VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

STUDIUM TVAŘITELNOSTI POVLAKOVANÝCH PLECHŮ S PLAZMO-CHEMICKOU PŘEDÚPRAVOU POVRCHU

STUDY OF FORMABILITY OF COATED SHEETS FROM THE PLASMA CHEMICAL PRETREATMENT OF SURFACES

DOKTORSKÁ PRÁCE
DOCTORAL THESIS

AUTOR PRÁCE Ing. EMIL SCHWARZER
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE doc. Ing. MILAN DVOŘÁK, CSc.
SUPERVISOR

BRNO 2016

ABSTRAKT

Teoretická část dizertační práce popisuje ohýbání plechů, zejména s malým poloměrem ohybu a rozdělení deformace a popisuje parametry ohýbaného plechu. Jelikož zkoumané plechy byly ošetřeny kataforézním lakováním je tato metoda lakování popsána společně s předúpravou plechu. Praktická část je zaměřena na princip multitryskového plazmového systému a ošetření ocelového povrchu a zkoumá ohýbané povrchy ocelových plechů s různými variantami nanesení povlaku. Vybrané vzorky jsou ohnuté na multifunkčním ohýbacím přípravku a podrobeny zkoušce podle Erichsena a vyvozeny výsledky s použitím plazmového systému a bez použití plazmového systému. V experimentální části byly zkoumané vzorky ošetřeny multitryskovým plazmovým systémem a následně ohnuty na multifunkčním ohýbacím přípravku. Jsou porovnávány zjištěné výsledky jednotlivých experimentů v systému ocel - základní povlak - plazma - vrchní povlak. A dále se porovnává vzájemná kombinace různých druhů modifikování povrchu ocelových vzorků s různými povlaky. Vybrané vzorky byly testovány na tahovou zkoušku a byly z ní zpracovány výsledky. U vybraných vzorků byl vypočítán exponent zpevnění. Další experiment spočíval v nanesení kružnic na rovné vzorky a následně byly tyto vzorky ohnuty pod definovaným rádiusem a byly stanoveny tahové a tlakové deformace. Poté byly vzorky plechu zalité do pryskyřice a zkoumány pod mikroskopem, kde byly rozděleny do několika kategorií a bylo stanoveno optimální složení multitryskového plazmového systému pro vybrané vzorky a konkrétní povlaky na ocelový plech s maximální přilnavostí povlaku k ocelovému základu. Vybrané měřené hodnoty byly podrobeny statistické kontrole.

Klíčová slova

multitryskový plazmový systém, povlakované plechy, ohýbání, plech, deformace

ABSTRACT

Theoretical part PhD thesis describes bending of sheets especially with a small bend radius and the distribution of deformation and describes the parameters of bent sheet. As the test sheets were treated by cataphoretic coating is this method described together with pretreatment of sheet. The practical part is focused on the principle multi-jet plasma system and treatment of the steel surface and examines the bent surfaces of the steel sheets with different variants of applying the coating. Selected samples are bent on the multifunction graduated bending jig and subjected to the Erichsen test and deduced results using plasma system and without the use of plasma system. In the experimental part were examined samples treated by multi-jet plasma system and subsequently bent on the multifunction graduated bending jig. Compares the results of individual experiments in system steel – base coat – plasma – topcoat. And also compares mutual combinations of various kinds of modifying the surfaces of steel samples with different coatings. Selected samples were tested for tensile test and the results were processed from this test. For selected samples was calculated hardening exponent. Another experiment consists in applying a circle at equal samples and subsequently the samples were bent under a defined radius and were determined tensile and compressive deformation. Samples of sheets were then embedded in the resin and then examined under a microscope, where they were divided into several categories and was determined optimal composition multi-jet plasma system for selected samples and the specific coatings on sheet plate with a maximum adhesion of the coating to the steel base. Selected measured values were subjected statistical control.

Key words

multi-jet plasma system, coated sheets, bending, sheet, deformation

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

SCHWARZER, Emil. *Studium tvařitelnosti povlakovaných plechů s plazmo-chemickou předúpravou povrchu.* Brno 2016. Doktorská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. 123 s. 2 přílohy. Vedoucí dizertační práce doc. Ing. Milan Dvořák, CSc.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem dizertační práci na téma **Studium tvařitelnosti povlakovaných plechů s plazmo-chemickou předúpravou povrchu** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

30. srpna 2016	
Datum	Ing. Emil Schwarzer

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto svému školiteli doc. Ing. Milanu Dvořákovi, CSc. za odborné vedení a množství cenných rad a připomínek, které mi poskytl při vypracování dizertační práce. Děkuji Mgr. Miloši Klímovi, Ph.D. za poskytnutí laboratoře a možnosti provádění experimentů. Poděkování také patří Ing. Michaele Císařové, Ph.D. za užitečnou spolupráci a konzultaci při zpracování dizertační práce. Moje poděkování patří též mé rodině a mojí přítelkyni Ing. Zdence Zdařilové za obrovskou trpělivost a podporu během studia.

OBSAH

Abstrakt 2
Prohlášení 4
Poděkování 5
Obsah 6
Úvod 9
1 HODNOCENÍ TVAŘITELNOSTI PLECHŮ POMOCÍ TECHNOLOGICKÝCH ZKOUŠEK 10
1.1 Základní princip metody hloubení podle Erichsena 10
1.2 Vybrané technologické zkoušky tvařitelnosti plechu 11
2 METODY NANÁŠENÍ KRUŽNIC NA PLECH 14
2.1 Metody nanášení deformačních sítí 14
2.2 Tvary sítí 16
3 TVAŘITELNOST OCELOVÝCH PLECHŮ S POVRCHOVOU ÚPRAVOU 17
3.1 Hodnocení povrchově upravených plechů 17
3.2 Materiálové faktory ovlivňující technologickou tvařitelnost plechu 18
3.3 Chemické složení 18
3.4 Mikrostruktura a mikročistota 18
3.5 Anizotropie plechu 19
3.6 Hodnocení vhodnosti plechů k tažení 19
3.7 Kritéria hodnocení tvařitelnosti plechů 20
4 TECHNOLOGIE OHÝBÁNÍ POVRCHOVĚ UPRAVENÝCH PLECHŮ 21
4.1 Malé poloměry ohybů a rozdělení deformace v ohybu 21
4.2 Ohyb plechu s malým poloměrem ohybu 23
4.3 Problematika povrchově upravených plechů v praxi 25
4.4 Stanovení velikosti logaritmické deformace 26
5 ZKOUŠKY TVRDOSTI 28
5.1 Metody plastické interakce materiál – vnikací těleso 28
5.2 Metody elastické interakce materiál – vnikací těleso 29
6 KATAFORÉZNÍ LAKOVÁNÍ 31
6.1 Základní složení barvy 31
6.2 Předúprava kataforézního lakování 31
7 PŘESNOST MĚŘENÍ 33
7.1 Teorie chyb měření 33
7.2 Nejistoty měření 36
8 ZKOUŠENÍ PLECHŮ 39

8.1 Testy bez použití multitryskového plazmového systému ... 40
8.2 Ošetření povrchu plazmovými tryskami ... 40
8.3 Seznam vzorků určených pro experimenty ... 43
8.4 Přehled vzorků pro multitryskový plazmový systém I a II. ... 46
8.5 Vybrané vzorky pro tahovou zkoušku ... 47
8.6 Vybrané vzorky pro vyhodnocení změny tloušťky a deformací ... 48
8.7 Testy na odstupňovaném ohýbacím přípravku ... 48
8.8 Cíle experimentu ... 49
9 CÍLE PRÁCE ... 51
9.1 Úvod ... 51
9.2 Hlavní cíle dizertační práce ... 51
10 EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ A VYHODNOCENÍ VZORKŮ ... 52
10.1 Popis experimentu ... 52
10.2 Postup nanášení povlaků a multitryskového plazmového systému ... 52
10.3 Erichsenova zkouška hlubokotažnosti ... 54
10.4 Tahová zkouška ... 55
10.4.1 Popis experimentu a jeho průběh ... 55
10.4.2 Záznamy z tahové zkoušky ... 58
10.4.3 Výsledky z tahové zkoušky ... 61
10.4.4 Vzorky z tahové zkoušky pod mikroskopem ... 61
10.4.5 Výpočet exponentu zpevnění a dalších veličin pro vzorky z tahové zkoušky 63
10.4.6 Grafické výsledky na vybraných vzorcích ... 68
10.5 Ohybová zkouška ... 70
10.5.1 Příprava materiálu z ohnutých vzorků ... 70
10.5.2 Testované vzorky pod mikroskopem ... 73
10.5.3 Grafická závislost testovaných vzorků ... 89
10.5.4 Výsledky z ohybové zkoušky ... 91
10.6 Vyhodnocení změny tloušťky a deformací na vybraných vzorcích ... 92
10.6.1 Stanovení tahové a tlakové deformace ... 94
11 STATISTICKÁ KONTROLA ... 99
11.1 Grubbsův test ... 99
11.1.1 Grubbsův test u stanovení tloušťky povlaku na ohnutém měřeném vzorku ... 99
11.1.2 Grubbsův test pro délky L_1 a L_2 na ohnutém měřeném vzorku ... 105
ZÁVĚR ... 112
SPLNĚNÍ CÍLŮ PRÁCE ... 114
Seznam použitých zdrojů ... 116
Seznam použitých symbolů a zkratek ... 120

Seznam příloh 123

ÚVOD

Ve strojírenství, zvláště v automobilovém průmyslu jsou velké požadavky na kvalitu a přesnost. Je očekávána velká pružnost a dynamičnost výroby. Především první kontakt uživatele s výrobkem je důležitý. Požadovaná vlastnost povrchu může být korozivzdornost, tvrdost, otěruvzdornost, ale také vzhledové vlastnosti. V praxi to mohou být kabiny zemědělských strojů, konstrukce montážních linek, venkovní konstrukce, které podléhají především korozi. Ochrana povrchů je i bezpečnostní prvek, který může hrát roli v prostředí, kde se nachází agresivní činitelé, jako je sůl, kyselé prostředí, vlhkost. Tyto konstrukce je potřeba chránit vrchním povlakem, který musí odolávat nepříznivým vlivům počasí. Povlaky lze využít ve stavebnictví, leteckém průmyslu všude tam, kde je kladen velký důraz na ochranu a dlouhou životnost daného materiálu. Velká pozornost je směřována i na ekologickou likvidaci materiálu. Přinést společnosti co možná nejekologičtější způsob nanášení povrchových úprav materiálu.

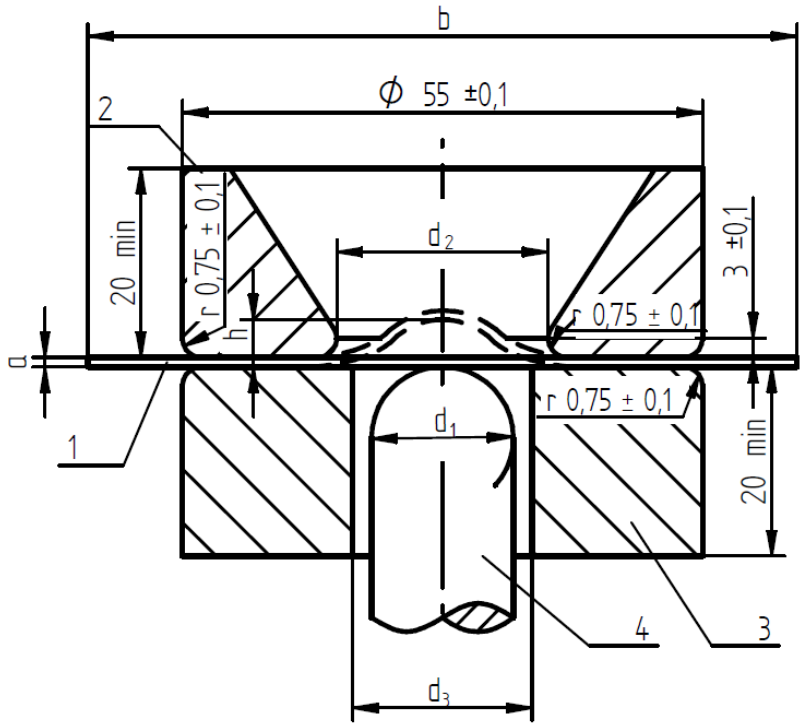
Tato doktorská práce přináší další poznání a posune bádání k dalším úvahám a především posune dál studium tvařitelnosti povlakovaných plechů s plazmo-chemickou předúpravou povrchu.

1 HODNOCENÍ TVAŘITELNOSTI PLECHŮ POMOCÍ TECHNOLOGICKÝCH ZKOUŠEK

Zkoušky tahem a zkoušky tvrdosti materiálu neposkytují komplexní představu o vhodnosti plechu k určité technologické operaci tváření. [1], [28]
Plech je vystavený napěťově – deformačním stavům, které se vyskytují při reálném procesu tváření, např. při hlubokém tažení a technologii ohýbání. Z uvedeného důvodu byly vyvinuté technologické (napodobující) zkoušky tvařitelnosti plechů, které jsou uvedeny níže.

1.1 Základní princip metody hloubení podle Erichsena

Tato mezinárodní norma specifikuje standardní zkušební metodu stanovení schopnosti kovových plechů a pásů, o tloušťce od 0,1 mm do 2 mm a šířce 90 mm nebo větší, plasticky se deformovat při tažení plechu hloubením půlkulatým tažníkem, viz obr. 1.
Průběh trhliny je důležitý pro posouzení jakosti hlubokotažného plechu. Kvalitnější a stejnorodější materiál má jemnější zrno v trhlině a trhlina je stejnoměrnější a má tvar podobnější kruhovému oblouku. Odchylky od linie kruhu svědčí o nestejnorodém materiálu. Tento materiál má velmi často orientovanou strukturu a má trhlinu ve tvaru rozštěpení ve směru válcování. Pokud je trhlina kruhová a ukazují-li jemné zrno, pak to svědčí o stejnorodém a vhodném materiálu pro hluboké tažení. Důsledkem velkého plošného protažení by se nemělo zrno stát viditelným na povrchu. Zkoušky hloubením by se měly používat všude tam, kde je nutné zjistit, zda se plechy hodí převážně pro mělké a střední tahy, které se nejčastěji vyskytují při stavbě karoserií a letadel, a také v běžné průmyslové praxi.

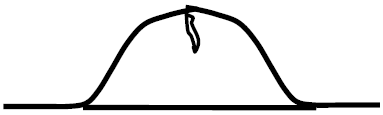


Obr. 1 Schéma pracovního prostoru zkušebního zařízení, zkouška podle Erichsena [28]
IE – index hloubení**,** 1 – zkušební těleso, 2 – tažnice, 3 – přidržovač, 4 – tažník, d_1 – průměr kulového zakončení tažníku, d_2 - vnitřní průměr přidržovacího kroužku, d_3 - vnitřní průměr tažnice, b - šířka zkušebního tělesa před zkouškou, h – hloubka prohloubení, *a* – tloušťka plechu

Princip zkoušky spočívá v tažníku s kulovým zakončením, který se zatlačuje do zkušebního tělesa upnutého mezi přidržovačem a raznicí a vytváří prohloubení až do vzniku průchozí trhliny. Měřená hloubka prohloubení je výsledkem zkoušky založené na přímočaré dráze tažníku s půlkulovitým zakončením.

Pro vykonání zkoušky je třeba použít zařízení vybavené tažnicí, tažníkem a přidržovačem zkušebního tělesa. Průběh zkoušky se sleduje z vnější strany za účelem stanovení okamžiku, kdy se objeví průchozí trhlina. Na obr. 2 je materiál vhodný ke tváření, na obr. 3 je nevhodný materiál ke tváření.

Obr.2 Ukázka trhliny na zkušebním vzorku vzorku plechu vhodného pro tváření. [28]



Obr. 3 Ukázka trhliny na zkušebním nevhodného pro tváření. [28]

Během zkoušky je nutné dodržovat tyto zásady:

- pracovní plocha tažníku je kulová a leštěná a musí mít drsnost $R_a \leq 0{,}4$ µm. [10], [28]
- kontaktní plochy přidržovače zkušebního tělesa a tažnice se zkušebním tělesem musí být rovinné a kolmé k ose pohybu tažníku,
- zařízení musí zaručit upnutí zkušebního tělesa konstantní silou přibližně 10kN,
- měření pohybu tažníku začíná od okamžiku jeho prvního kontaktu s povrchem zkušebního tělesa.

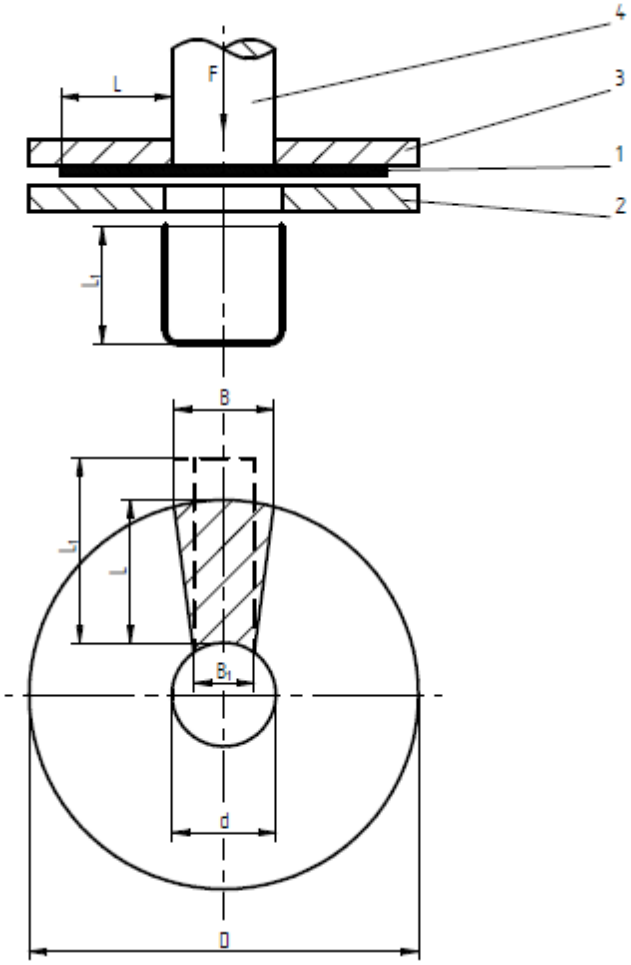
Podmínky a postup zkoušky je detailně popsán v normě ČSN EN ISO 20482. [14] Velkou pozornost je potřeba věnovat výběru maziva, které by nemělo obsahovat korozivní látky, pryskyřicovou drť, vosk a plniva. [5], [2]

1.2 Vybrané technologické zkoušky tvařitelnosti plechu

Zkouška kalíškovací (zkouška AEG nebo Schmiedtova)

Touto zkouškou lze hodnotit hlubokotažnost tenkých plechů viz. obr. 4. Zkouška je vhodná pro rotačně symetrické tvary výtažků. Je poměrně zdlouhavá, neboť se musí několikrát opakovat při postupném zvyšování průměru rondelu D. Zkušební rondel o průměru D = d + 2L se průměrem tažníku d = 50 mm táhne na kalíšek, jehož výška je L_1>L. Podmínky zkoušky korespondují s tažením výtažků v praxi.

