové materiály - Zkoušení tahem - Část 1: Zkušební metoda za pokojové teploty*. 1. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010.
- [22] ČIŽMÁROVÁ, Elena a SOBOTOVÁ, Jana. *Nauka o materiálu I. a II.: cvičení*. 1. vyd. V Praze: České vysoké učení technické, 2014. ISBN 978-80-01-05550-2.
- [23] BĚLKOVÁ, Monika. *Charakteristika materiálu a rozvoj deformace hořčíkových plechů v oblasti mezních stavů*. Liberec, 2016. Disertační práce. Technická univerzita v Liberci, Fakulta strojní. Vedoucí práce Doc. Ing. Pavel Solfronk, Ph.D.
- [24] ČSN ISO 10113. *Kovové materiály - Plechy a pásy - Stanovení součinitele plastické anizotropie*. 2. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009.
- [25] NIKODÝ, Lukáš. *Modifikace charpyho kladiva a metodika měření*. Praha, 2015. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze. Vedoucí práce Ing. František Tatíček, Ph.D.
- [26] PILVOUSEK, Tomáš a LICHOROBIEC, Vojtěch. *Materiálová analýza blatníku*. Mladá boleslav, 2012.
- [27] ČSN EN ISO 20482. *Kovové materiály - Plechy a Pásy - Zkouška hloubením podle Erichsena*. 1. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2014.
- [28] ČSN ISO 16842. *Kovové materiály - Plechy a Pásy - Metoda zkoušení dvouosým tahem využívající zkušební těleso ve tvaru kříže*. 1. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2015.
- [29] ŠULC, Vít. *Ověření velikosti deformací na malých disignových hranách*. Praha, 2015. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze. Vedoucí práce Ing. František Tatíček, Ph.D.
- [30] ERICHSEN GMBH & CO. KG. *Sheet Metal Testing*. Hemer, Germany, 2013. Dostupné také z: [www.erichsen.de](http://www.erichsen.de)
- [31] Vysoká škola technická a ekonomická v Českých Budějovicích s.r.o.: Multibázový

optický emisní spektrometr Q4 TASMÁN. *Vysoká škola technická a ekonomická v Českých Budějovicích s.r.o.* [online]. České Budějovice: Vysoká škola technická a ekonomická v Českých Budějovicích s.r.o., 2016 [cit. 2017-08-06]. Dostupné z: <http://www.vstecb.cz/Multibazovy-opticky-emisni-spektrometr-Q4-TASMAN-1602.htm>

- [32] Q4 TASMÁN. In: *Bruker* [online]. Billerica, Massachusetts: Bruker, 2016 [cit. 2017-08-06]. Dostupné z: <https://www.bruker.com/products/x-ray-diffraction-and-elemental-analysis/optical-emission-spectrometry/q4-tasman/overview.html>
- [33] PETER-SOINI, Jaroslav. *Technologické postupy metalografie*. Mladá boleslav, 2017.