Výhodou kalíškovací zkoušky je, že umožňuje hodnocení anizotropie mechanických vlastností zkoušeného plechu, která se projeví "cípatostí" válcových výtažků. Zkouška není normalizovaná, i když jejího principu se využívá v ČSN 42 0409 ke zjišťování anizotropie Al-plechů a jejich slitin. [28]



Obr. 4 Princip kalíškové zkoušky. 1 – rondel, 2 – tažnice, 3 – přidržovač, 4 – tažník. [28]

Zkouška kalíškovací s přidržením příruby podle Gross – Engelhardta

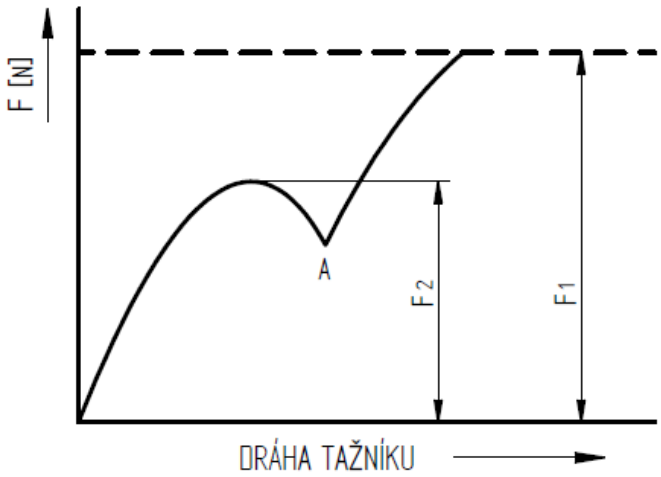
Principem zkoušky je měření a záznam tažné síly při zhotovení kalíšku viz. obr. 5. Zkušební vzorky jsou pásy z tenkého plechu o šířce 58 mm. Ve zkušebním zařízení se z pásu vystřihuje rondel o průměru 52 mm. Ve druhé fázi probíhá tažení s přidržovačem až do překročení tažné síly F_2. Potom přidržovač sevře zbývající část příruby a tažník se pohybuje dále až do úplného odtržení dna kalíšku při síle F_1.

Kritérium hlubokotažnosti plechu je tzv. přirozený stupeň hlubokotažnosti T, vypočtený podle vzorce:

$$T = \frac{F_1 - F_2}{F_1} \cdot 100 \qquad [\%] \qquad (1)$$

kde: F_1 – síla [N]
F_2 – tažná síla [N]
T – přirozený stupeň hlubokotažnosti

U kvalitních hlubokotažných plechů je hodnota T větší než 40 %. [28]



Obr. 5 Průběh síly při Gross-Engelhardtově zkoušce. [28]

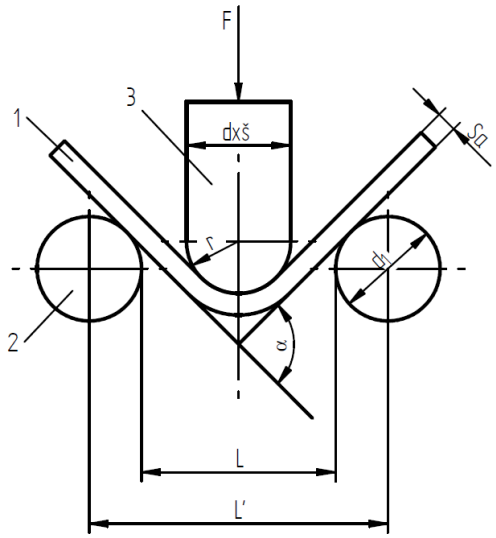
Zkoušky ohybatelnosti plechu

Patří do skupiny technologických zkoušek plechů. K vybraným zkouškám ohybatelnosti plechů lze zařadit: zkoušku lámavosti, zkoušku dvojitým ohybem, zkoušku střídavým ohybem a zkoušku podle Gütha. Uvedené zkoušky se provádí za studena. [28]

Zkouška lámavosti

Uvedená zkouška je normalizována normou ČSN EN ISO 7438. Pro zkoušku lámavosti se hodí jakýkoliv lis nebo zkušební stroj na tlak, umožňující vyvodit dostatečně velkou sílu. Zkušební tyč z tlustého plechu se ohýbá podle obr. 6. Vzdálenost podpěr *L* má být přibližně $L = d + 3 \cdot s_o$ [mm]. Zkušební plochá tyč má délku od 200 do 400 mm a šířku v rozmezí 25 až 50 mm. Je odebraná z tabule plechu v souladu s normou. Je třeba vzít v úvahu, že nejpříznivější hodnoty jsou v případě, když osa ohýbání je ve směru vláken plechu. [53]

Jako kritérium výsledku zkoušky lámavosti prováděné za účelem zjištění vhodnosti plechu ke tváření ohýbáním je úhel *α,* resp. poloměr ohybu *r* ($d = 2 \cdot r$), při kterém nevznikne v místě ohybu trhlina. Za trhlinu se nepovažuje rozevření vzniklé rozšířením drsného povrchu nebo zvrásnění povrchu zkušebního vzorku v ohýbaném místě. Uvedenou zkoušku lze využít i ke kontrole svarů.



Obr. 6 Princip zkoušky lámavosti, 1 – zkoušený plech, 2 – podpěry, 3 – trn. [28]

2 METODY NANÁŠENÍ KRUŽNIC NA PLECH

Kapitola poukazuje na různé způsoby nanášení deformačních měrných sítí na plech. Převážně popisuje jejich hlavní výhody a nevýhody a využití v praxi. Jedna z použitých metod, konkrétně nanášení kružnic elektrolytickým leptáním je využita v kapitole 10.6. této dizertační práce. Jsou popsány i tvary různých sítí. Vybrané vzorky s nanesenou naleptanou měrnou sítí a jejich vyhodnocení je řešeno v této dizertační práci.

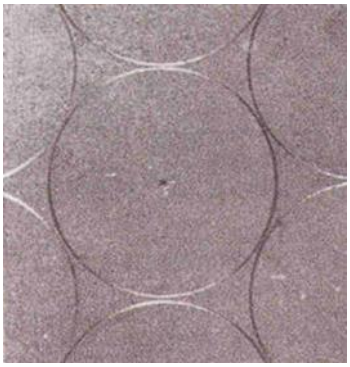
Na speciálním ohýbacím přípravku byly ohnuty povlakované plechy s nanesenými kružnicemi. Ohnuté plechy byly poté změřeny na optickém zařízení. Měřila se jednak tloušťka plechu na ohnutém plechu, tak rozměry L_1 a L_2 na naleptané elipse na ohnutém vzorku. Poté se stanovila velikost logaritmické deformace φ_1, φ_2 a φ_3. Výsledky k jednotlivým vzorkům jsou uvedeny v kapitole 10.6.1.

2.1 Metody nanášení deformačních sítí

a) Destruktivní metody nanášení sítě

- orýsování jehlou, kružítkem
- ražení

Tyto metody poškozují povrchovou vrstvu materiálu a při vlastních experimentech hrozí nebezpečí zkreslení průběhu tvářecího postupu a naměřených dat, viz obr. 7. [23]



Obr. 7 Orýsování jehlou. [23]

b) Nedestruktivní metody nanášení sítě

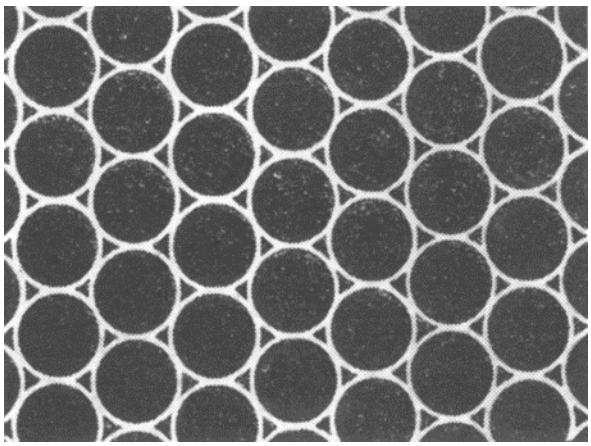
Tyto metody nepoškozují povrch materiálu, avšak je značné nebezpečí poškození nanesené sítě tvářecím procesem (dojde k tzv. setření sítě).

- potiskování razítkem nebo metodou kovových matric
- sítotiskem

Tyto metody jsou na setření velice náchylné, v současné době se prakticky nepoužívají.

- fotografická metoda - Metoda je velice podobná vyvolávání fotografií. Nevýhodou je snadné setření.
- fotografická metoda se zaleptáním - Na plech je nanesena fotografická emulze citlivá na UV záření. Vrstva musí tloušťku pouze několik mikrometrů, silnější by nešla exponovat. Přiložením rastru se zabrání exponování v celé ploše. Následné vyvolání

(exponování) způsobí zaleptání do povrchu materiálu v místech osvitu. Velikost zaleptání je závislá na čase expozice, viz. obr. 8. Metoda je mimo jiné časově náročná.

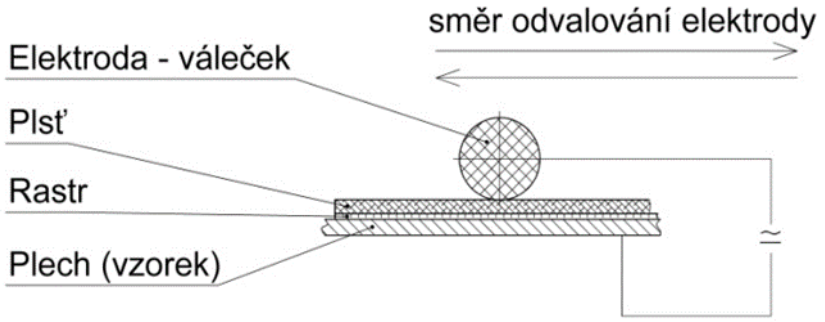


Obr. 8 Fotografická metoda se zaleptáním. [24]

Metoda elektrochemická

Metoda využívá elektrolytického leptání. Výhodou je rychlost metody (řádově sekundy), jednoduchost, nevzniká k žádnému narušení plechu, finanční nenáročnost a odolnost během tváření. Nevýhodou je omezení na rovinnou plochu.

Tato metoda předpokládá dokonalé odmaštění, povrch nesmí mít větší povrchové vady, nesmí být zkorodovaný. Princip metody je patrný z obrázku 9. [23]



Obr. 9 Schéma elektrochemické metody. [23]

Čas potřebný pro leptání závisí na materiálu plechu a aplikovaném napětí. Hloubka leptání je úměrná času aplikace. Aplikovaná síť je permanentní, nezpůsobuje zkreslení a je odolná vůči opotřebení. Tato metoda však může být použita pouze u vodivých kovů. Potřebné vybavení pro elektrochemické leptání je běžně dostupné. [2]

Fotochemické leptání sítí

Fotochemické leptání patří mezi přesné metody nanášení deformačních sítí. Při vytváření sítě touto metodou se musí dodržet následující kroky. Očistění povrchu kovu, pokrytí povrchu vrstvou emulze odolné proti UV záření, osvětlení UV zářením, vyvolání, leptání, očištění povrchu.

První čtyři kroky se shodují s fotografickou metodou nanášení sítí. Ve druhé fázi tvorby sítě fotochemickou metodou se síť leptá roztokem kyseliny. Používají se například 50% roztoky HNO_3 nebo HCl. Při normální teplotě se ocel naleptá do hloubky 2 až 4 μm. Při příliš dlouhé době by mohlo leptadlo narušovat ochrannou vrstvu nanesenou v předešlém kroku, což by mělo

za následek zejména zhoršení okrajů čar. Po dokončení leptání se povrch vzorku opět očistí toluenem.

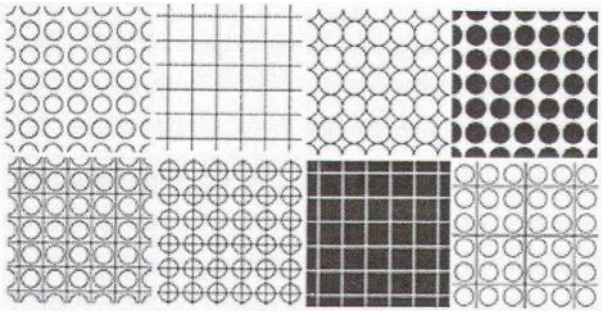
Hlavní nevýhodou tohoto způsobu nanášení sítě je zejména velká pracnost. Mezi výhody naopak patří kvalitní a ostré hrany čar sítě a možnost reprodukovat i velmi husté sítě. [23]

Vytváření sítí pomocí laseru

Požadovaný vzor sítě je na povrch vzorku nanášen působením laseru. Při užití této metody se může kontrolovat úběr materiálu. Tato metoda se vyznačuje největší přesností nanesené sítě, nicméně v závislosti na velikosti vzorku může být velice pomalá. Navíc je tento způsob vytváření sítě velice nákladný a není možno získávat barevné sítě. Tato metoda je limitovaná tím, že síť má tmavou barvu, čímž je nemožné získat dostatečný kontrast mezí sítí a tmavě zbarveným povrchem plechu bez narušení vrchní vrstvy materiálu. V takovýchto případech se uvažuje metoda sítotisku. A to vzhledem k možnosti volby barvy sítě a s tím související maximalizací kontrastu. Mělo by se však počítat s možností otěru barvy během tváření. U pozinkovaných materiálů je tato metoda ve srovnání s chemickým leptáním přesnější a rychlejší. Stopa vytvořená laserem má poloviční hloubku a šířku oproti stopě vytvořené chemickým leptáním. To znamená, že sít vytvořená laserem nám dává spolehlivější výsledky, zatímco dochází k menšímu ztenčování materiálu než u chemického leptání. Tato metoda nahrazuje chemické leptání zejména tehdy, když potřebujeme vytvořit síť na plechu o velké ploše. [23]

2.2 Tvary sítí

Na obr. 10 je vidět ukázka několika typů provedení nanášených sítí. Z hlediska vyhodnocování deformace sítě, se jeví jako nejméně vhodná čtvercová síť. [23]



Obr. 10 Tvary možných sítí. [23]

3 TVAŘITELNOST OCELOVÝCH PLECHŮ S POVRCHOVOU ÚPRAVOU

Tvařitelnost (plasticita) je vlastnost materiálu měnit tvar bez makroskopického porušení. Jedná se o funkci materiálu, teplotních a rychlostních podmínek, napěťového stavu, historie napětí a deformace, geometrického faktoru a vnějšího prostředí. [22], [29] Při tváření povrchově upravených plechů nesmí dojít z důvodu zachování požadovaných vlastností k poškození povlaku naneseném na základovém plechu. [25]

Technologická tvařitelnost je táž vlastnost vztažená na konkrétní tvářecí proces nebo vázaná na konkrétní zkoušku. Její míra je posuzována podle ukazatelů tvařitelnosti vycházejících ze zkoušek napodobujících jednotlivé tvářecí procesy. [28]

Použitím mechanicko-matematického směru (parametry procesu deformace, změny tvaru a rozměru, deformační síly a práce, atd.) a fyzikálně chemického směru (závislost deformačního odporu a plasticity na chemickém složení, teplotě, rychlosti atd.) je možno dosáhnout navržení takového technologického postupu, při kterém zajistíme nízkou spotřebu materiálu a energie a také nízké zatížení nástrojů a strojů. [5]

Technologie tváření ocelových plechů patří do skupiny plošného tváření a jedná se o základní technologii strojírenské výroby. Při této technologii se mění tvar, rozměry a vlastnosti výchozího polotovaru vlivem plastické deformace bez porušení soudržnosti. [27]

Všechna pravidla tvařitelnosti materiálu se obecně týkají i tvařitelnosti při plošném tváření. Odlišnost je v důrazu na jednotlivé faktory ovlivňující tuto složitou funkci. Je zdůrazněn zejména vliv geometrického faktoru a kvality povrchu. [28]

Napěťový stav je zpravidla zjednodušen na rovinnou napjatost. V případě porušení je řídícím mechanismem ztráta stability, na kterou navazuje v závěrečné fázi porušení tvárným lomem. Při tažení se rozeznávají 3 typy ztráty stability:
- na úrovni velikosti zrna,
- tvarové defekty, vlny, vybouleniny,
- lokalizace deformace v krčku – patří k nejdůležitějším. [26]

3.1 Hodnocení povrchově upravených plechů

Snaha je, aby hodnocení povlakovaných plechů bylo co nejvíce komplexní. Je třeba ještě hodnocení vlastností povlaku v závislosti na jeho typu, historii zpracování a konečném použití. Obecným kritériem hodnocení lisovatelnosti daného dílu je dodržení požadavků kladených na výlisek ve vztahu k jeho dalšímu technologickému zpracování (např. realizovatelnost následných operací tváření, povrchové úpravy) a funkční uplatnění (tvarová a rozměrová přesnost, tuhost, stabilita).

Lisovatelnost plechu umožňuje požadovanou změnu tvaru, při zachování užitných vlastností zpracovaného povrchově upraveného plechu. V případě povlakovaných plechů jde především o zachování korozní odolnosti. Hodnocení lisovatelnosti těchto materiálů znamená stanovit mezní stavy základního materiálu a mezní stavy povrchové vrstvy, respektive povlaku. [25] Hodnocení lisovatelnosti povlakovaných plechů lze hodnotit např. z pohledu:

- maximální dosažená deformace (hodnocení např. mezním stupněm tažení),
- přípustná deformace povrchové vrstvy při zachování její funkčnosti (tj. např. ochrany proti korozi). [30]

Výzkum povlakovaných plechů vyžaduje sledování změn integrity povrchu za podmínek existence stavů napjatosti při různých intenzitách deformace. V případě tažení výlisků z plechů s kovovými povlaky je navíc nutno zajistit zachování potřebné míry ochranné funkce povlaku, ovlivňující také výslednou korozní odolnost. Příčinou snížení ochranné funkce povlaku, v porovnání s výchozím stavem u netvářeného plechu, mohou být následující průvodní jevy procesu tváření:

- zmenšení tloušťky povlaku s dostatečnou plastičností v důsledku plastické deformace a kontaktního působení nástroje, což může vést i k místnímu porušení jeho celistvosti,
- vznik trhlin při jeho nedostatečné plastičnosti a případně jeho odlupování při jeho nedokonalém spojení se základním materiálem, včetně vlivu přechodové vrstvy. [31]

Ve vztahu k tažení výlisků např. v automobilovém průmyslu je míra ztráty ochranné funkce povlaku aktuální v souvislosti s plastickou deformací plechu, kdy k těmto nežádoucím jevům dochází především při uplatnění tahových stavů napjatosti a za podmínek vypínání. Je zřejmé, že při nárůstu tahových napětí ochranná funkce povlaku klesá. [31]

3.2 Materiálové faktory ovlivňující technologickou tvařitelnost plechu

Se zvyšujícími se požadavky na tvařitelnost plechů stoupá nutnost posouzení vhodnosti plechu ke tváření vybranou technologií.