## 10 Seznam použitých obrázků

Obr. 1 Příklad redukce váhy karoserie modelu Škoda Octavia [1].....	11
Obr. 2: Srovnání zastoupení vysokopevnostních dílů u Octavia I, II a III [1].....	13
Obr. 3 Zastoupení jednotlivých povrchových úprav hlubokotažných ocelí [1].....	14
Obr. 4 Ukázka Lüdersových čár neboli vrásek.....	15
Obr. 5: Zastoupení jednotlivých jakostí hlubokotažných ocelí [1] .....	17
Obr. 6 Model lisovací linky [15] .....	19
Obr. 7 Znázornění střední aritmetické hodnoty Ra [11] .....	21
Obr. 8 Znázornění výškové nerovnosti Rz [11].....	22
Obr. 9 Znázornění počtu vrcholů profilu Rp <sub>c</sub> [11].....	22
Obr. 10 Schéma zkušebního tělesa pro jednoosý tah a reálné zkušební těleso [21] .....	23
Obr. 11 Schéma zkušebního přípravku dle ČSN EN ISO 20482 [27] .....	29
Obr. 12 Zkušební těleso tvaru kříže dle normy ČSN EN 16842 před a po přetržení .....	30
Obr. 13 Schéma pro stanovení izočar plastické práce [28].....	31
Obr. 14 Schéma kalíškovací zkoušky [12] .....	31
Obr. 15 Schéma zkoušky dle Siebela a Pompa [12].....	32
Obr. 16 Schéma Nakajima testu [30] .....	32
Obr. 17 Vzorek č. 1 vlevo a č. 2 vpravo (povrch s texturou) .....	33
Obr. 18 Q4 Tasman [32] .....	34
Obr. 19 Mikrostruktura vzorku č. 1 vlevo a č. 2 vpravo .....	36
Obr. 20 Mikrostruktura s výskytem karbonitridu titanu .....	37
Obr. 21 Znázornění počítání velikosti zrn vzorku 1 a 2 průsečkovou metodou .....	38
Obr. 22 Zkušební troj LabTest 6.100 .....	39
Obr. 23 Protokol z tahové zkoušky vzorku č. 1 .....	39
Obr. 24 Zkušební zařízení pro zkoušku dle Erichsena .....	42
Obr. 25 Ukázka zkušebního protokolu .....	42
Obr. 26 Ukázkový zkušební vzorek po zkoušce dle Erichsena.....	43
Obr. 27 Deformační analýza vzorku č. 1 (M1V10) pomocí systému Argus .....	44
Obr. 28 Deformační analýza vzorku č. 2 (M2V3) pomocí systému Argus .....	44

## 11 Seznam tabulek

Tab. 1 Vysvětlení značení HDG ocelí [7] .....	16
Tab. 2 Vysvětlení značení EG ocelí [9] .....	17
Tab. 3 Vysvětlení značení zkušebního tělesa [21] .....	24
Tab. 4 Vysvětlení symbolů rovnice pro součinitel plastické anizotropie .....	26
Tab. 5 Naměřené hodnoty drsnosti .....	33
Tab. 6 Chemické složení hlubokotažných pleců .....	34
Tab. 7 Technologický postup broušení a leštění [33] .....	36
Tab. 8 Výsledky z měření velikosti zrn .....	37
Tab. 9 Porovnání nenormovaných mechanických parametrů pro směr 0° .....	40
Tab. 10 Porovnání nenormovaných mechanických parametrů pro směr 45° .....	40
Tab. 11 Porovnání normovaných mechanických parametrů dle normy ČSN [9] .....	40
Tab. 12 Komplexní posouzení obou zkušebních vzorků .....	41
Tab. 13 Hodnoty ze zkoušky dle Erichsena .....	43
Tab. 14 Výsledky praktické části .....	46