Mezi materiálové faktory ovlivňující technologickou tvařitelnost patří chemické složení a jeho lokální nestejnorodosti, mikrostruktura a mikročistota, textura a z ní plynoucí anizotropie mechanických vlastností.

Vlastnosti materiálů pro plošné tváření kolísají v závislosti na aktuálním chemickém složení, technologickém postupu válcování, tepelného zpracování a krystalografické textuře. Za studena válcované plechy jsou výrazně anizotropní. [25]

3.3 Chemické složení

Chemickou analýzu lze provést např. podle ČSN 42 0510 až 42 0526 při odlévání každé tavby pomocí tavebního vzorku, který se odebírá podle ČSN 42 1210 při odlévání ingotů. Chemické složení je uvedeno v normách jakosti a je závazné pro rozbor tavby.

Na kvalitu hlubokotažných plechů mají vliv základní doprovodné prvky (uhlík, mangan, křemík, fosfor, síra, kyslík, dusík atd.). Tyto prvky významně ovlivňují mechanické vlastnosti hlubokotažných ocelí válcovaných za studena. [7], [32]

3.4 Mikrostruktura a mikročistota

Charakter mikrostruktury ocelového hlubokotažného plechu má značný vliv na jeho mechanické vlastnosti a tvařitelnost. Mikrostruktura nízkouhlíkových hlubokotažných plechů je tvořena základní strukturní složkou feritem a cementitem, který v závislosti na předchozích podmínkách zpracování může být vyloučen v různém tvaru. Na tvařitelnost plechů má vliv velikost a tvar feritického zrna, dále pak množství, tvar a rozložení cementitu i vměstků. Velikost feritických zrn u používaných plechů uvádí norma ČSN 42 0463. Mikročistota oceli udává počet, druh a velikost nekovových vměstků. [7], [32]

3.5 Anizotropie plechu

Anizotropie plechů je směrová závislost mechanických a fyzikálních vlastností (nestejnoměrnost vlastností v různých směrech souřadného systému), přičemž za výchozí se pokládá směr válcování. Při posuzování anizotropie je materiál považován za homogenní, charakterizovaný třemi ortogonálními osami anizotropie. Osa *x* se ztotožňuje se směrem válcování, který se označuje jako směr 0. Při posuzování anizotropie plechů se rozlišuje anizotropie *plošná* (v rovině plechu) a *normálová* (ve směru tloušťky plechu). [7]

K posouzení mechanických vlastností, a tedy i zhodnocení (posouzení) použitelnosti materiálu pro danou technologii, slouží zkouška tahem – ČSN EN 10002. Pomocí této zkoušky se zjišťuje tzv. anizotropii materiálu. [7], [32]

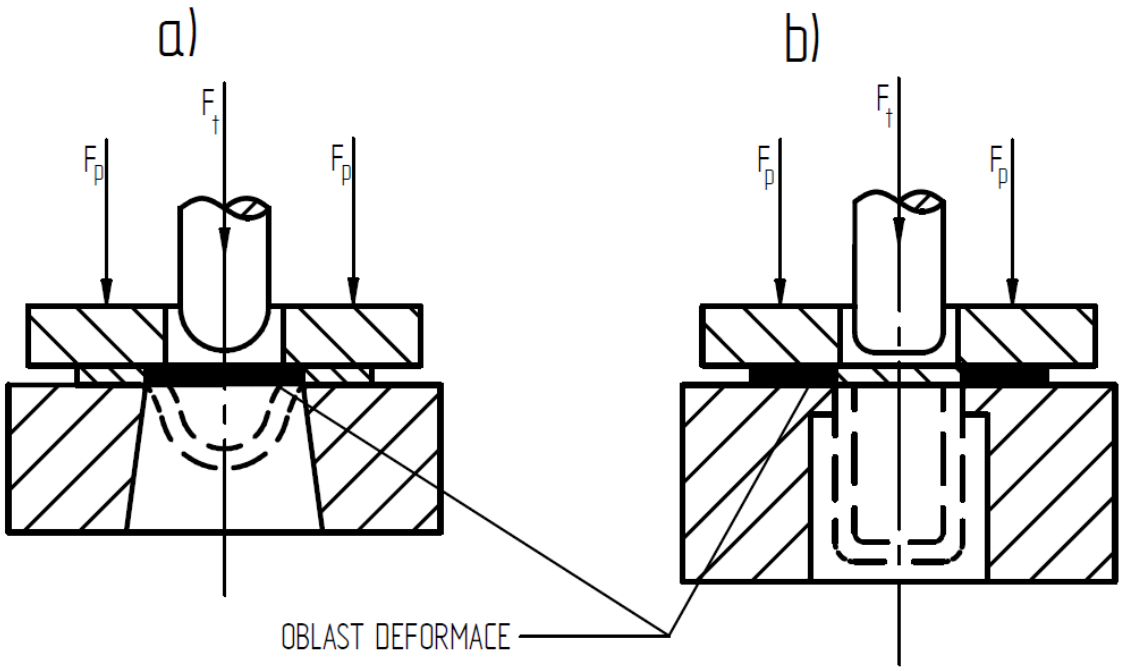
Anizotropie je způsobena především:

- Orientovanou makrostrukturou (strukturní texturou), vzniklou při válcování za tepla v důsledku prodloužení necelistvostí, nemetalických inkluzí a oblastí s různým chemickým složením ve směru válcování.
- Orientovanou mikrostrukturou (krystalografickou texturou), vzniklou při válcování za studena v důsledku prodloužení a natočení plasticky deformovaných krystalických zrn. [46]

3.6 Hodnocení vhodnosti plechů k tažení

Plošné tváření je charakterizováno neustálým rovinným stavem napjatosti. Zahrnuje celou řadu technologií, při kterých se skutečný stav napjatosti na jednotlivých stádiích mění od jednoosého tahu, přes smyk, ke kombinovanému tahu a tlaku a dvojosému tahu.

Technologie jsou ohraničeny hlubokým tažením a vypínáním. Většina technologií v sobě kombinuje obě tyto operace. [46]



Obr. 11 Schéma a) vypínání b) hlubokého tažení. **[46]**

Hodnocení vhodnosti tenkých plechů k tažení je v průmyslové praxi věnována soustavná pozornost, viz. obr. 11. Snahou je najít takové metody zkoušení, které by poskytly co

nejvěrnější obraz o chování materiálu při tažení výtažku, a to především u složitých a nepravidelných tvarů. Technologická tvařitelnost je při plošném tváření zjišťována pomocí základních a napodobujících (technologických) zkoušek. [25], [46]

3.7 Kritéria hodnocení tvařitelnosti plechů

Mezi základní kritéria hlubokotažnosti lze zahrnout:

- součinitele plastické R_α a plošné anizotropie ΔR,
- exponent deformačního zpevnění, n.

Podle těchto kritérií je možno stanovit tvařitelnost plechu pro konkrétní tvary výtažků i lépe zatřídit plechy z hlediska tvařitelnosti. Zahrnutí anizotropie mechanických vlastností plechů do kritérií hodnocení hlubokotažnosti umožňuje volbu optimální orientace polotovarů při nástřihu a tvářecími nástroji, což je důležité zejména u nesymetrických a nerotačně symetrických tvarů výtažků.

Zavedení těchto kritérií hodnocení tvařitelnosti umožňuje racionálnější volbu:

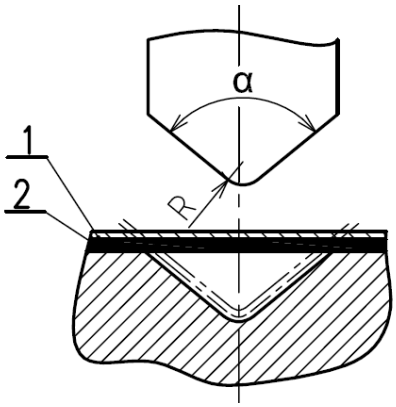
- nástřihových plánů,
- tvarů výchozích polotovarů (cípovitost),
- využití plastických vlastností plechů,
- ovlivnění konstrukce tvářecích strojů. [33], [46]

4 TECHNOLOGIE OHÝBÁNÍ POVRCHOVĚ UPRAVENÝCH PLECHŮ

Při ohýbání povrchově upravených plechů je povrchová vrstva různě namáhaná v závislosti na její poloze v ohýbadle. V případě, že je plastická vrstva na vnější straně, je namáhána tahovým napětím, vlivem kterého je přitlačená na základní materiál. [2]

Je-li plastická vrstva na vnitřní straně, je namáhána tlakovým napětím, viz. obr. 12. Zvětšení drsnosti funkčních částí nástroje způsobuje vyšší tření na kontaktních plochách, což může vést k poškození povrchové vrstvy. Ze zkušeností firem zabývajících se zpracováním plechů s plastickou vrstvou vyplývá, že minimální poloměr ohybu plechu s nanesenou vrstvou plastické hmoty tloušťky větší než 150 μm je v případě tahových napětí v povlaku stejný jako tloušťka základního materiálu. [1]

Pokud je tloušťka povlaku menší než 150 μm, doporučuje se volit větší poloměr ohybu, aby nedošlo k vytvoření trhlin v povrchové vrstvě. [15]



Obr. 12 Schéma ohýbání povrchově upraveného plechu (ohyb do V
1 – základní materiál, 2 – povlak). [28]

4.1 Malé poloměry ohybů a rozdělení deformace v ohybu

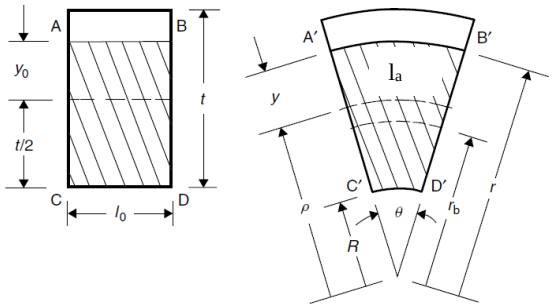
Deformace v ohybu se předpokládala jako lineární funkce vzdálenosti od středu a povrchu. Je-li poloměr ohybu (ρ) přibližně stejný jako tloušťka plechu (t), je nezbytná přesnější analýza. [4], [20]

U deformovaného tvaru lze délku l_a ve střední oblasti psát ve tvaru:

$$l_a = \rho \cdot \theta \text{ [mm]} \qquad [20] \qquad (2)$$

kde: l_a – délka střední plochy
ρ – rádius
θ – úhel vybraného elementu

Na obr. 13 je element plechu ohnutý malým poloměrem.



Obr. 13 Element plechu ohnutý malým poloměrem ohybu. (r ≈ t) [20]

Objem deformovaného prvku je:

$$\frac{\theta}{2}\cdot\left(R_0^2 - R^2\right)\cdot l \tag{3}$$

kde: l – délka oblouku
R_0 – poloměr vnějšího povrchu
R – poloměr vnitřního povrchu.

Kde $R_0 = \rho + \left(\frac{t}{2}\right)$ je poloměr vnějšího povrchu a $R = \rho - \left(\frac{t}{2}\right)$ je poloměr vnitřního povrchu.

Vzhledem k tomu, že objem prvku zůstává konstantní, lze získat z výše uvedené rovnice tvar:

$$l_0 \cdot t \cdot l = \left(R_0^2 - R^2\right)\cdot 1 = \theta \cdot \rho \cdot t \tag{4}$$

kde: l_0 – délka plechu
t – tloušťka plechu

tj.

$$l_0 = \theta \cdot \rho \tag{5}$$

Je-li délka střední povrchu v deformovaném stavu, je l_a následně,

$$l_a = \rho \cdot \theta \tag{6}$$

tj. délka střední povrchu se nemění. Uvažuje se vlákno y_0 od středního (neutrálního) povrchu v rámci uvedeného stavu, jak je znázorněno na obr. 13, rovnající vyšrafované objemy jsou:

$$\frac{\theta}{2}\cdot\left\{r^2\cdot\left[\rho - \frac{t}{2}\right]^2\right\} = \left(y_0 + \frac{t}{2}\right)\cdot l_0 \tag{7}$$

kde: y_0 – vlákno od středního (neutrálního) povrchu

Vzhledem k tomu, že, $\theta = \frac{l}{\rho} = \frac{l_0}{\rho}$ poloměr vlákna zpočátku y_0 je:

$$r = \sqrt{2\cdot\rho\cdot y_0 + \rho^2\cdot\frac{t^2}{4}} \tag{8}$$

kde: r – poloměr oblouku $A'B'$

Délka vlákna $A'B'$ je $l = r \cdot \theta$ a nahrazením $\theta = \frac{l_0}{\rho}$ se obdrží rovnice:

$$\frac{l}{l_0} = \sqrt{1 + \frac{2 \cdot y_0}{\rho} + \left(\frac{t_0}{2\rho}\right)^2} \tag{9}$$

Minimální délka se zjistí derivací rovnice (9) s ohledem na zakřivení 1/ρ a rovnající se nule. Z toho deformace ve vlákně se začíná měnit, za podmínky, když poměr

$$\frac{t}{\rho} = -\frac{4 \cdot y_0}{t} \tag{10}$$

Dosazením do rovnice (9) je minimální délka takového vlákna:

$$\frac{l}{l_0} = \sqrt{1 - \left(\frac{2 \cdot y_0}{t}\right)^2} \tag{11}$$

A poloměr vlákna v bodě B, který dosáhne minimální délku, je:

$$r_b = \sqrt{\rho^2 - \left(\frac{t}{2}\right)^2} = \sqrt{R \cdot R_0} \tag{12}$$

kde: r_b – poloměr vlákna v bodě B

Důležitost tohoto zvratu deformace je v tom, že je třeba vzít v úvahu při určování efektivní deformace v elementu materiálu v určité vzdálenosti od středu (neutrálního) povrchu.

Nedojde-li k obratu, efektivní deformace může být stanovena přibližně z počáteční a konečné délky vlákna.

Dojde-li k obratu, měla by být efektivní deformace integrována podél celé deformační dráhy. Přerušovaná čára je určena z jednoduché, velké ohybově-poměrové analýzy. Tam je významný rozdíl způsobený dvěma faktory:

- vhodné začlenění efektivní (skutečné) deformace,
- nelineární rozložení deformace odvozené z rovnice (9). [20]

4.2 Ohyb plechu s malým poloměrem ohybu

U malých poloměrů ohybu přes celou tloušťku plechu nelze předpokládat, že napětí bude nulové. Stav deformace a napětí, jak je uvedeno na obr. 14, je popsán ε_1, ε_2, ε_3 takto:

Deformace: ε_1; $\varepsilon_2 = 0$; $\varepsilon_3 = -\varepsilon_1$

ε_1 – poměrná deformace
ε_2 – tlaková deformace

a napětí: σ_1; $\sigma_2 = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2}$; σ_3

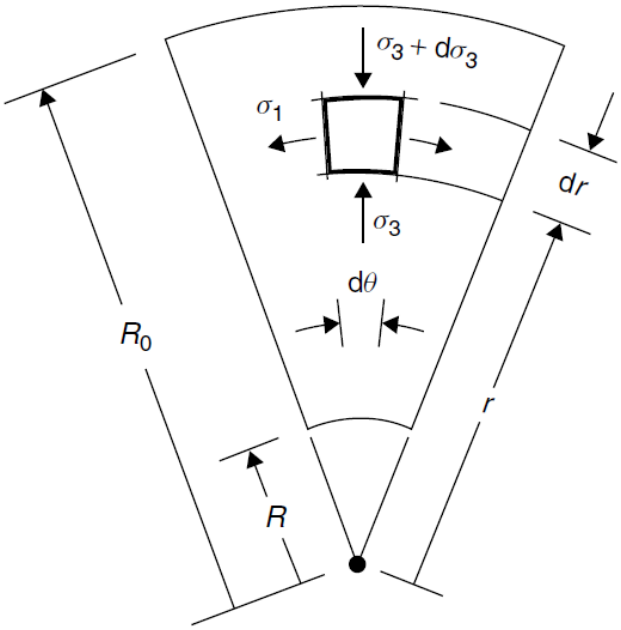
σ_1 – nominální tahové napětí
σ_2 – střední hodnota z napětí $\sigma_1 + \sigma_3$
σ_3 – nominální tlakové napětí

Rovnice rovnováhy sil je ve tvaru:

$$(\sigma_3 + d\sigma_3) \cdot (r + dr) \cdot d\theta \cdot l - (\sigma_3 \cdot r \cdot d\theta + \sigma_1 \cdot dr \cdot d\theta) \cdot l = 0 \tag{13}$$

po úpravě:

$$\frac{d\sigma_3}{dr} - \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{r} = 0 \tag{14}$$



Obr. 14 Parametry ohýbaného prvku při malém poloměru ohybu *r*. [20]

Popis oblasti, kde napětí ohybu je v oblasti tahové a dosahuje maximální hodnoty napětí σ_1 a minimální hodnota napětí je σ_3, je dosažena mez kluzu. Lze psát rovnici:

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \sigma_f \tag{15}$$

kde: σ_f – mez kluzu

s využitím Trescovy podmínky. Rovnice 14 se převede na tvar:

$$\frac{d\sigma_3}{dr} - \frac{\sigma_f}{r} = 0 \tag{16}$$

Pokud napětí na vnějším povrchu je nulové, integrací mezi limity r = R_0 a *r*, se obdrží

$$\sigma_3 = -\sigma_f \cdot l_n \cdot \frac{R_0}{r} \tag{17}$$

V oblasti, kde napětí v ohybu je tlakové, mez kluzu jako kritérium dává vztah

$$\sigma_1 - \sigma_3 = -\sigma_f \tag{18}$$

Integrací rovnice (14) pro $r = R$ a za předpokladu, že napětí na vnitřním povrchu je nulové, se získá vztah:

$$\sigma_3 = -\sigma_f \cdot l_n \cdot \frac{r}{R} \tag{19}$$

Je třeba poznamenat, že se jedná o technologii zpracování materiálu za studena. Poloměr k neutrální ose lze vyjádřit vztahem:

$$r_b = \sqrt{R \cdot R_0} \quad [20] \tag{20}$$

4.3 Problematika povrchově upravených plechů v praxi

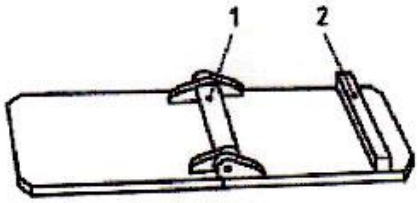
Ve strojírenském odvětví se v dnešní moderní době nanášejí barvy a laky převážně elektroforézním způsobem.

Kataforéza je jedna z nejprogresivnějších výrobních technologií nanášení základních barev s vysokým stupněm antikorozní ochrany kovů. Metoda kataforézního lakování patří mezi nejmodernější technologie povrchové úpravy kovových výrobků. V současné době nemá kataforéza v řadě výrobních oblastí srovnatelnou konkurenci. Největší podíl na rozvoji kataforézní technologie má automobilový průmysl, kde antikorozní odolnost karosérií a ostatních komponentů je stěžejní pro většinu výrobců. Vysoká kvalita povrchové úpravy, spolu s výhodami ekonomickými a ekologickými umožnila tuto technologii k využití i v dalších oborech strojírenství a spotřebního průmyslu. Narušení vazeb mezi základním ocelovým materiálem a jeho povlakem způsobují vady, vyskytující se při plošném tváření (vlnitost povrchu plechu, tvarová deformace, lámavost, uvolňování kovu, nevhodná struktura povrchu), nebo špatná volba kombinace základní materiál a povlak. [35]

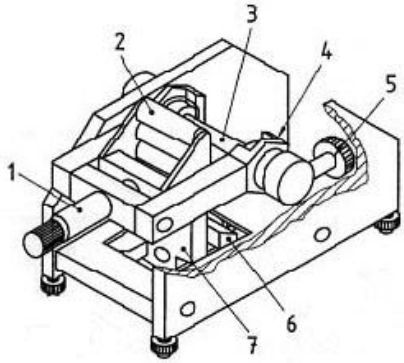
Současné požadavky na technologii povrchové úpravy jsou zachovat celistvost povrchové vrstvy a všech vazeb mezi povrchem a základním materiálem po tažení resp. ohýbání. Povrchově upravené ocelové plechy dnes již zasahují do většiny průmyslových odvětví a svým významem rozhodují o kvalitě a funkční spolehlivosti budoucích výrobků. Ochranné povlaky mají nezastupitelnou úlohu u velmi široké oblasti používaných konstrukčních materiálů. Pro oblast zkoušení a hodnocení přilnavosti povlakovaných plechů je charakteristická velká rozmanitost metod a postupů. [9], [21]

Vedle používaných zkušebních postupů ke zkoušce přilnavosti pro kovové a jiné povlaky patří například zkouška přilnavosti povlaků mřížkovým řezem, zkouška odolnosti povlaku v Erichsenově přístroji. Dále ke zjišťování odolnosti vytvořených povlaků vůči praskání nebo odtrhování povlaku z ocelového plechu po ohybu zkoušeného povrchově upraveného plechu se provádí v laboratořích zkouška ohybem o 180° na válcovém trnu. [3], [11], [14]

Zkušební válce jsou různého průměru a musí se měnit. Při postupném testování vzorků plechu s povlaky je třeba měnit válce o různých průměrech a přitom se sleduje, kdy se objeví trhlina v povlaku, resp. jeho odloupnutí od ocelového plechu. Rozměr vzorků je pro existující typy zkušebních zařízení omezen šířkou 50 mm a tloušťkou 1 mm. Typ 1, viz obr. 15, je vhodný ke zkoušení povlakovaných plechů do tloušťky 0,3 mm a typ 2, viz obr. 16, se doporučuje ve výše uvedené normě ke zkoušení vzorků tloušťky do 1 mm. Jednotlivé průměry válcového trnu jsou od průměru 2 do průměru 32 mm s tolerancí ±0,1 mm. Doporučují se trny i jiných průměrů dle ČSN EN ISO 1519. Vždy je třeba provést po příslušném ohybu demontáž a následně montáž zkušebního zařízení pro další experiment. [17], [46]



Obr. 15 Zkušební zařízení typu 1. [37]
1-trn, 2-zarážka.



Obr. 16 Zkušební zařízení typu 2. [37]
1-šroubovací držadlo, 2-ohýbací část, 3-trn,
4-ložisko trnu, 5-nastavovací šroub,
6-upínací čelist, 7-přítlačná čelist.

4.4 Stanovení velikosti logaritmické deformace

U měřených ohnutých vzorků se měřila délka L_1 a L_2. U výchozího stavu se měřil průměr naleptaných kružnic, viz obr. 17. Jelikož se měnila tloušťka plechu při tažení, deformace φ_3 se počítala podle vzorce 23. Pro logaritmické deformace jsou uvedeny vztahy:

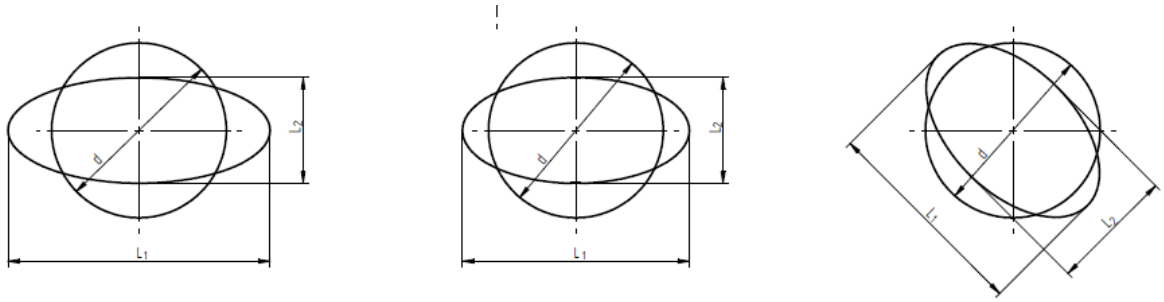
$$\varphi_1 = \ln \frac{L_1}{d} \qquad [-] \qquad (21)$$

$$\varphi_2 = \ln \frac{L_2}{d} \qquad [-] \qquad (22)$$

$$\varphi_3 = -\varphi_1 - \varphi_2 \qquad [-] \qquad (23)$$

kde:

φ_1, φ_2, φ_3 – logaritmické deformace



Obr. 17 Stanovení velikosti logaritmické deformace φ_1, φ_2 a φ_3. [28]

Výsledné deformace, průměry, jednotlivých vzorků jsou uvedeny v tabulce 12 až 17. Při deformaci se nanesená síť kružnic mění na elipsy, kde jejich osy určují směr i velikost maximální a minimální logaritmické deformace výlisku.

Deformační síť lze použít i pro vyhodnocení změny tloušťky plechu po tažení. Je-li původní tloušťka plechu s_0 a tloušťka plechu po tažení s, potom při zachování rovnosti objemu elemnetu je:

$$\frac{s}{s_0} = \frac{d^2}{L_1 \cdot L_2} \qquad [28] \qquad (24)$$

5 ZKOUŠKY TVRDOSTI

Zkouška tvrdosti je rychlou a levnou zkouškou, která slouží k odhadu mechanických vlastností materiálu. Tvrdost se určuje vtlačováním indentoru (vnikacího tělíska) definovanou silou do povrchu zkoušeného materiálu. V principu existují dva způsoby měření tvrdosti.

Prvý způsob, používaný u kovů a keramiky, kdy je indentoru zamáčknut do materiálu tak, aby došlo k plastické (trvalé) deformaci materiálu. Tyto metody označujeme jako vnikací (indentační). Druhý způsob měření tvrdosti je založen na principu elastické interakce povrchu materiálu a zkušebního tělíska a v současné době se používá většinou pro hodnocení pryží a plastů. [36]

5.1 Metody plastické interakce materiál – vnikací těleso

Brinellova zkouška tvrdosti, viz obr. 18a. U této metody je indentor kulička ø 10 mm vyrobená z vysokopevné oceli příp. karbidu wolframu. Později se přešlo místo kuličky na diamant vybroušený do tvaru pyramidy, příp. kužele. Výhodou tohoto tvaru indentoru je, že v širokém intervalu zátěžných sil jsou vtisky geometricky podobné a tedy vyhodnocená veličina nezávisí na podmínkách zkoušky.

Ve strojírenství je tato zkouška hodně rozšířená, jelikož je méně náročná na přípravu povrchu zkušebního tělesa a deformace v okolí vtisku zaujímá větší objem ve srovnání s měřením tvrdosti podle Vickerse. Brinellovo tvrdostní číslo (HB) se počítá ze vztahu:

$$HB = \frac{2 \cdot F}{\left[\pi \cdot D\left(D - \sqrt{D^2 - d^2}\right)\right]} \tag{25}$$

kde: D, d – jsou průměry kuličky a vtisku

Vztah (21) platí pouze za podmínky, že průměr vtisku *d* leží v rozmezí (0,3 – 0,6)D. Dodržení této podmínky je v normách zaručeno tak, že pro různé materiály je předepsána tzv. Zatěžovací konstanta k (k je dáno poměrem zatěžovací síly ke čtverci průměru kuličky.) Hodnota k je odstupňována podle tvrdosti zkoušených materiálů do šesti stupňů.

Vickersova zkouška, nejrozšířenější v Evropě, má indentor tvaru jehlanu o čtvercové základně a vrcholovém úhlu 136°, viz obr. 18b. Vickersovo číslo tvrdosti (Vickers hardness number – v normách se označuje zkratkou HV) je definováno jako poměr zátěžné síly a plochy vtisku.

$$HV = 1{,}854 \cdot \frac{F}{d^2} \tag{26}$$

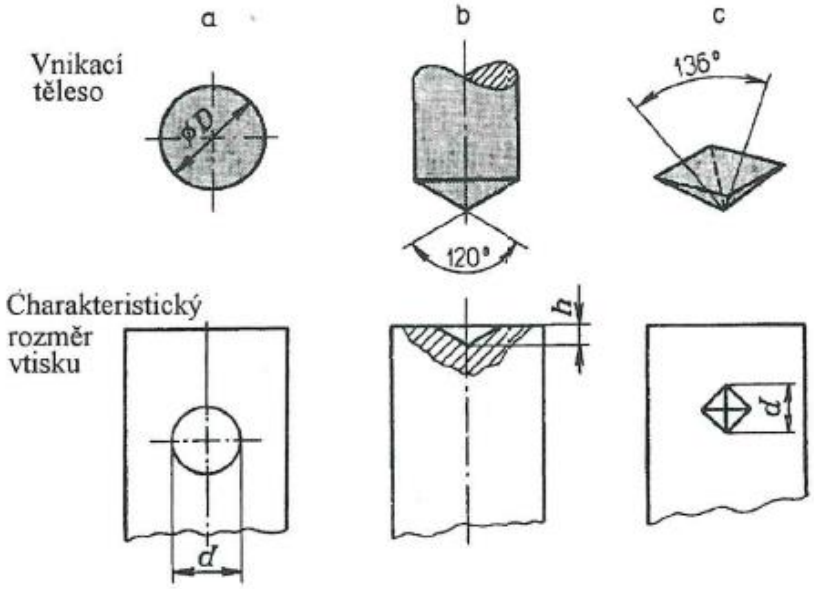
kde: F - zátěžná síla
d – střední velikost úhlopříčky vtisku

Nezávislost tvrdosti na velikosti zátěžné síly u Vickersovy metody je výhodná tím, že měření je možné provádět i při velice malých zatíženích (1 až 10^{-3})N. Tyto zkoušky se označují termínem mikrotvrdost. [48] Na metalograficky připravených výbrusech je možné měřit tvrdost jednotlivých zrn, průběh tvrdosti v okolí svarového spoje, povrchové vrstvy apod.

Rockwellova zkouška pochází z USA a zavedla jej firma Rockwell. Tvrdost se měří na základě hloubky proniknutí malé kuličky (ø 1/16" příp. 1/8") nebo diamantového kužele (vrcholový úhel 120°), obr. 18c při zatížení definovanou silou. Tato metoda nemá přepočtové

tabulky, Rockwellovo tvrdostní číslo (HR) se odečítá na stupnici hloubkoměru, který je součástí tvrdoměru. Rockwellova metoda nemá zatěžovací konstantu, ale podle typu zkoušeného materiálu je předepsána zátěžná síla a indentor, každá kombinace se označuje velkým písmenem za značkou HR. I v případě Rockwellovy tvrdosti vzhledem k možnosti použití diamantového kužele existuje varianta měření mikrotvrdosti. Vzhledem k jednoduchosti odečítání tvrdosti i menším nárokům na přípravu povrchu vzorku je měření HR preferováno především v laboratořích tepelného zpracování.

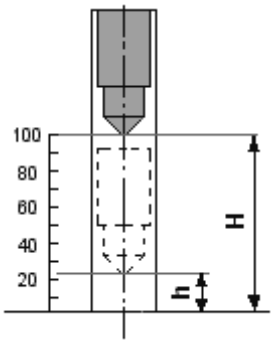
Měření tvrdosti HV, HB i HR jsou založeny na principu měření odporu materiálu vůči plastické deformaci, proto termín vnikací nebo indentační zkoušky. Přístroje pro měření tvrdosti v laboratorním stolním provedení umožňují pomalé zatěžování vnikacího tělíska. Existují i zařízení přenosná, kde zatěžování je rychlé – dynamické. U nás se nejvíce rozšířilo používání kladívka Poldi (komparační, srovnávací dynamická metoda) a Baumanova kladívka (dynamická metoda). V obou případech je indentorem kulička a tvrdostní čísla odpovídají Brinellově tvrdosti. [36]



Obr. 18 Tvar vnikacího tělesa a charakteristiky a rozměr vtisku. [36]
Zkouška tvrdosti podle a) Brinella b) Rockwella c) Vickerse

5.2 Metody elastické interakce materiál – vnikací těleso

Zde patří zkouška podle Shorea. Jedná se o zkoušku odrazem zkušebního tělesa, kdy se zjišťuje výška jeho odskoku od měřené plochy. Zkouška odrazem podle Shorea - touto metodou zjišťujeme tvrdost z velikosti odskoku závaží (kulička, diamantový hrot) spuštěného z určité výše od zkoušeného materiálu. Působením závaží dojde k plastické deformaci zkoušeného materiálu a ke spotřebování části energie závaží. To se pak neodrazí do původní výšky. Na obr. 19 je Shoreův skleroskop.



Obr. 19 Shoreův skleroskop. [52]

kde: H – pádová výška [mm]
h – výška odskoku [mm]

Shoreův skleroskop je přístroj pro stanovení tvrdosti podle Shorea. Tohoto způsobu zjišťování tvrdosti se používá velmi málo, většinou jen pro měření tvrdosti velkých výrobků, konstrukcí apod. Empiricky sestavená stupnice skleroskopu udává přímo hodnotu tvrdosti. Tato metoda je oproti jiným způsobům zjišťování tvrdosti značně nespolehlivá. [52]

6 KATAFORÉZNÍ LAKOVÁNÍ

Kataforéza je ekologický způsob lakování patřící k hospodárnějším způsobům lakování ocelových, pozinkovaných a hliníkových výrobků. Při kataforéze se používají kationické nátěrové hmoty na bázi epoxidů popř. akrylátů (ve vodě rozpustné) s velmi nízkým obsahem organických rozpouštědel (okolo 2 %) obsahující částice laku ve formě polymerních kationtů. Při lakování je výrobek ponořen do lakovací lázně a zapojen jako katoda. Umístěním stejnosměrného napětí mezi výrobek a proti-elektrodu (anodu) se vytvoří elektrické pole, které usměrní pohyb polykationtů směrem ke katodě. Na povrchu výrobku se vylučují hydroxylové ionty. S narůstající tloušťkou povlaku roste odpor vrstvy a tím klesá rychlost vylučování. Vylučování pokračuje přednostně na místech s doposud malou tloušťkou vrstvy (v místech stíněných, v dutinách apod.) Tím dochází k tvorbě velmi rovnoměrného povlaku na celém povrchu včetně těžko přístupných míst. Po dosažení určité tloušťky povlaku na celém povrchu se další vylučování zastaví. Tloušťka závisí především na velikosti použitého napětí, běžně se pohybuje mezi 15 a 30 µm, při extrémních požadavcích až okolo 45 µm (tzv. silnovrstvá kataforéza). Elektricky vyloučená vrstva pevně lne k podkladu, přebytečný lak se opláchne. Vyloučený povlak je nutno vypálit při teplotách okolo 160 až 180°C, kdy dochází k polymeraci a povlak získává konečné vlastnosti. Vzhledem k náročnosti změny odstínu se používá kataforéza především k základování, kde vrchní povlak je možné vytvořit práškovým nebo mokrým lakováním. Použití této kombinace dochází ke značnému prodloužení životnosti výrobku a lakované vrstvy. [38]

Poměrně nová metoda kataforézního lakování patří k moderním technologiím povrchových úprav. První kataforézní lakovna byla postavena až v roce 1978 ve Francii. Během velice krátké doby nahradila klasické a zejména anaforézní postupy. Největší zásluhu na rozvoji kataforézní technologie má automobilový průmysl, kde je vysoká antikorozivní odolnost karosérií a ostatních komponent prioritou všech světových výrobců. Požadovaná vysoká kvalita musí být jednoznačně dodržena i za výhodných ekonomických a ekologických podmínek. Symbiózu všech těchto někdy protikladných nároků kataforéza splňuje. [39]

6.1 Základní složení barvy

V kataforéze lze ošetřit každý výrobek, který:
- je vodivý
- lze jen ponořit
- snese teplotu 160° – 1800°C

Funkční kataforézní barvící lázeň se skládá z těchto základních komponent:
- pryskyřice (pojivo)
- pasta (pigment) – určuje odstín barvy – běžné odstíny jsou šedý, černý event. bílý či béžový
- aditiva (rozpouštědla, pH regulátor)

Všechny tyto komponenty jsou homogenně rozmíchány v DEMI vodě. [39]

6.2 Předúprava kataforézního lakování

Technologie zinečnatého fosfátování je v současné době nejkvalitnější předúprava před lakováním kovových a hliníkových dílů. Má zásadní vliv na výslednou korozní odolnost a přilnavost laku. Tato předúprava zaručuje optimální ochranné vlastnosti nanokeramické

finální pasivace i v případě porušení lakované vrstvy (tzv. podkorodování) 11-stupňová předúprava trikationického zinečnatého fosfátování je založena na tvorbě vrstvy na bázi fosforečnanů zinku. Součástí používané technologie je i finální pasivace, která uzavírá případné mikropóry fosfátové vrstvy.

Kvalita jednotlivých technologických kroků je laboratorně sledována. Optimální nastavení všech parametrů procesu je výsledkem spolupráce našeho výhradního dodavatele technologie předúprav a know-how. [39]

Mezi hlavní přednosti KTL lakování patří:

- vynikající antikorozní odolnost při malé tloušťce (25 mikronů, testováno v solné mlze),
- vysoká zabíhavost i do nepřístupných míst (dutiny),
- plně automatický proces s vyloučením lidského faktoru,
- krátká doba lakování 150 ÷ 250 s,
- vysoká účinnost procesu – více než 99 % využití barvícího materiálu,
- rovnoměrná tloušťka – snadná kontrola kvality,
- příznivá k životnímu prostředí – DEMI voda jako majoritní rozpouštědlo, obsah organických rozpouštědel pod 2 %.