## **12 Seznam příloh**

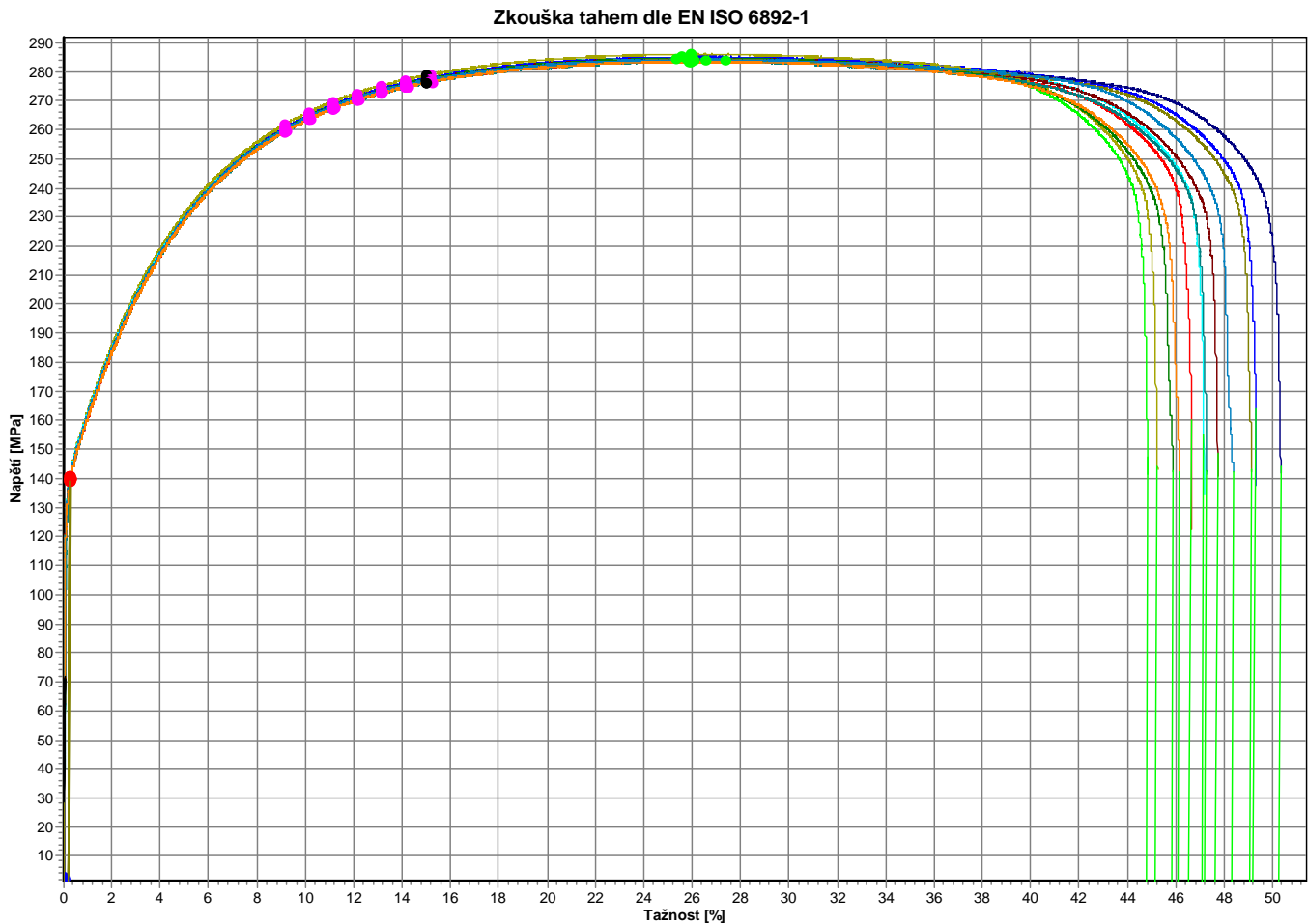
- Příloha 1**      Protokoly z tahové zkoušky vybraných šarží jakosti DC06+ZE50/50-B-PO
- Příloha 2**      Protokoly ze zkoušky dle Erichsena vybraných šarží jakosti DC06+ZE50/50-B-PO

Číslo dílu: OK  
Jakost: DC06+ZE50/50BPO  
Norma: EN 10152  
Číslo svitku: 11906003  
Výrobce:  
Ra: 1,29; Pc: 88; Úhel: 90

Datum: 17.07.17  
Zkoušející: Alfred Ducháč  
Oddělení: PFS-K

## Zkušební parametry

Typ stroje: LabTest 6.100  
Rozměry vzorku: b = 20,1 mm  
Zadání délek: Le = 80 mm; Lc = 120 mm; L0 = 80 mm  
Zkušební rychlosti: V0 = 1 mm/min; V1 = 10 mm/min  
Kriterium ukončení zkoušky: Síla = 100000 N; dF = 50 %



Číslo dílu: OK  
 Jakost: DC06+ZE50/50BPO  
 Norma: EN 10152  
 Číslo svitku: 11906003  
 Výrobce:  
 Ra: 1,29; Pc: 88; Úhel: 90