Použití kataforézního lakování:

- automobilový průmysl (karosérie, odnímatelné díly),
- motocykly, bicykly,
- domácí spotřebiče (pračky, ledničky),
- elektrické přístroje,
- radiátory,
- klimatizační zařízení, ventilátory,
- traktory, zemědělské a stavební stroje,
- kovový nábytek (skladovací police),
- stavební komponenty. [39]

7 PŘESNOST MĚŘENÍ

Správnost (přesnost) měření je shoda mezi hodnotou veličiny získanou měřením a skutečnou hodnotou veličiny.

- Nemůže být vyjádřena číselně.
- Je nepřímo úměrná jak systematické, tak náhodné chybě.
- Přesnost je kvalitativní pojem (nedá se přímo kvantifikovat).
- Přesnost je obvykle dána konstrukcí a provedením měřicího přístroje, zejména omezením nahodilých vlivů jako tření, změn tepoty, tlaku vzduchu a podobně (Tyto vlivy se dají obvykle výrazně omezit tím, že se měření opakuje a výsledky matematicky zpracují).

7.1 Teorie chyb měření

V praxi nejsou žádná měření, žádná měřicí metoda ani žádný přístroj absolutně přesné. Nejrůznější negativní vlivy, které se v reálném měřicím procesu vyskytují, se projeví odchylkou mezi naměřenou a skutečnou hodnotou sledované veličiny. Výsledek měření se tak vždy pohybuje v jistém „tolerančním poli“ kolem skutečné hodnoty, ale téměř nikdy nenastává ideální ztotožnění obou hodnot. Přiblížení se k nulové velikosti odchylky vytváří velké potíže i u realizace etalonů. Výsledný rozdíl mezi oběma hodnotami je někdy tvořen i velmi složitou kombinací dílčích faktorů.

V dnešní době je vyhodnocování chyb měření prováděno prostřednictvím vyjádření nejistot měření. Chyby se vyjadřují v absolutních nebo relativních hodnotách. [40], [41], [46]

Rozdělení chyb podle jejich působení:

- systematické,
- náhodné,
- hrubé.

Rozdělení chyb podle svého zdroje:

- chyby přístroje,
- chyby metody,
- chyby pozorování,
- chyby vyhodnocení.

Chyby absolutní Δy

Vyjadřuje rozdíl mezi hodnotou naměřenou x_m a skutečnou x_s. Podělíme-li absolutní chybu skutečnou hodnotou, dostaneme poměrné vyjádření chyby, tj. chybu relativní δx. Platí tedy:

$$\Delta y = x_m - x_s \tag{27}$$

kde: x_m – změřená hodnota měřené veličiny

x_s – skutečná hodnota měřené veličiny

$$\delta_y = \frac{\Delta_y}{x_s} = \frac{x_m - x_s}{x_s} \tag{28}$$

Chyby systematické

U systematických chyb známe příčiny a na základě známých, většinou fyzikálních zákonitostí, umíme výsledky na tyto chyby korigovat. Příčinou může být nedodržení předepsaných podmínek měření (např. teploty atd.), vliv pomůcek a pomocných přípravků při měření (elektrické parametry přívodů, hmotnost misek a kelímků atd.), chyby paralaxy, vliv měřící síly atd.

Chyby, které jsou při stálých podmínkách stálé co do velikosti i znaménka a svým působením systematicky ovlivňují výsledek měření. Ke stanovení jejich velikosti postačí zpravidla vztah (9.1). Z hlediska uživatele měřicí techniky jsou systematické chyby sympatické tím, že je lze z velké části určit a jejich vliv je možné zmenšit, např. pomocí korekcí, kompenzací apod. Takto se zpravidla podaří odstranit podstatnou část jejich negativního vlivu na měření, ale zůstane ještě zbytek, který lze označit jako nevyloučené (nevylučitelné) systematické chyby. Právě toto je jedna z oblastí, kterou mnohem lépe postihuje nový koncept nejistot měření. [42], [43], [46]

Chyby náhodné

Náhodné chyby jsou chyby, u kterých není známa jejich příčina. Např. vůle v mechanismech, nestabilita napájení. Náhodné chyby působí zcela nahodile, jsou těžko předvídatelné a nelze je vyloučit. Při opakování měření se mění jejich velikost i znaménko, jak odpovídá předpokládanému zákonu rozdělení. Pro určení jejich velikosti se vychází z opakovaných měření s použitím statistických metod, odpovídajících patřičnému pravděpodobnostnímu modelu, reprezentovanému zákonem rozdělení příslušné náhodné chyby. V praxi velmi často jde o rozdělení normální – Gaussovo, které se používá ve většině aplikací. Výsledek měření, stanovený ze souboru opakovaných měření realizovaných za stejných podmínek, je reprezentován aritmetickým průměrem získaným při *n* opakováních z hodnot $y_1, y_2, \ldots y_i, \ldots y_n$, tj.:

$$\bar{y} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} y_i \tag{29}$$

Náhodnou chybu v klasické teorii chyb nejčastěji zastupuje směrodatná odchylka výběrového souboru *s*, méně často směrodatná odchylka aritmetického průměru s_x, získané ze vztahů (Obě směrodatné odchylky patřičným způsobem blíže charakterizují chování náhodných chyb). [42], [43]

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} \Delta^2{}_{yi^2}}{n=1}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}\left(y_i - \bar{y}\right)^2}{n-1}} \tag{30}$$

$$s_{\bar{y}} = \frac{s}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}\left(y_i - \bar{y}\right)^2}{n\cdot(n-1)}} \tag{31}$$

Chyby hrubé

Příčinou bývá nepozornost nebo indispozice obsluhy měřicího zařízení, závady na měřicím zařízení, špatné nastavení nebo kalibrace měřicího zařízení, hrubé nedodržení předepsaného postupu, nevhodně zvolená metoda atd. V případě výskytu hrubé chyby měření ihned přerušíme, odstraníme příčinu vzniku a měření opakujeme. Hrubé chyby jsou z předchozího pohledu zcela nevyzpytatelné. Měření zatížené hrubou chybou znehodnotí celý experiment, a proto naměřené hodnoty, které výrazně „vybočují z řady“, což bývá velmi často projevem tohoto druhu chyby, se vyloučí z dalšího zpracování. Omezit riziko jejich výskytu lze důsledným dodržováním příslušných měřicích postupů, podmínek měření a pozorností obsluhy. [42], [43], [46]

Výsledná chyba měření:

$$\Delta_x = e + \varepsilon \tag{32}$$

Odhad maximální hodnoty chyby měření:

$$\Delta_{y\max} = (\bar{y} - y_s) + 2s \tag{33}$$

kde:

$e = \bar{y} - y_s$ systematická složka

$\varepsilon = s$, popř. $\varepsilon = 2s$ náhodná složka

Součinitel rozšíření směrodatné odchylky souvisí s pravděpodobností pokrytí intervalu a typem rozdělení. Dvojka u Gaussova rozdělení přísluší často užívané 95% pravděpodobnosti. Přesnost přístroje je definována jako schopnost udávat za stanovených podmínek pravou hodnotu měřené veličiny. Pravou hodnotou měřené veličiny přitom rozumíme hodnotu, která charakterizuje veličinu dokonale definovanou za podmínek existujících v okamžiku jejího zjištění. Chyby přístrojů jsou způsobeny nedokonalostmi použitých měřicích prostředků, které mohou vznikat ve výrobě, montáži, popř. i opotřebením. Svou roli sehrává i změna charakteristik a parametrů přístroje v čase (stárnutí). [42], [43], [46]

Třída přesnosti T_p měřicího přístroje vyjadřuje maximální relativní chybu přístroje vztaženou na rozpětí přístroje.

$$T_p = \frac{\Delta y_{\max}}{y_{\max} - y_{\min}} \cdot 100 \tag{34}$$

kde:

Δy maximální přípustná chyba přístroje

$y_{\max} - y_{\min}$ měřící rozpětí přístroje

Další zdroje chyb

- Nevhodná instalace nebo uložení (ustavení) přístroje na pracovním místě, stole apod.
- Chyby metody.
  - Mají svůj původ v nedokonalosti, či zjednodušení použité měřicí metody.

- Chyby pozorování, nebo spíše pozorovatele.
    - Jsou do měření vnášeny jako chyby osobní, zapříčiněné buď nedokonalostí smyslů pozorovatele, nebo jeho nesoustředěností.
- Chyby, mající svůj původ ve vyhodnocení.
    - Jsou časté jako výpočtové, vznikající v důsledku aplikování přibližných vztahů, zjednodušení, ale také použitím linearizace, interpolace, extrapolace, zaokrouhlování, nedostatečným vyčíslením konstant apod. [42], [43], [46]

7.2 Nejistoty měření

Charakterizuje rozsah naměřených hodnot okolo výsledku měření, který lze zdůvodněně přiřadit k hodnotě měřené veličiny. Nejistota měření se týká nejen výsledku měření, ale i měřicích přístrojů, hodnot použitých konstant, korekcí apod., na kterých nejistota výsledku měření závisí. Základem určování nejistot měření je statistický přístup. Předpokládá se určité rozdělení pravděpodobnosti, které popisuje, jak se může udávaná hodnota odchylovat od skutečné hodnoty, resp. pravděpodobnost, s jakou se v intervalu daném nejistotou může nacházet skutečná hodnota.

Mírou nejistoty měření je směrodatná odchylka udávané veličiny. Takto vyjádřená nejistota se označuje jako standardní nejistota - *u* a představuje rozsah hodnot okolo naměřené hodnoty. Standardní nejistoty se dělí na standardní nejistoty typu A a typu B. Udávají se buď samostatně bez znaménka, nebo za hodnotou výsledku se znaménkem ±. [42], [43], [46]

Typy nejistot – přímé měření:

Nejčastější zdroje nejistot:

- Nedokonalá či neúplná definice měřené veličiny nebo její realizace.
- Nevhodný výběr přístroje (rozlišovací schopnost aj.).
- Nevhodný (nereprezentativní) výběr vzorků měření.
- Zjednodušení (zaokrouhlení) konstant a převzatých hodnot.
- Linearizace, aproximace, interpolace anebo extrapolace při vyhodnocení.
- Neznámé nebo nekompenzované vlivy prostředí.
- Nedodržení shodných podmínek při opakovaných měřeních.
- Subjektivní vlivy obsluhy.
- Nepřesnost etalonů a referenčních materiálů [42], [43], [46]

Standardní nejistoty typu A – u_A:

- Jsou způsobovány náhodnými chybami, jejichž příčiny se považují všeobecně za neznámé.
- Stanovují se z opakovaných měření stejné hodnoty měřené veličiny za stejných podmínek.
- Tyto nejistoty se stoupajícím počtem opakovaných měření se zmenšují.

$$u_a = s_{\bar{y}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}\left(y_i - \bar{y}\right)^2}{n \cdot (n-1)}} \tag{35}$$

Korigovaná nejistota (aplikace při méně než 10-ti měřeních):

$$u_{Ak} = k \cdot s_{\bar{y}} \tag{36}$$

k – koeficient závislý na počtu měření

Tab. 1 Počet měření s koeficientem

n	9	8	7	6	5	4	3	2
k	1,2	1,2	1,3	1,3	1,4	1,7	2,3	7,0

Výběrový průměr:

$$\bar{y} = \frac{\sum_{y=1}^{n} y_i}{n} \tag{37}$$

Výběrový rozptyl:

$$s^2(y_i) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}\left(y_i - \bar{y}\right)^2}{n \cdot (n-1)}} \tag{38}$$

Rozptyl výběrových průměrů:

$$s^2(\bar{y}) = \frac{s^2(y_i)}{n} \tag{39}$$

Standardní nejistoty typu B - u_B:

- Jsou způsobovány známými a odhadnutelnými příčinami vzniku.
- Jejich identifikaci a základní hodnocení provádí experimentátor.
- Jejich určování nebývá vždy jednoduché – u složitých měřicích zařízeních a při zvýšeném požadavku na přesnost, musí se provést podrobný rozbor chyb, což vyžaduje značné zkušenosti.
- Tyto nejistoty vycházejí z různých zdrojů a výsledná nejistota typu B je dána jejich sumací - přitom nezávisí na počtu opakovaných měření. [42], [43], [46]

$$u_B = \sqrt{\sum_{j=1}^{m} u_{zj}^{\ 2}} \tag{40}$$

u_z nejistota se skládá z:

- Vytipování zdrojů nejistot.
- Odhad odchylek ±Zmax od jmenovité hodnoty (překročení musí být málo pravděpodobné).
- Odhad, jakému rozdělení pravděpodobnosti odpovídají odchylky ΔZ v intervalu $\pm Z_{max}$.

$$u_Z = \Delta Z_{max} / m \tag{41}$$

m – koeficient závislý na druhu rozdělení (normální – 2; rovnoměrné – 1,73; trojúhelníkové – 2,45)

Kombinovaná standardní nejistota – u_C:

- Je sumací nejistot typu A a B.
- Hodnotí-li se výsledek měření touto nejistotou, není třeba rozlišovat nejistoty typu A a B.
- Kombinovaná standardní nejistota udává interval, ve kterém se s poměrně velkou pravděpodobností může vyskytovat skutečná hodnota měřené veličiny.
- V praxi se dává této nejistotě přednost. [42], [43]

$$u_C = \sqrt{(u_A^2 + u_B^2)} \tag{42}$$

Rozšířená standardní nejistota *U*:

- Zavádí se v případě, že je třeba zajistit ještě větší pravděpodobnost správného výsledku měření.
- Získá se tak, že se kombinovaná standardní nejistota u_C vynásobí součinitelem *ku* = 2. [42], [43], [46]

8 ZKOUŠENÍ PLECHŮ

Teoretická část dizertační práce je zaměřena na rozbor problematiky, která je řešena v experimentální části.

Vyvinutý zkušební přípravek, na kterém byla pomocí ohybu testována přilnavost a porušení povlaků, bez ošetření plazmovými tryskami a taktéž po ošetření plazmovými tryskami. V rámci experimentu je testována přilnavost (porušení) povlakované vrstvy v systému ocel – povlak – plazma a její různá kombinace.

Test přilnavosti a porušení povlaku:

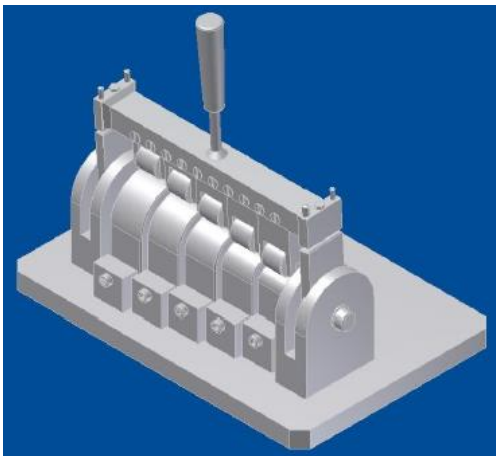
Na základě požadavku testování přilnavosti a porušení povlaku na povlaku (příp. základním materiálu) je v rámci řešení uvedené problematiky použitý a následně i testován odstupňovaný ohýbací přípravek na povlakované plechy.

Odstupňovaný ohýbací přípravek na povlakované plechy:

Stávající vyměnitelné odstupňované válcové trny jsou nahrazeny pevně ukotvenými válcovými segmenty o navržených průměrech:

- válcový segment – 1 : R=35 mm
- válcový segment – 2 : R=29 mm
- válcový segment – 3 : R=23 mm
- válcový segment – 4 : R=17 mm
- válcový segment – 5 : R=11 mm

Přes tyto segmenty jsou ohýbány o 180° jednotlivě všechny zkušební vzorky za pomocí otáčivých kladek viz. obr. 20 až do minimálního poloměru válcového segmentu, na kterém dojde k porušení povlaku.



Obr. 20 Model odstupňovaného ohýbacího přípravku s kladkami. [46]

Kladka simuluje ohyb, kdy nesmí dojít k poškození povlaku nebo napěchování povlaku z důvodu následného zkoumání míry porušení povlaku.

Ohnutý vzorek je při zřetelném poškození povlaku posuzován vizuálně. Přípravek je koncipován jako montážní jednotka. Kladky i segmenty jsou k ohybníku připevněny pomocí šroubů, jejich přestavení je tedy velmi snadné a v krátkém časovém intervalu.

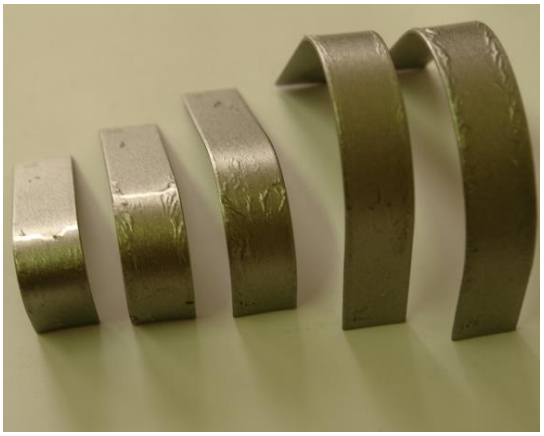
Test přilnavosti (porušení) povlaku:

Zkouška odolnosti povlaku je aplikována na odstupňovaném ohýbacím přípravku viz. obr. 35. Vzdálenost kladky od segmentu je nastavena pomocí listových měrek přesně podle tloušťky konkrétního ohýbaného plechu.

K ohybu jsou zvoleny vybrané vzorky č. 3, 18, 14, 28, 34 a 38. Z čtvercových vzorků jsou vždy nastříhány pásky o rozměru 90x10 mm. V kap. 11.5 jsou ohnuté testované pásky uříznuty na přesné pile a vybroušeny do jemné struktury a zalité do pryskyřice. Poté byly testované vzorky zkoumány pod mikroskopem.

8.1 Testy bez použití multitryskového plazmového systému

Při použití nového zkušebního zařízení k efektivnímu testování přilnavosti vybraného povlaku STEEL, aplikovaného za studena na povrchově upravený ocelový plech s Al bylo testování rozděleno do dvou etap. V první etapě bez použití multitryskového plazmového systému, kde bylo při testech přilnavosti zjištěno, že na základě provedených ohybových zkoušek ve zkušebním přípravku je přilnavost povlaku STEEL nevyhovující. Při tvarování ohybem do tvaru „U“ ve zkušebním přípravku docházelo v intervalu poloměrů zaoblení od R11 do R35 mm k porušení povlaku STEEL, viz obr. 21. [17]



Obr. 21 Fotografie poškozeného povlaku STEEL po ohybu bez aplikace plazmy. [17]

Povlak STEEL

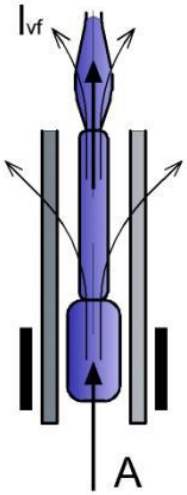
Povlak STEEL slouží pro další úpravu povrchu ocelí (tepelná odolnost až do 600°C, estetický efekt, zvýšení korozivzdornosti). Chemickým rozborem povlaku STEEL bylo zjištěno, že povlak obsahuje 13,6 hmotn.% Si, který zpevňuje povlak a přispívá ke zhoršení plastických vlastností při tvarování plechu. Dle sdělení dodavatele firmy Faren s.r.o. dále odolává např. kyselinám, solným výparům a je odolný proti atmosférickým a korozním jevům. Lze ho použít i pro úpravu svarů na antikorozních ocelích na místo tradičních postupů moření. [45]

8.2 Ošetření povrchu plazmovými tryskami

Na základní ocelový plech a jeho povlak je nutno pohlížet jako na systém. Při technologických operacích tváření dochází však u těchto dvojic k narušení společných vazeb. Narušení těchto vazeb může v některých případech vést až k narušení celistvosti povlaku a jeho

následné odlupování. Narušení vazeb mezi základním ocelovým materiálem a jeho povlakem můžou způsobovat vady, vyskytující se při plošném tváření (vlnitost povrchu plechu, tvarová deformace, lámavost, uvolňování kovu, nevhodná struktura povrchu) nebo špatná volba kombinace základní materiál vs. povlak. Snahou je tedy zachovat celistvost povlaku, tedy všech vazeb mezi povlakem a základním materiálem. Tohoto lze dosáhnout optimalizací tvářecích operací, tzn. optimalizací všech technologických parametrů a dále zlepšením technologií nanášení povlaku. [8], [46]

Obr. 22. Plazmo-chemické zařízení s dopravníkem. [47]



Obr. 23. Schéma plazmové tužky. [46]

Ve zjednodušení lze hovořit o novém způsobu vybuzení vysokotlakého elektrického výboje uvnitř duté elektrody a na jejím ústí – tzv. vysokotlaká dutá katoda, kterou protéká pracovní médium – nejčastěji argon, jež se v tomto výboji aktivuje. Plazma tryská z dutiny a z ústí plazmové trysky do vnějšího prostředí, kde působí na zkoumaný ocelový plech s povlakem. Specifické vlastnosti výboje jsou dány válcovou symetrií duté katody a rovněž specifickým chováním inertních plynů ve výboji. Vhodná konstrukce plazmové trysky do tvaru a velikosti tužky umožňuje snadnou manipulaci zařízením a tím přesně směřovat působení proudícího plazmatu o vysoké fyzikální a chemické reaktibilitě. Seskupení trysek do lineálních útvarů umožňuje v našem případě působit na povrch ocelového plechu s povlakem viz. obr. 22.

Výboj vysokotlaké duté katody s proudícím plazmatem ve variantě s dielektrickou kapilárou (plazmová tužka) je pro průmyslové aplikace generován na frekvenci 13,56 MHz z důvodu nejvyšší variability vlastností plazmatu pro technické aplikace. Na této frekvenci je možné použít fyzické oddělení plazmatu od elektrody, tedy bariérový typ výboje a současně je zde možné využít vazby plazmatu na elektrickou kapacitu okolí, tj. výboj buzený pouze jednou elektrodou – jednopólový výboj viz. obr. 23. Za základ trysky se používá dielektrická kapilára (nejčastěji křemenné sklo nebo korundová keramika), kterou protéká pracovní plyn – nejčastěji argon včetně přidaných příměsí. Intenzita elektrického pole elektrody obvykle nestačí na jeho samostatné zapálení, proto se výboj zapaluje předionizací prostředí plynu v dielektrické kapiláře trysky pomocí Teslova transformátoru.

Po jeho zapálení je výboj vysokotlaké duté katody primárně aktivně generován uvnitř dutiny elektrody, odkud je „vytažen“ proudem plynu a veden dielektrickou kapilárou směrem k ústí trysky. Odtud tryská do vnějšího prostředí, přičemž se kapacitně váže na elektrickou kapacitu kapiláry a vnějšího okolí. Výboj je po celou délku svého plazmového kanálku aktivně generován, viz jednopólový výboj na obr. 15. Vzhledem k relativně malému objemu plazmatu a dalším jeho vlastnostem se může pohybovat absorbovaný výkon v plazmovém kanálu v rozmezí 10^2-10^5 $W \cdot cm^{-3}$ dle zvolených pracovních podmínek. [46]

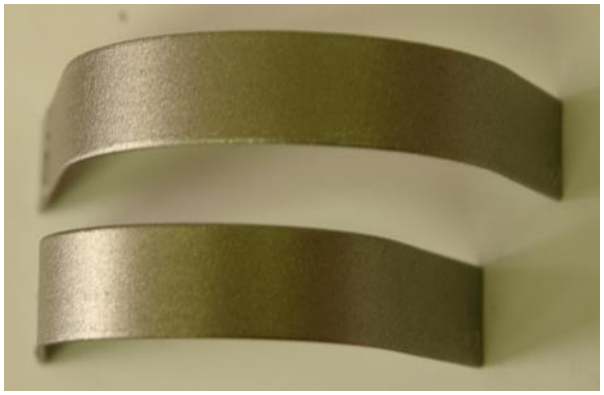
Použití multitryskového plazmového systému

Ovšem při použití multitryskového plazmového systému viz. obr. 24 o šířce 100 mm s devatenácti tryskami poskytující nízkoteplotní a neizometrický výboj za atmosférického tlaku byl následně nanesený povlak STEEL , který nevykazoval známky poškození po ohybu vzorku na odstupňovaném ohýbacím přípravku viz. obr. 25.

Obr. 24 Ukázka použitého multitryskového systému při experimentu.

U vzorků o tloušťce 1,5 mm, šířce 18 mm a délek v intervalu od 98 do 181 mm z nízkouhlíkové oceli dle DIN EN 327 s nanesenými povlaky *Al* tloušťky 25±5μm a STEEL

47±7µm bylo zjištěno, že po aplikaci a optimalizaci parametrů plazmatu za použití plazmového zařízení, bylo dosaženo funkčních povlaků na poloměrech válců R29 a R33 ve zkušebním odstupňovaném ohýbacím přípravku. U menších poloměrů zkušebních válců se vyskytly nepatrné defekty v povlaku STEEL. [17], [45]



Obr. 25 Fotografie funkčního povlaku STEEL po ohybu s aplikací plazmy. [17]

8.3 Seznam vzorků určených pro experimenty

Pro další experimenty byl použit nový odstupňovaný ohýbací přípravek viz. obr. 13 vyvinutý na Ústavu strojírenské technologie VUT v Brně.

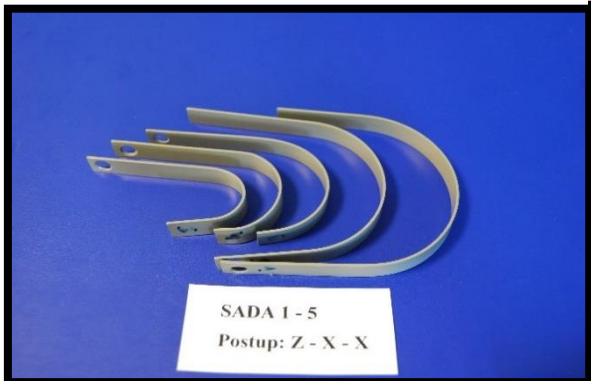
Nový odstupňovaný ohýbací přípravek svojí konstrukcí umožňuje testování povlakovaných plechů o větší tloušťce, než současné zkušební přípravky doporučené normou ČSN EN ISO 1519. [11], [12] Přípravek umožňuje současný ohyb pěti vzorků v intervalu hodnot úhlů do 180° pomocí kladek přes válcové segmenty. Lze tak zhotovit „U“ ohyby s vnitřním poloměrem R11, R17, R23, R29 a R35 mm. Válcové segmenty lze snadno vyměnit za jiný poloměr. Ohnutý vzorek je v případě zřetelného poškození povlaku posuzován vizuálně, a pokud nedojde k zjevnému poškození povlaku za použití všech segmentů a následuje bližší zkoumání funkčnosti povlaku na mikrotrhliny pod mikroskopem. Cílem experimentu bylo testovat kvalitu přilnavosti nátěru u vybraných ocelových vzorků.

Na odstupňovaném ohýbacím přípravku byly testované vzorky ohnuty na poloměrech R11, R17, R23, R29 a R35 mm. Testované vzorky jsou uvedeny v tab. 2. Ocelové pásky mají rozměr 90 x 10 mm.

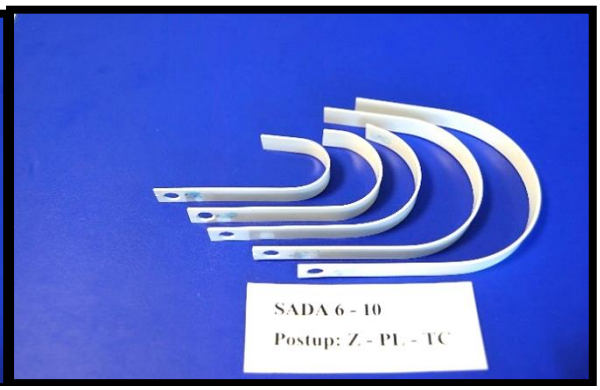
Ohnuté ocelové pásky

Vzorky ohnuté na odstupňovaném ohýbacím přípravku jsou na obrázcích 25÷32 kde je vidět ukázka ohnutých pásků plechu o rozměrech 90x10 mm, tloušťky 1 mm s povlakem, který je popsán u každého obrázku.

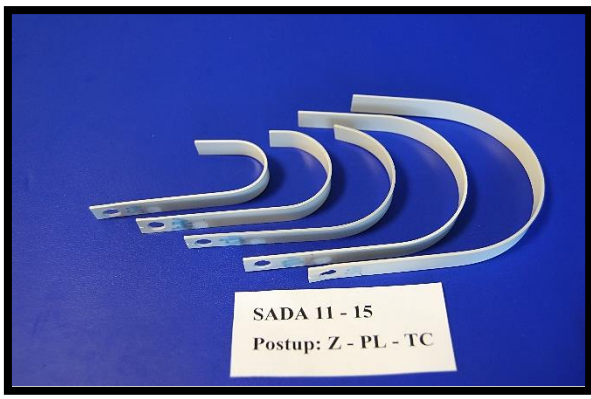
Poznámka k obrázkům 26 až 33:
BP – bez povlaku, Z – základ, TC – topcoat, PL – plazma, X – žádná úprava povrchu, bez dalšího povlaku, bez nanesení plazmy.



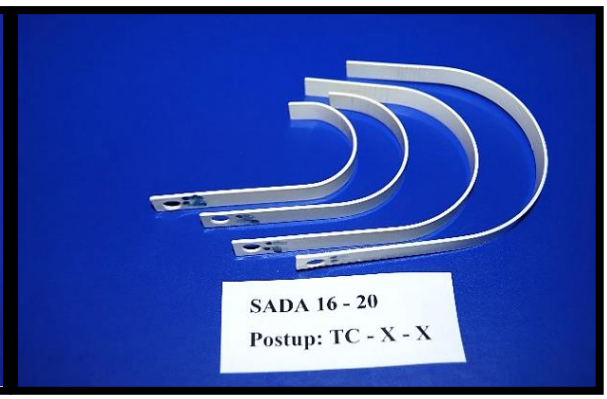
Obr. 26 SADA 1 - 5 Postup: Z - X – X



Obr. 27 SADA 6 - 10 Postup: Z - PL – TC

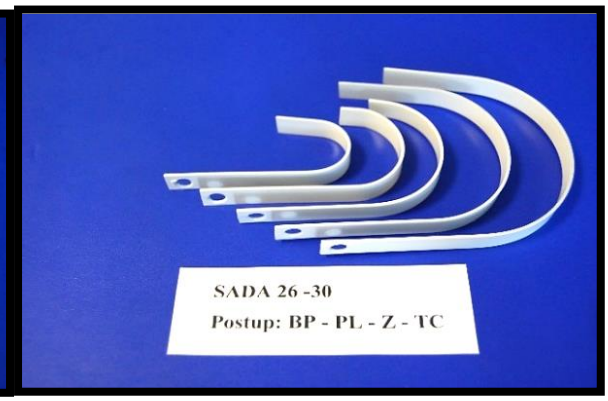


Obr. 28 SADA 11 - 15 Postup: Z - PL – TC

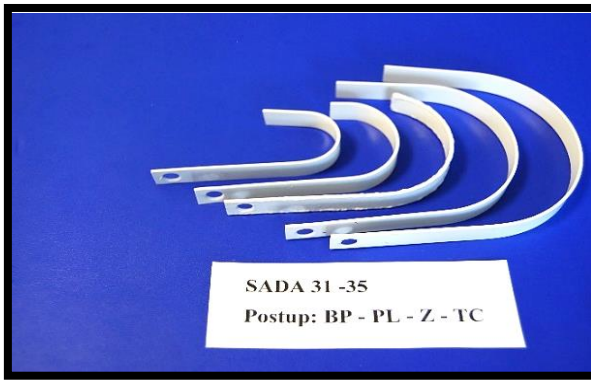


Obr. 29 SADA 16 - 20 Postup: TC - X – X

Obr. 30 SADA 21 - 25 Postup: TC - PL – X



Obr. 31 SADA 26 - 30 Postup: BP - PL - Z – TC



Obr. 32 SADA 31 - 35 Postup: BP - PL - Z – TC

Obr. 33 SADA 36 - 40 Postup: BP - X - X

Vybrané ocelové ohnuté pásky s odlišným postupem nanášením plazmy

Jednotlivé vzorky měly odlišný postup ošetření a lišily se použitým mediem. Čistý kovový povrch z laseru je okartáčovaný na speciálním stroji. Plech bez povlaku je surový materiál, ocel S235JRG2. Základní vrstva je nanesená pomocí kataforézního lakování (KTL). Topcoat je finální povlak, který je konečným povlakem na plechu a chrání karoserii před korozí a vnějšími vlivy. Před aplikací plazmatu, byly vzorky odmaštěny lihem. Ošetření povrchu plazmou probíhalo mezi vrstvami, podle tabulky 2.

Tab. 2 Vybrané testované vzorky s ošetřeným povrchem a použitým mediem

Vzorek	Ošetření povrchu	Použité médium
3	pouze základ	----
14	bez povlaku + základ+ plazma + topcoat	A_r+N_2
18	základ + topcoat	----
28	bez povlaku + plazma + základ + topcoat	A_r+O_2
34	bez povlaku + plazma + základ + topcoat	A_r+N_2
38	bez povlaku	----
8	bez povlaku + základ + plazma + topcoat	A_r+O_2
23	bez povlaku + základ + topcoat + plazma	A_r+O_2

8.4 Přehled vzorků pro multitryskový plazmový systém I a II.

Tab. 3 Opracování povrchu ocelových vzorků s různou povrchovou úpravou plazmovými tryskami I

ČÍSLO EXPER.	ČÍSLO VZORKU	VÝKON P / W	PRŮTOK					POSUV	POČET PŘEJEZDŮ
			Ar l/min	N_2 l/min	O_2 l/min	$Ar+H_2O$ l/min	CO_2 l/min	m/min	
1	A-30+35*	550	50	-	-	-	-	3	2x
	B-15+10*								
	C-25								
2	A-34+29*	600	50	0,2	-	-	-		
	B-14*+6								
	C-24								
3	A-33+28*	550	50	-	0,2	-	-		
	B-13*+8								
	C-23								
4	A-27*+32	600	40	-	-	13	-		
	B-12+7*								
	C-22								
5	A-31*+26	600	50	-	-	-	0,2		
	B-11*+6								
	C-21								

Poznámka:
A – čistý kovový povrch (laser, kartáč - odmaštění)
B – se základním lakem
C – se základním lakem + finálním lakem
A, B, C – před aplikací plazmatu odmaštěny lihem, ocelové pásky s rozměrem 90 x 10 mm
*- označení vzorků, které byly plazmatem ošetřeny pouze z jedné strany (se zářezem)
Rf – generátor (13,56 MHz), atmosférický tlak – volná atmosféra

Přehled vzorků pro multitryskový plazmový systém II.

Tab. 4 Opracování povrchu ocelových vzorků s různou povrchovou úpravou plazmovými tryskami II

ČÍSLO EXPER.	ČÍSLO VZORKU	VÝKON P / W	PRŮTOK					POSUV	POČET PŘEJEZDŮ
			Ar l/min	O_2 l/min	N_2 l/min	CO_2 l/min	Ar+H_2O l/min	m/min	
REF	Z 1-3, 20*	-	-	-	-	-	-	-	-
	BP 1-3, 20*								
	TC 1-3, 20*								
1	Z 4-6, 19*	550	50	-	-	-	-	3	2x
	BP 4-6, 19*								
	TC 4-6, 19*								
2	Z 7-9	600	50	0,2	-	-	-		
	BP 7-9								
	TC 7-9								
3	Z 10-12	550	50	-	0,2	-	-		
	BP 10-12								
	TC 10-12								
4	Z 13-15	600	40	-	-	0,2	-		
	BP 13-15								
	TC 13-15								
5	Z 16-18	600	50	-	-	-	13		
	BP 16-18								
	TC 16-18								

Poznámka:
Z – vzorek ocelového plechu (90 x 90 mm) se základním lakem
BP – vzorek ocelového plechu (90 x 90 mm) bez povlaku, s olejovou úpravou povrchu (konzervace)
TC - vzorek ocelového plechu (90x90 mm) se základním lakem + finálním lakem
*- označení vzorků, které byly před aplikací plazmatu odmaštěny lihem (čistý etanol)
Rf – generátor (13,56 MHz), atmosférický tlak – volná atmosféra

8.5 Vybrané vzorky pro tahovou zkoušku

Vybrané vzorky před tahovou zkouškou byly fotograficky zdokumentovány. Vzorky byly uříznuty na přesné pile ze čtvercového rozměru 90 x 90 mm na rozměr 90 x 10 mm. Rozměr 90 x 10 mm byl zvolen z toho důvodu, aby bylo možno udělat co nejvíce pokusů na trhacím zařízení. Na vzorky byly navařeny plechy elektrickým obloukem v ochranné atmosféře CO_2 viz. obr. 34, aby mohly být upnuty do čelistí na trhacím zařízení. Popis jednotlivých vzorků a postup nanášení povlaku a plazmy je v tab. 8.

Obr. 34 Přehled vzorků, které byly podrobeny tahovým testem.

8.6 Vybrané vzorky pro vyhodnocení změny tloušťky a deformací

Postup nanášení povlaku u těchto vzorků byl v pořadí viz. tab. 5. Byla zvolena velká různorodost a kombinace jak použitých plynů tak i postup nanášení povlaků. Vyhodnocení změny tloušťky a deformací na vybraných vzorcích jsou v kapitole 10.6.