Datum: 17.07.17  
 Zkoušející: Alfred Ducháč  
 Oddělení: PFS-K

## Tabulka výsledků

	OK	E GPa	Rp0,2 MPa	Rm MPa	A %	a mm	Rm/Rp0.2	r	n (4..MaxA)	Práce kN*mm
1	x	197,595	139	284	46,53	0,757	2,04	2,55	0,25	149,65
2	x	191,555	140	285	44,74	0,757	2,04	2,50	0,25	144,31
3	x	199,485	140	285	49,20	0,757	2,04	2,53	0,25	159,35
4	x	194,620	141	286	45,16	0,757	2,03	2,96	0,24	146,16
5	x	196,410	141	284	47,08	0,757	2,02	2,51	0,24	151,88
6	x	196,857	139	285	47,66	0,757	2,04	2,96	0,25	153,56
7	x	192,429	140	285	45,83	0,757	2,04	2,84	0,25	147,29
8	x	195,331	140	284	50,27	0,757	2,03	2,50	0,24	162,31
9	x	200,460	140	284	49,06	0,757	2,04	2,96	0,25	158,13
10	x	129,351	140	283	47,18	0,757	2,03	3,04	0,25	151,50
11	x	195,222	140	284	48,29	0,757	2,03	3,07	0,25	155,59
12	x	201,862	139	284	46,07	0,757	2,04	2,91	0,25	147,63

## Statistika a = 12

	E GPa	Rp0,2 MPa	Rm MPa	A %	a mm	Rm/Rp0.2	r	n (4..MaxA)
<b>Střední hodnota</b>	190,931	140	284	47,25	0,757	2,03	2,78	0,25
<b>Standardní odchylka</b>	19,631	1	1	1,71	0,000	0,01	0,24	0,00
<b>Minimum</b>	129,351	139	283	44,74	0,757	2,02	2,50	0,24
<b>Maximum</b>	201,862	141	286	50,27	0,757	2,04	3,07	0,25

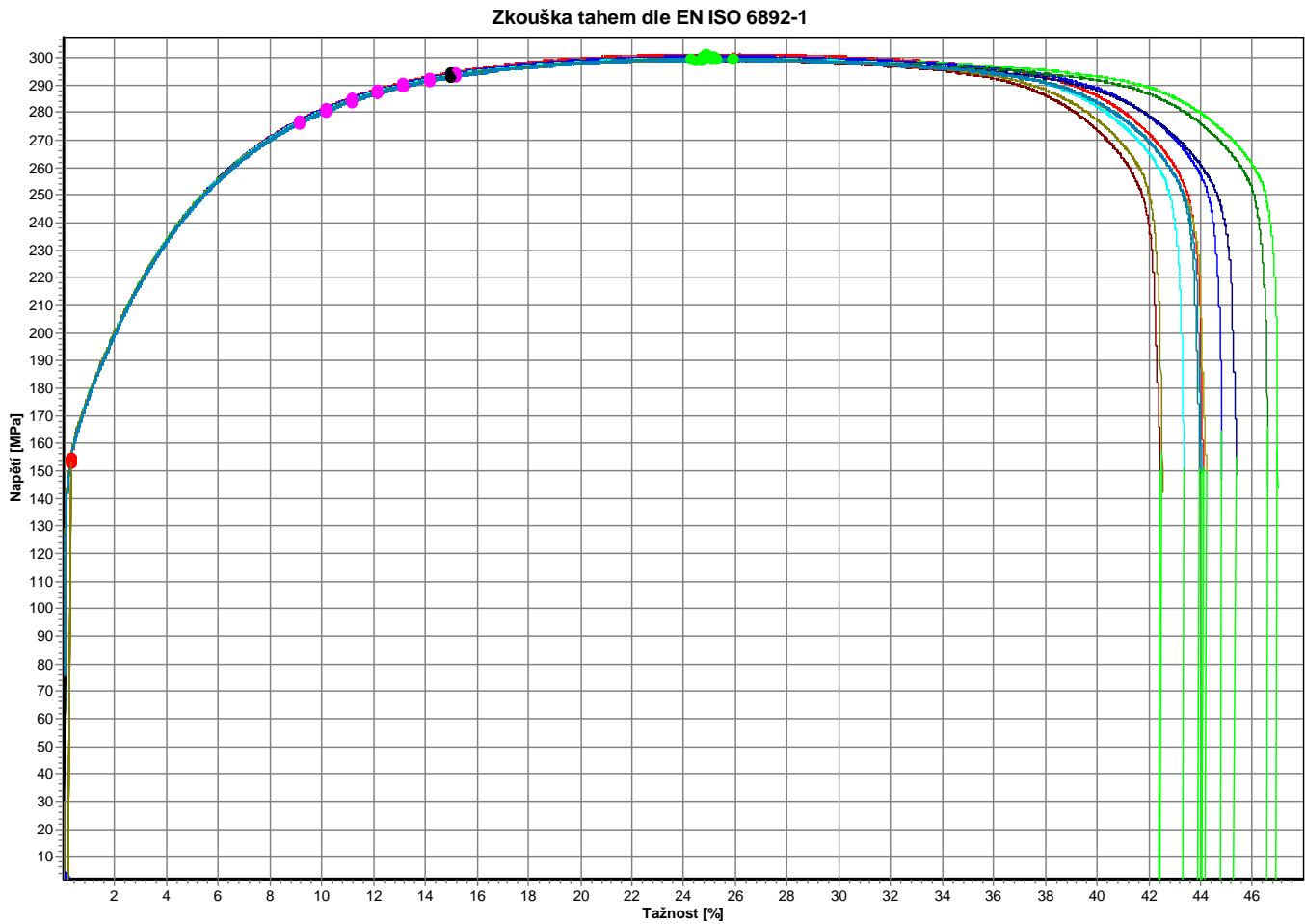
	Práce kN*mm
<b>Střední hodnota</b>	152,28
<b>Standardní odchylka</b>	5,66
<b>Minimum</b>	144,31
<b>Maximum</b>	162,31

Číslo dílu: NOK  
Jakost: DC06+ZE50/50BPO  
Norma: EN 10152  
Číslo svitku: 83983003  
Výrobce:  
Ra: 0,95; Pc: 92; Úhel: 90

Datum: 14.07.17  
Zkoušející: Alfred Ducháč  
Oddělení: PFS-K

## Zkušební parametry

Typ stroje: LabTest 6.100  
Rozměry vzorku: b = 20,1 mm  
Zadání délek: Le = 80 mm; Lc = 120 mm; L0 = 80 mm  
Zkušební rychlosti: V0 = 1 mm/min; V1 = 10 mm/min  
Kriterium ukončení zkoušky: Síla = 100000 N; dF = 50 %





Číslo dílu: NOK  
 Jakost: DC06+ZE50/50BPO  
 Norma: EN 10152  
 Číslo svitku: 83983003  
 Výrobce:  
 Ra: 0,95; Pc: 92; Úhel: 90

Datum: 14.07.17  
 Zkoušející: Alfred Ducháč  
 Oddělení: PFS-K

## Tabulka výsledků

	OK	E GPa	Rp0,2 MPa	Rm MPa	A %	a mm	Rm/Rp0.2	r	n (4..MaxA)	Práce kN*mm
1	x	204,879	153	301	44,03	0,755	1,97	2,67	0,24	149,87
2	x	213,569	154	301	46,89	0,755	1,95	2,33	0,24	160,07
3	x	207,371	154	301	44,74	0,755	1,95	2,37	0,24	152,30
4	x	201,427	153	300	44,15	0,755	1,95	2,38	0,24	149,28
5	x	199,729	155	300	43,31	0,755	1,93	2,35	0,24	146,85
6	x	200,178	155	299	42,39	0,755	1,93	2,37	0,24	143,06
7	x	204,100	154	300	46,53	0,755	1,94	2,35	0,24	158,24
8	x	203,645	154	299	45,30	0,755	1,95	2,36	0,24	153,54
9	x	203,670	155	299	42,44	0,755	1,93	2,33	0,24	143,69
10	x	196,814	154	300	43,89	0,755	1,95	2,36	0,24	148,67
11	x	196,304	153	299	43,99	0,755	1,95	2,36	0,24	148,72