Tab. 5 Vybrané vzorky pro změny tloušťky a deformací

Vzorek	Ošetření povrchu	Použité médium
TC12	bez povlaku + základ + topcoat + plazma	A_r+N_2
Z7	bez povlaku + základ+ plazma + topcoat	A_r+O_2
BP15	bez povlaku + plazma + základ	A_r+CO_2
BP16	bez povlaku + plazma + základ	A_r+H_2O
$Z5_1$	bez povlaku + základ+ plazma + topcoat	A_r
Z12	bez povlaku + základ+ plazma + topcoat	A_r+N_2

8.7 Testy na odstupňovaném ohýbacím přípravku

Při experimentech s novým testovacím zařízením se ukázalo, že při poloměrech ohybu intervalu od R11 do R35 dochází k oddělení naneseného povlaku STEEL od původního povlaku Al, který byl součástí zkušebního ocelového plechu tloušťky 1,5 mm. V další etapě řešení byl vyvinut technologický postup, který umožnil zvýšení přilnavosti povlaku STEEL při jeho ohýbání až o 180° (tvar „U“). Experimenty se uskutečnily ve spolupráci s MU Brno.

Ke zkoušení ocelového plechu s povlakem Al a STEEL podle DIN EN 327/EN 101143 s mezí pevnosti v tahu R_m = 307 MPa, smluvní mezi kluzu $R_{p0,2}$ =154 MPa , tažnosti A_{80} = 43 % a tloušťky 1,5 mm byl použit nový odstupňovaný ohýbací přípravek viz. obr. 35.

Nový odstupňovaný ohýbací přípravek svojí konstrukcí umožňuje testování povlakovaných plechů o větší tloušťce, než současné zkušební přípravky doporučené normou ČSN EN ISO 1519. Přípravek umožňuje současný ohyb pěti vzorků v intervalu hodnot úhlů do 180° pomocí kladek přes válcové segmenty. Lze tak zhotovit „U“ ohyby s vnitřním poloměrem R11, R17, R23, R29 a R35 mm. Válcové segmenty lze snadno vyměnit za jiný poloměr. Ohnutý vzorek je při zřetelném poškození povlaku posuzován vizuálně, pokud nedojde k zjevnému poškození povlaku ani na nejmenším průměru, pak dochází ke zkoumání povlaku na mikrotrhliny pod optickým mikroskopem.

Obr. 35 Fotografie odstupňovaného ohýbací přípravku s kladkami. [17]

Kladka simuluje ohyb, kdy nesmí dojít k poškození povlaku nebo napěchování povlaku z důvodu následného zkoumání míry porušení povlaku.

V průmyslové výrobě dochází k tažení povrchově upravených plechů. Z tohoto důvodu byly k ohýbacímu přípravku vyrobeny i segmenty. Tyto segmenty jsou použity v případě simulace tažení povlaku (povlak namáhán tahem v přímém úseku) na zkušebních vzorcích. Zkouška tažení se realizuje na tenkých páscích plechu s povrchovou úpravou. Po tažení pásku pomocí segmentu je posuzována míra poškození povlaku.

Přípravek je koncipován jako montážní jednotka. Kladky i segmenty jsou k ohybníku připevněny pomocí šroubů, jejich přestavba je tedy velmi snadná a rychlá. [17]

8.8 Cíle experimentu

Cílem experimentu bylo optimalizování složení plazmatu pro konkrétní nátěry na plech, aby po ovlivnění povrchu vzorků před nátěrem resp. více nátěrů, byla maximální přilnavost nátěru k ocelovému základu. Experimenty byly provedeny na zařízení jednak na VUT v Brně a taktéž v kooperaci.

Na Ústavu strojírenské technologie, VUT-FSI v Brně byla provedena ohybová zkouška na odstupňovaném ohýbacím přípravku, který svojí konstrukcí umožňuje testování povrchově upravených plechů o větší tloušťce, než současné zkušební přípravky doporučené normou. [11], [12] Byl využíván pro experimenty ohýbání vzorků s nátěrem. Ohnutý vzorek ve zkušebním přípravku byl v případě poškození povlaku posuzován vizuálně, a pokud nedošlo k zjevnému

poškození povlaku, následovalo bližší zkoumání funkčnosti povlaku na mikrotrhliny pod mikroskopem. V rámci experimentů byl použitý multitryskový plazmový systém. [16], [17], [44], [45], [47], [49], [50], [51]

Výsledkem aplikace použitého multitryskového systému na zkušební vzorky s nátěrem při optimálních nastavených parametrech plazmatu proudícího z devatenácti trysek, jsou funkční vzorky po ohybu. Vybrané vzorky byly opatřeny vrchním lakem (TOP COAT) se základem, nebo pouze základ (KTL) a další vzorky byly bez povlaku. Na vybraných vzorcích byla provedena zkouška hloubením podle Erichsena.

9 CÍLE PRÁCE

9.1 Úvod

Problematika tvařitelnosti povlakovaných plechů je poměrně komplexní. V rámci práce se nepředpokládá, že by byla vyřešena do všech důsledků. Práce si klade za cíl ověření, zda problematika tvařitelnosti povlakovaných plechů má vliv na mechanické vlastnosti materiálu, provést hodnocení tvařitelnosti plechů pomocí technologických zkoušek, vytipování složení plazmatu pro konkrétní navržené povlaky.

9.2 Hlavní cíle dizertační práce

Hlavní cíle dizertační práce je možné charakterizovat následujícími body:

a) Návrh metody použití multitryskového plazmového systému na zkušební vzorky s povlakem.

b) Testování povrchově upravených plechů (vzorků) s nátěrem na novém odstupňovaném ohýbacím přípravku na Ústavu strojírenské technologie, odbor technologie tváření pro vybrané poloměry ohybu za účelem porovnání přilnavosti povlaku.

c) Porovnání výsledků vzorků s použitím metody multitryskového plazmového systému na vybraných vzorcích TOP COAT+KTL, KTL, bez povlaku, společně s Erichsenovou zkouškou a pomocí Tarnogrodského přístroje pro úhly v intervalu (0º, 180º)

d) Optimalizování složení plazmatu pro konkrétní navržené povlaky na ocelový plech S235JRG2, tloušťka 1mm, aby po ovlivnění povrchu vzorku před nanesením povlaku, resp. více povlaků, byla maximální přilnavost povlaku k ocelovému základu.

e) Výsledkem aplikace použitého multitryskového plazmového systému na zkušební vzorky při optimálních nastavených parametrech plazmatu budou funkční vzorky po ohybu s přesně definovaným poloměrem ohybu a úhlem ohybu.

10 EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ A VYHODNOCENÍ VZORKŮ

10.1 Popis experimentu

Práce je zaměřena na kvalitu povrchově upravených ocelových plechů s nátěrem na testování ohybem a tažením. V rámci experimentů je použitý multitryskový plazmový systém, u něhož fyzikální podstata jevu spočívá v generování plazmatu za atmosférického tlaku.
Výsledkem aplikace použitého multitryskového systému na zkušební vzorky s nátěrem při optimálních nastavených parametrech plazmatu proudícího z devatenácti trysek, jsou funkční vzorky s nepoškozeným povlakem po ohybu.

Zkoumané vzorky byly opatřeny vrchním lakem (topcoat) a základním povlakem. Další skupina byla pouze se základním lakem. Ostatní zkoušené vzorky jsou bez povlaku.
Vzorky s povlaky byly podrobeny zkoušce hloubením podle Erichsena. Pro konkrétní nátěry na plech bylo optimalizováno složení plazmatu tak, aby výsledkem byla maximální přilnavost nátěru k ocelovému základu vzorků. Experimenty byly provedeny v Ústavu strojírenské technologie VUT v Brně a taktéž v kooperaci s MU Brno na odstupňovaném ohýbacím přípravku na obr. 35, který svojí konstrukcí umožňuje testování povrchově upravených plechů. Pokusy byly prováděny na multitryskovém plazmovém systému o šířce 100 mm s devatenácti tryskami poskytující nízkoteplotní a neizometrický výboj za atmosférického tlaku.

Dodané plechy s potvrzeným atestem a chemickým složením byly předem odmaštěny a následně okartáčované speciálním odjehlovacím strojem.

Základní vrstva (KTL), u níž se teplota pohybuje v rozmezí 160 až 180 °C se nanášela elektroforézním způsobem. Tloušťka základního povlaku se u vzorku pohybovala v intervalu od 15 a 30 µm.

Jedná se nelegovanou jakostní ocel s označením materiálu 1.0035, podle ČSN 41 0004 označení 10 004. Mechanické vlastnosti jsou: mez pevnosti v tahu R_m = 310 ÷ 540 MPa, mez kluzu R_{eH} = 185 MPa, tažnost A = 11%. [19]

10.2 Postup nanášení povlaků a multitryskového plazmového systému

Na dalších experimentech, které se uskutečnili, byly vzorky rozděleny do následujících skupiny, viz. tab. 6. Z tab. 4 byly vzorky 1-3 referenční, neodmaštěné. Platí pro vzorky BP, Z, TC. Tyto vzorky nebyly ošetřeny multitryskovým plazmovým systémem.
U dalších vzorků 4 až 19 byly vzorky projety multitryskovým plazmovým systémem a jako výchozí plyny byl zvoleny média: argon, kyslík, dusík, oxid uhličitý, argon+voda.
Jak je vidět z tabulky č. 3 a č. 4, u těchto vzorků byl měněn výkon. Konstantní byl průtok s hodnotou 0,2 $l \cdot min^{-1}$, posuv 2 $m \cdot min^{-1}$ a počtem pojezdů 2.

Tab. 6 POSTUP NANÁŠENÍ POVLAKŮ A MULTITRYSKOVÉHO PLAZMOVÉHO SYSTÉMU
BP – bez povlaku, PL – plazma, Z – základ, TC – topcoat

SADA	26-30	31-35	36-40	1-5	6-10	11-15	21-25	16-20
JEDNOTLIVÉ SADY VZORKŮ PRO MULTITRYSKOVÝ PLAZMOVÝ SYSTÉM	BP	BP	BP	Z	Z	Z	TC	TC
	PL	PL	x	x	PL	PL	PL	x
	Z	Z	x	x	TC	TC	x	x

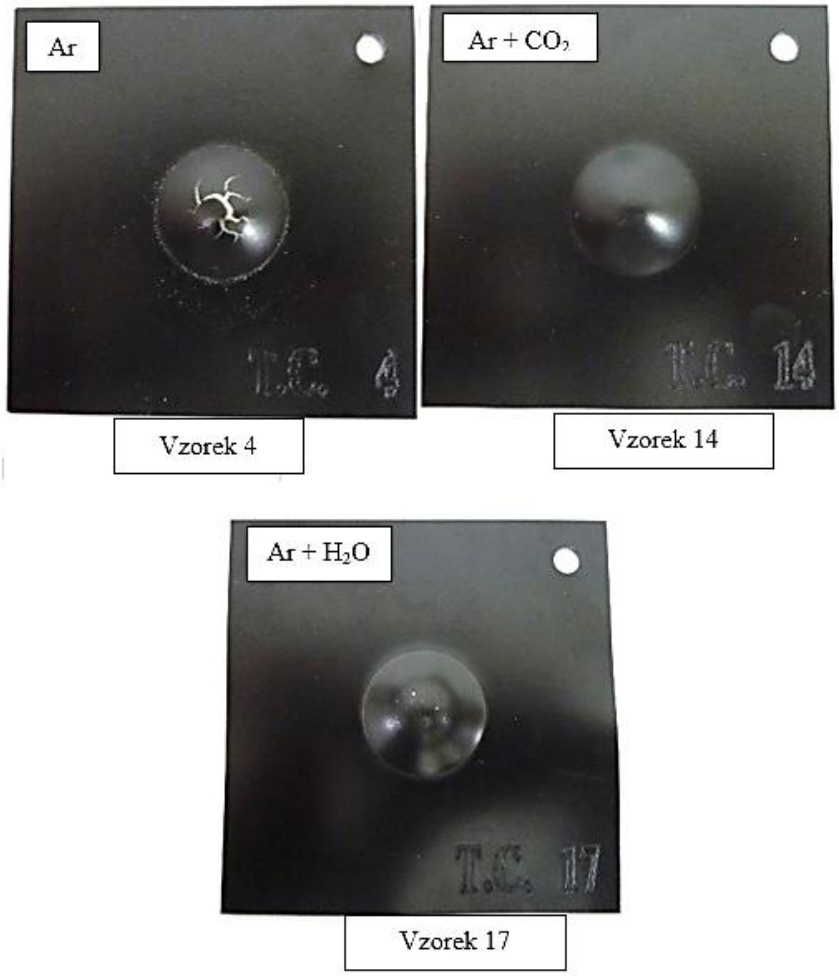
Na obr. 36 je ukázka vzorku po zkoušce hloubením podle Erichsena. Zkouška byla provedena na vzorku, který je v tabulce označen Z_1 jako vzorek ocelového plechu (90 x 90 mm) se základním povlakem (KTL).

Obr. 36 Vzorek ocelového plechu (90 x 90 mm) se základním povlakem (KTL).

Při hodnotě IE 6,85 mm měl povlak průchozí trhliny, jak je vidět z přiložené fotografie. (obr. 36) Tento vzorek je považován pouze jako referenční bez další úpravy, to je odmaštění a aplikace plazmy pomocí multitryskového systému.

10.3 Erichsenova zkouška hlubokotažnosti

Podle tab. č. 4. byly vyhodnocena hlubokotažnost dle Erichsena u plechů *č. 4, 14 a 17*. viz. obr. 37.



Obr. 37 Vzorky ocelového plechu (90x90x1 mm).

U vzorků na obr. 37 byl multitryskový plazmový systém použit v následujícím pořadí. Na výchozí stav plechu byl nanesen základní nátěr, následně chemicky ošetřen multitryskovým plazmovým systémem a finálně nanesen topcoat (vrchní povlak). Na vzorku 4, kde byl použitý argon, bylo poškození povlaku pod hranicí IE 4 mm.
Vzorek 14 s médiem Ar+CO_2 se choval o něco lépe. Náznak poškození se projevoval u hodnoty IE 3,7 mm, kde byly pouhým okem viditelné trhliny na vnějším povlaku.
Vzorek 17 s médiem Ar+H_2O byl vyhodnocen jako nejlepší vzorek z této série zkoušek podle Erichsena. Hodnota poškození byla až při IE 7,5 mm. Další experimenty byly provedeny na vzorcích uvedených v tabulce 7.

Tab. 7 Naměřené hodnoty IE podle Erichsena. Rozměry vzorků 90x90x1 mm

Označení vzorku	BP4	BP5	BP6	Z1	Z2	Z3	TC1	TC2	TC3
Hloubení IE [mm]	9,75	4	6	6,85	4	7,1	2,89	3,27	11,6
FUNKČNÍ	OK	OK	OK	OK	OK	OK			OK
NEFUNKČNÍ							N. OK	N. OK	

Vzorky označené Z1, Z2, Z3, TC1, TC2, TC3 nebyly odmaštěny a nebyly ošetřeny plazmou. U vzorků BP4, BP5, BP6 byl test proveden následovně:
Na ocelový základ (BP) byla použit multitryskový plazmový systém a následně nanesena základní barva (KTL). U vzorku BP5 byla hodnota IE zastavena na hodnotě hloubení 4 mm. Vzorek byl bez zjevného poškození základního povlaku. U vzorku BP6 jsme hodnotu IE zastavily na hodnotě hloubení 6 mm. Vzorek byl taktéž bez poškození základního povlaku.
V tab. 7 nejsou uvedeny vzorky Z20, TC20. Tyto vzorky byly odmaštěny, bez ošetření plazmy. (Z20 - poškození u hodnoty IE 7,5 mm. TC20 - poškození na hodnotě IE 8,5 mm).

10.4 Tahová zkouška

Výsledků této zkoušky lze použít při konstrukčních návrzích apod. Jedná se o statickou zkoušku (pomalu vzrůstající zátěžná síla, nebo konstantní síla). Zkoušený materiál je upraven do vzorku, jehož parametry stanoví ČSN EN 10002. Vzorek se zkouší na trhacím zařízení, dle potřeby, často až do roztržení (trvalá plastická deformace). Stroj během zkoušení zaznamenává a vyhodnocuje celou řadu veličin. Výsledkem je tahový diagram, závislost zatěžovacího napětí na prodloužení vzorku.

10.4.1 Popis experimentu a jeho průběh

Tento test je zaměřen na studium vlivu definovaných hodnot deformace v tahu ε_t a účinku nízkoteplotního plazmatu na přilnavost zvoleného povlaku na ocelových vzorcích s využitím tahové zkoušky plochých zkušebních tyčí. Vzorky byly vyrobeny technologií obráběním a svařováním. [13], [18] Ploché zkušební tyče byly testovány tahem na zkušebním zařízení typu UPC 1200. Část vzorků na povrchu byla ošetřena před tahovou zkouškou nanesením povlaku jednak základním povlakem, tak i s finálním povlakem průběžně multitryskovým plazmovým systémem. Na vybraných zkušebních vzorcích byly zjištěny z tahové zkoušky materiálové charakteristiky, jako jsou např. mez kluzu $R_{p0,2}$, mez pevnosti v tahu R_m, tažnosti A_{50}, zřejmé z tahových diagramů.
Předložené grafy znázorňují závislost síly na prodloužení vzorku dle DIN EN ISO 6892-2. Vzorky byly dále zkoumány pod stereo mikroskopem značky SCHUT, typ SSM-E v laboratoři na Ústavu strojírenské technologie VUT v Brně k chování povlaku na ocelovém plechu v okamžiku přetržení průřezu vzorků.
Dodané plechy s potvrzeným atestem a chemickým složením, byly předem odmaštěny a následně okartáčované speciálním odjehlovacím strojem. Označení materiálu je 1.0322 (DX56D). Jedná se nelegovanou jakostní hlubokotažnou ocel, tloušťky 1 mm.
Základní vrstva, u níž se teplota pohybuje v rozmezí 160 - 180 °C se nanášela elektroforézním způsobem. Tloušťka základního povlaku se u vzorku pohybuje v intervalu od 15 a 30 µm.
Před vlastním experimentem byly roztříděny do čtyř skupin s odlišným způsobem složení plazmatu, viz. tab. 8.