## Statistika a = 11

	E GPa	Rp0,2 MPa	Rm MPa	A %	a mm	Rm/Rp0.2	r	n (4..MaxA)
<b>Střední hodnota</b>	202,881	154	300	44,33	0,755	1,95	2,39	0,24
<b>Standardní odchylka</b>	4,904	1	1	1,46	0,000	0,01	0,10	0,00
<b>Minimum</b>	196,304	153	299	42,39	0,755	1,93	2,33	0,24
<b>Maximum</b>	213,569	155	301	46,89	0,755	1,97	2,67	0,24

	Práce kN*mm
<b>Střední hodnota</b>	150,39
<b>Standardní odchylka</b>	5,36
<b>Minimum</b>	143,06
<b>Maximum</b>	160,07

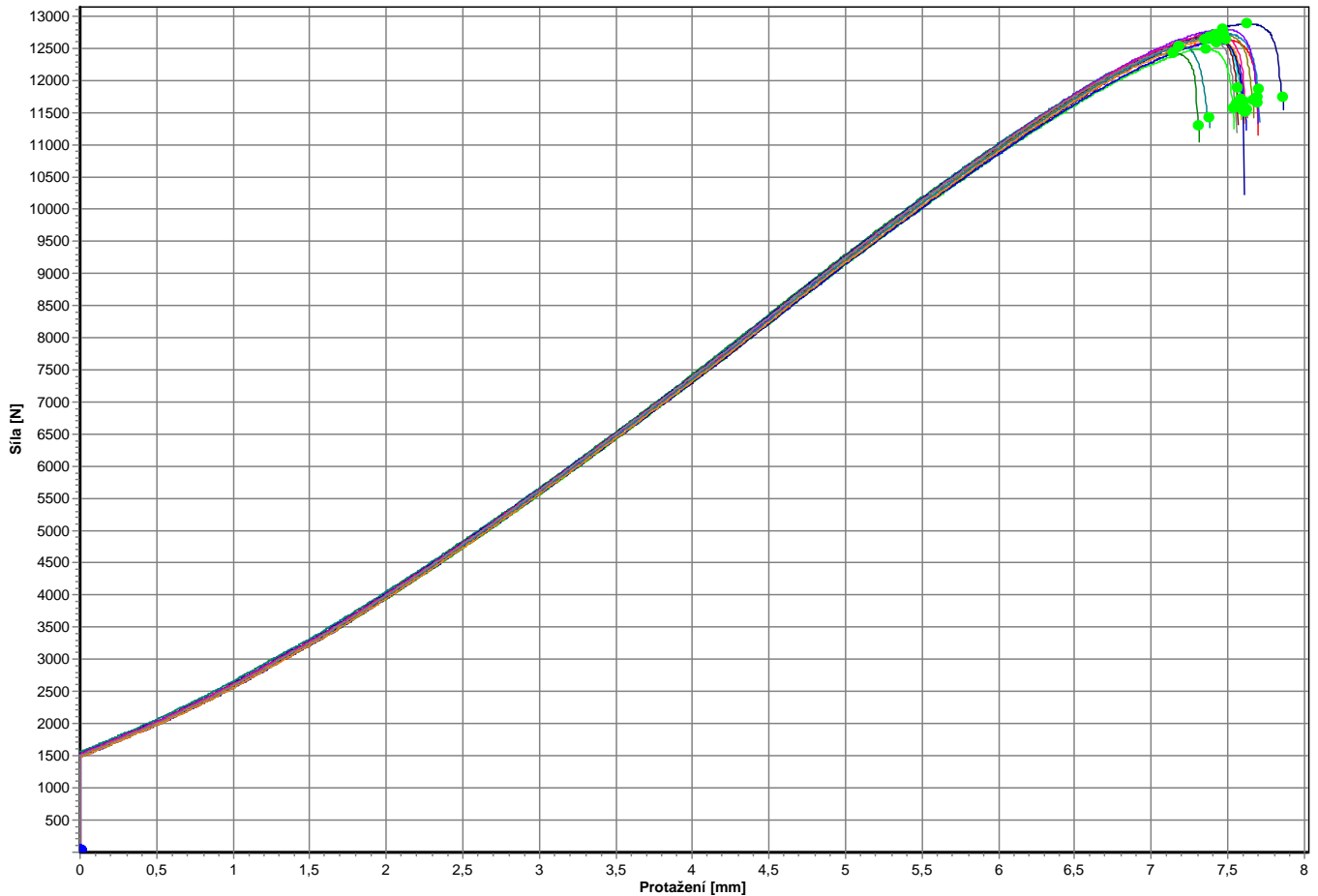
Číslo dílu: OK  
Jakost: DC06+ZE50/50  
Číslo svitku: 119060003  
Výrobce:  
Zkoušející: Alfred Ducháč  
Oddělení: PFS-K

Datum: 14.08.17  
Čas: 11:31

## Zkušební parametry

Typ stroje: LabTest 6.100  
Přepínací body: F0 = 30 N  
Kriterium ukončení zkoušky: Síla = 50 kN; dF = 10 %

Zkouška hloubením dle Erichseni



## Tabulka výsledků

	OK	Datum	Čas	F Max N	IE mm
1	x	14.08.17	10:21	12640,40	7,69
2	x	14.08.17	10:25	12499,00	7,53
3	x	14.08.17	10:30	12597,30	7,61
4	x	14.08.17	10:38	12666,20	7,58
5	x	14.08.17	10:42	12675,50	7,59
6	x	14.08.17	10:45	12695,70	7,56
7	x	14.08.17	10:55	12440,80	7,30

Číslo dílu: OK  
Jakost: DC06+ZE50/50  
Číslo svitku: 119060003  
Výrobce:  
Zkoušející: Alfred Ducháč  
Oddělení: PFS-K

Datum: 14.08.17  
Čas: 11:31

---

8	x	14.08.17	10:58	12887,30	7,85
9	x	14.08.17	11:02	12723,00	7,66
10	x	14.08.17	11:07	12544,90	7,37
11	x	14.08.17	11:11	12728,00	7,70
12	x	14.08.17	11:14	12641,10	7,60
13	x	14.08.17	11:19	12670,50	7,60
14	x	14.08.17	11:22	12807,60	7,69
15	x	14.08.17	11:25	12732,30	7,61
16	x	14.08.17	11:31	12652,50	7,55

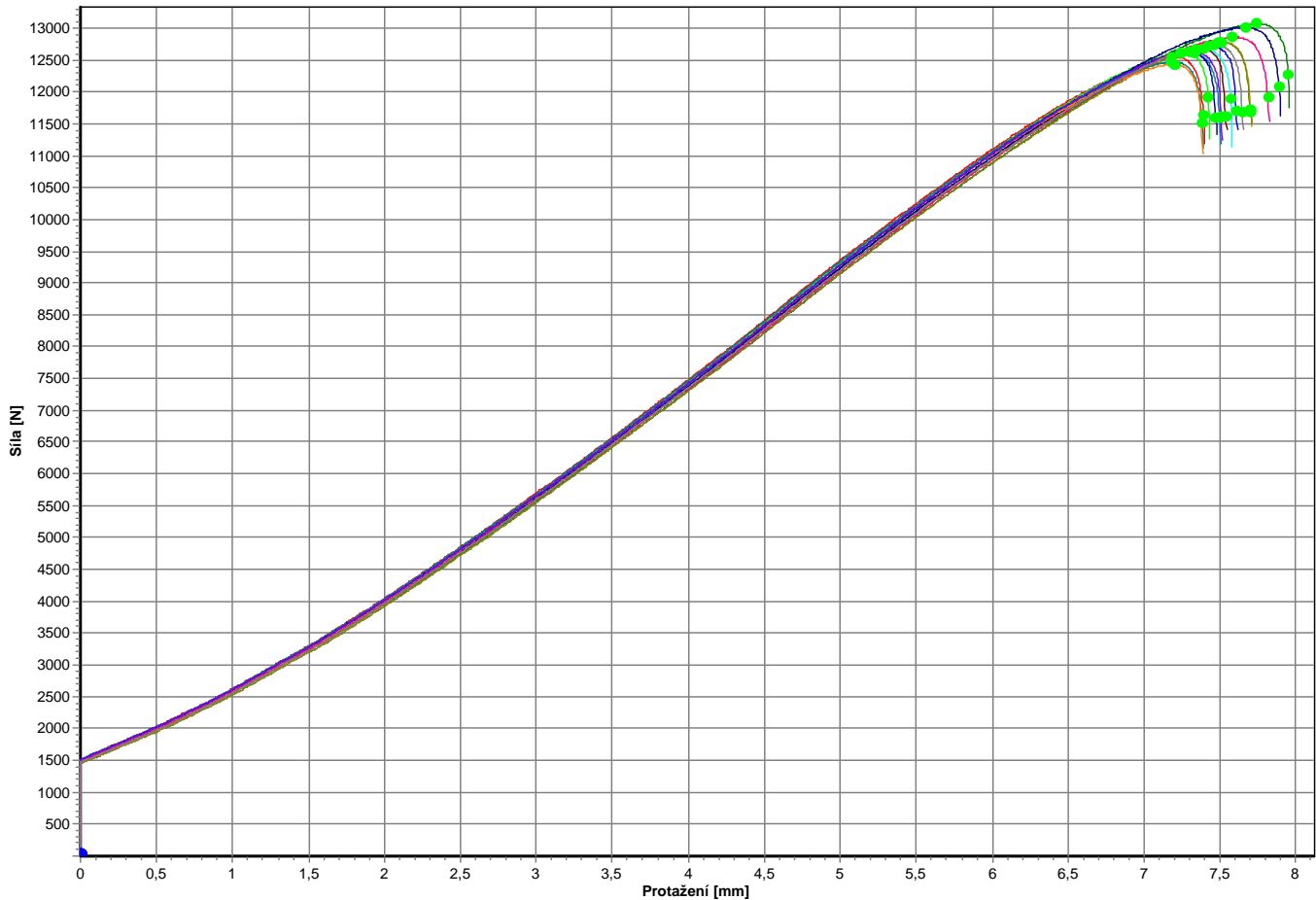
### Statistika a = 16

	F Max N	IE mm
<b>Střední hodnota</b>	12662,63	7,59
<b>Standardní odchylka</b>	109,78	0,13
<b>Variační koeficient</b>	0,87	1,67
<b>Minimum</b>	12440,80	7,30
<b>Maximum</b>	12887,30	7,85

## Zkušební parametry

Typ stroje: LabTest 6.100  
Přepínací body: F0 = 30 N  
Kriterium ukončení zkoušky: Síla = 50 kN; dF = 10 %

### Zkouška hloubením dle Erichseni



### Tabulka výsledků

	OK	Datum	Čas	F Max N	IE mm
1	x	14.08.17	12:42	12554,90	7,39
2	x	14.08.17	12:47	12625,30	7,42
3	x	14.08.17	12:54	12733,70	7,60
4	x	14.08.17	12:58	12789,00	7,70
5	x	14.08.17	13:02	12676,30	7,57
6	x	14.08.17	13:07	12684,10	7,54
7	x	14.08.17	13:11	13077,50	7,95

Číslo dílu: NOK  
Jakost: DC06+ZE50/50  
Číslo svitku: 839830003  
Výrobce:  
Zkoušející: Alfred Ducháč  
Oddělení: PFS-K

Datum: 14.08.17  
Čas: 13:55

---

8	x	14.08.17	13:15	13021,60	7,89
9	x	14.08.17	13:19	12779,60	7,70
10	x	14.08.17	13:26	12481,00	7,38
11	x	14.08.17	13:30	12618,90	7,49
12	x	14.08.17	13:34	12440,10	7,38
13	x	14.08.17	13:37	12636,80	7,47
14	x	14.08.17	13:41	12639,60	7,51
15	x	14.08.17	13:50	12866,50	7,81
16	x	14.08.17	13:55	12743,70	7,64

### Statistika a = 16

	F Max N	IE mm
Střední hodnota	12710,54	7,59
Standardní odchylka	172,50	0,18
Variační koeficient	1,36	2,36
Minimum	12440,10	7,38
Maximum	13077,50	7,95