Tabulka 8 Vybrané vzorky s ošetřením plazmy a odlišným nanášením plazmy

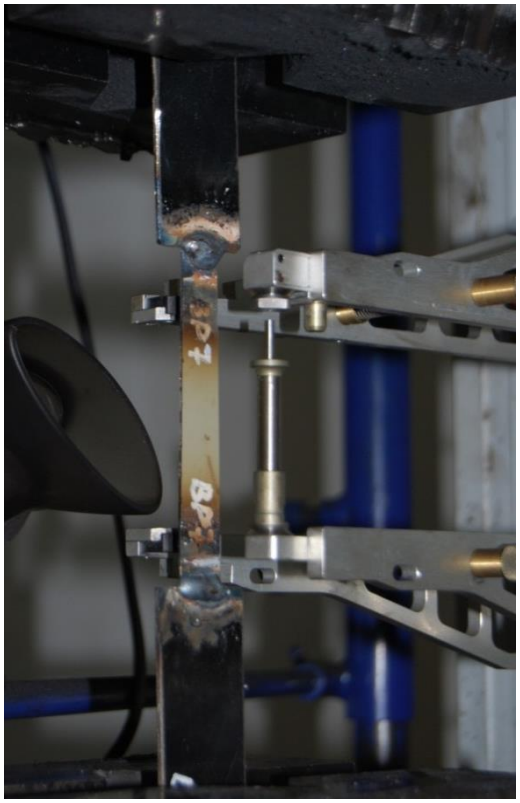
Vzorky s ošetřením plazmy		
BP11	A_r+N_2	(BP+PL+Z)
BP16	A_r+H_2O	(BP+PL+Z)
BP7	A_r+O_2	(BP+PL+Z)
TC6	A_r	(TC+PL)
TC9	A_r+O_2	(TC+PL)
Z12	A_r+N_2	(Z+PL+TC)

Cílem experimentu bylo podrobení vybraných zkušebních vzorků s navrženými rozměry 90 x 10 x 1 mm, tahovou zkouškou. Detailní pohled na upnutý vzorek v upínacích čelistech zařízení je na obr. 38. Tahová zkouška vzorků byla provedena na zařízení UPC 1200.

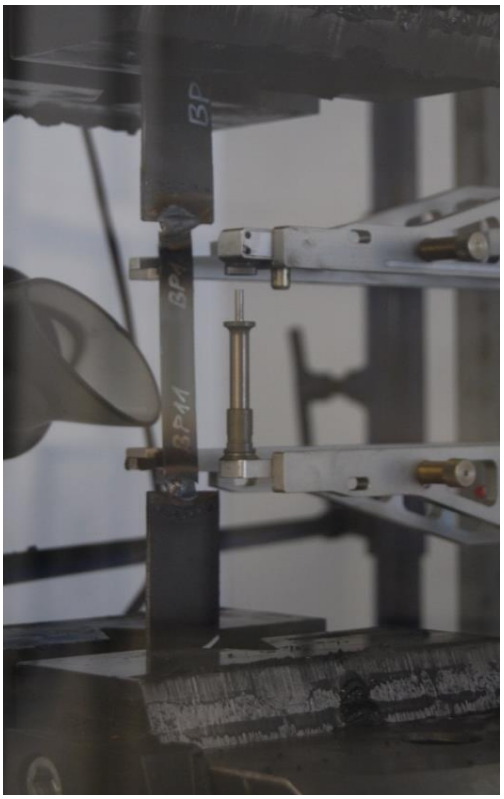
Obr. 38 Detailní pohled na upnutý vzorek v upínacích čelistech zařízení.

Vzorky byly technologicky připraveny s využitím technologie svařováním s podporou CO_2 aby mohli být vzorky upnuty do speciálních upínacích čelistech, které byly součástí trhacího stroje. Vybrané vzorky před tahovou zkouškou byly fotograficky zdokumentovány, viz. obr. 34.

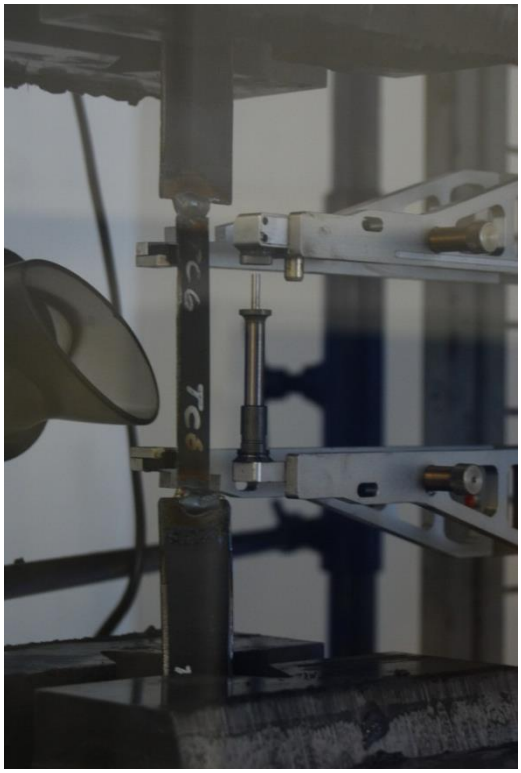
Vzorky testované na tahovém zařízení



Obr. 39 Vzorek BP7

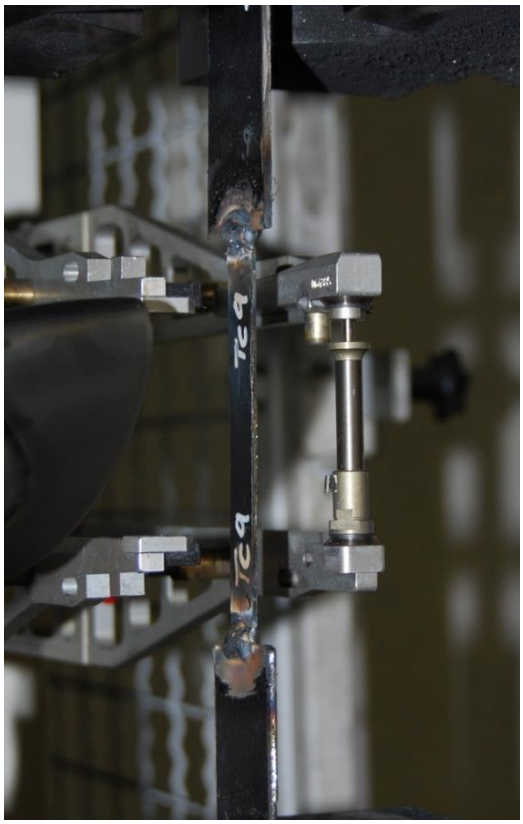


Obr. 40 Vzorek BP11

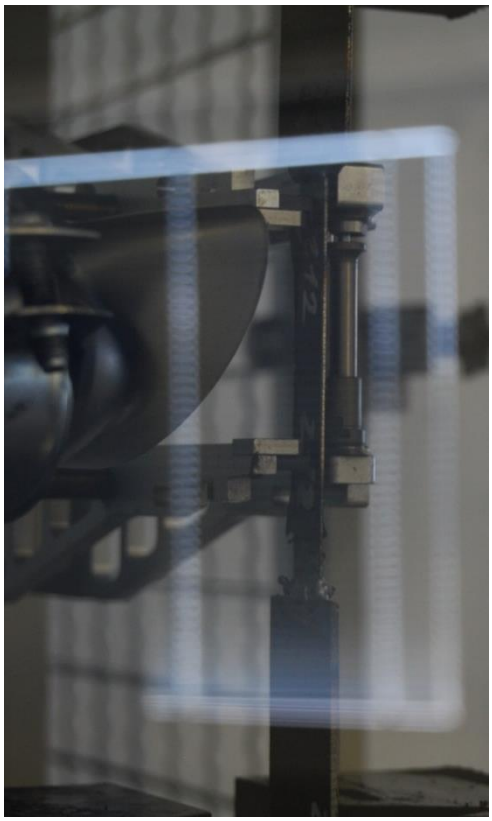


Obr. 41 Vzorek TC6

Obr. 42 Vzorek BP16



Obr. 43 Vzorek TC9

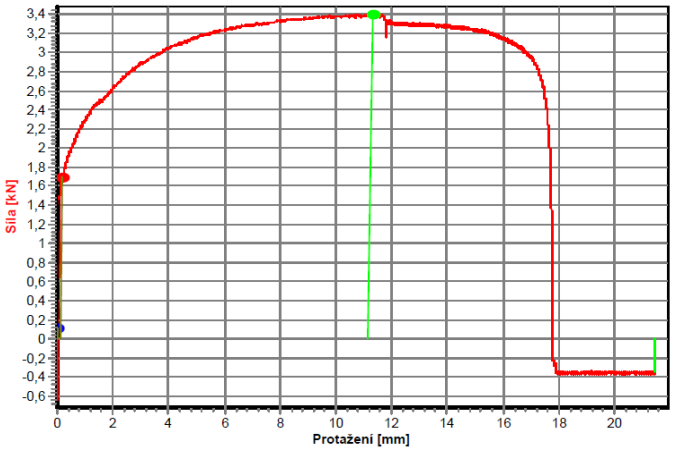


Obr. 44 Vzorek Z12

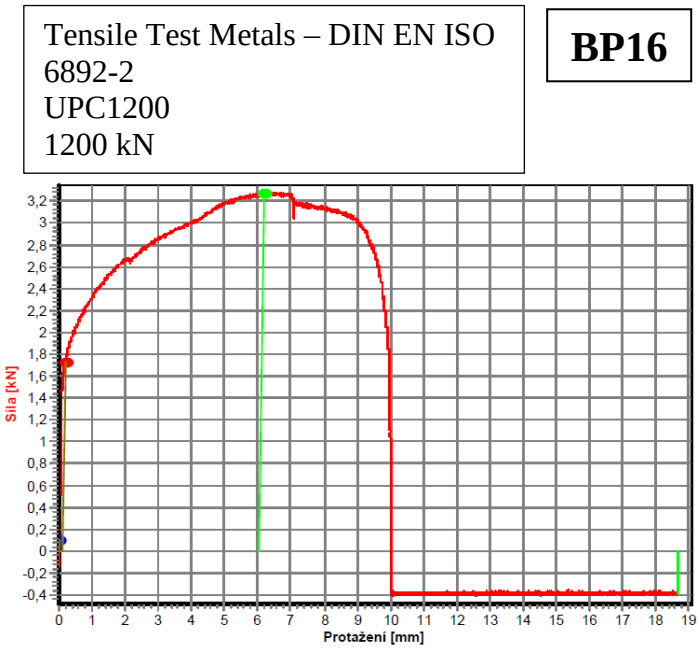
10.4.2 Záznamy z tahové zkoušky

Tensile Test Metals – DIN EN ISO 6892-2
UPC1200
1200 kN

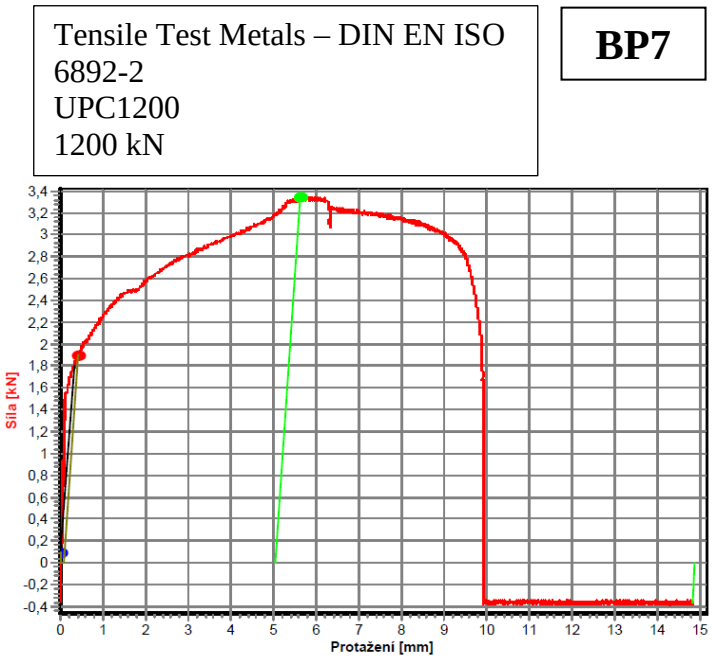
BP11



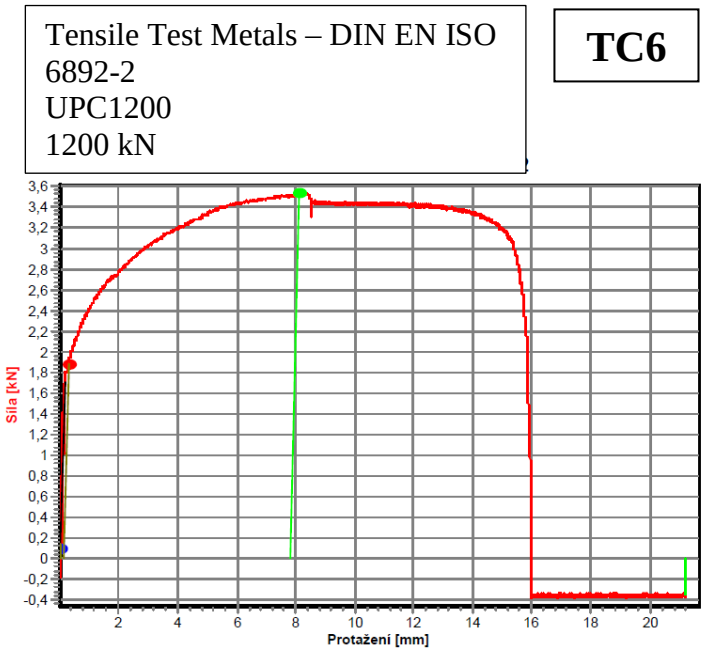
Obr. 45 Průběh síly v závislosti na protažení a hodnoty z tahové zkoušky, vzorek BP11



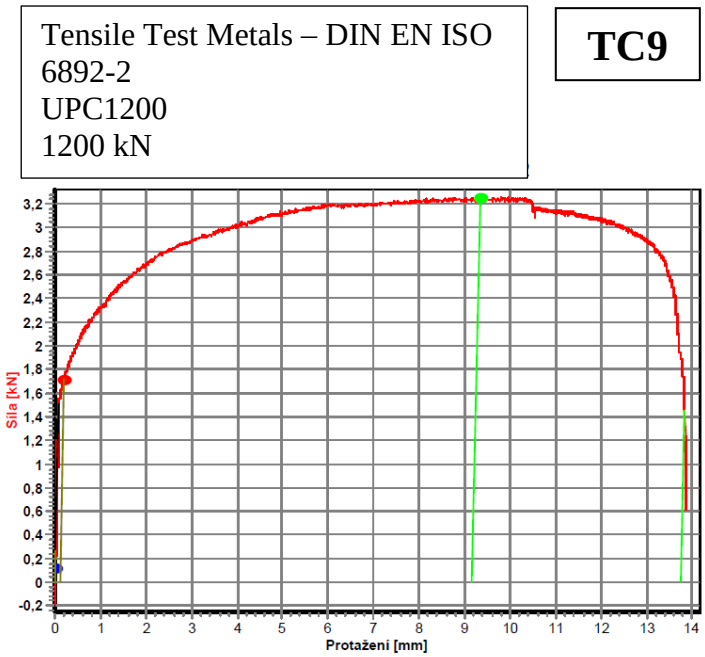
Obr. 46 Průběh síly v závislosti na protažení a hodnoty z tahové zkoušky, vzorek BP16



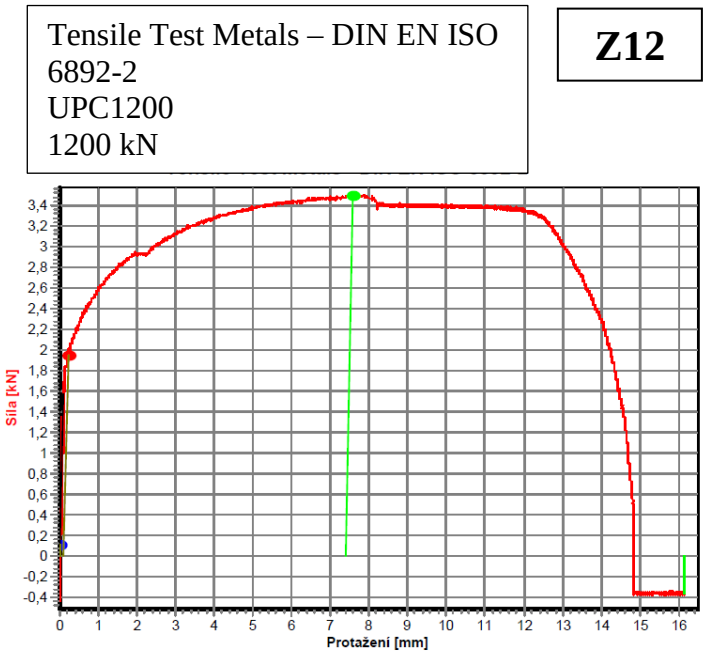
Obr. 47 Průběh síly v závislosti na protažení a hodnoty z tahové zkoušky, vzorek BP7



Obr. 48 Průběh síly v závislosti na protažení a hodnoty z tahové zkoušky, vzorek TC6



Obr. 49 Průběh síly v závislosti na protažení a hodnoty z tahové zkoušky, vzorek TC9



Obr. 50 Průběh síly v závislosti na protažení a hodnoty z tahové zkoušky, vzorek Z12

10.4.3 Výsledky z tahové zkoušky

Z tahové zkoušky byly následně zpracovány výsledky experimentálních prací tahovou zkouškou v podobě tabelárních a grafických výstupů, viz. tab. 9 naměřených hodnot a viz. obr. 45 až 50.

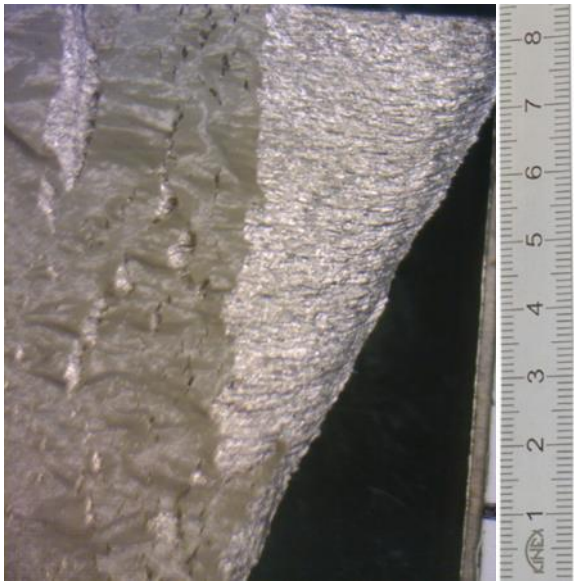
Tabulka 9 Naměřené hodnoty pro vybrané vzorky po tahové zkoušce

Číslo vzorku	a [mm]	b [mm]	E [MPa]	R_p [MPa]	R_m [MPa]	A_{50} [%]	Z [%]	t [s]	s [mm]	F [kN]	dL [mm]	R_{m1} [MPa]
BP11	13,10	1,00	68,52	129,71	259,00	42,18	43,01	31,44	17,11	3,27	14,66	249,71
BP16	12,70	1,00	74,80	135,87	258,00	37,70	34,19	35,91	17,21	1,49	10,35	117,45
BP7	13,20	1,00	22,02	143,91	253,00	29,44	39,20	37,23	19,12	2,74	10,15	207,82
TC6	13,80	1,00	38,38	136,70	256,00	42,04	44,18	20,05	11,96	3,45	9,26	249,65
TC9	12,38	1,00	68,91	138,32	263,00	27,37	42,48	18,21	9,74	3,19	7,28	257,74
Z12	13,20	1,00	64,51	147,45	265,00	32,23	43,00	18,09	7,72	3,42	5,76	259,00

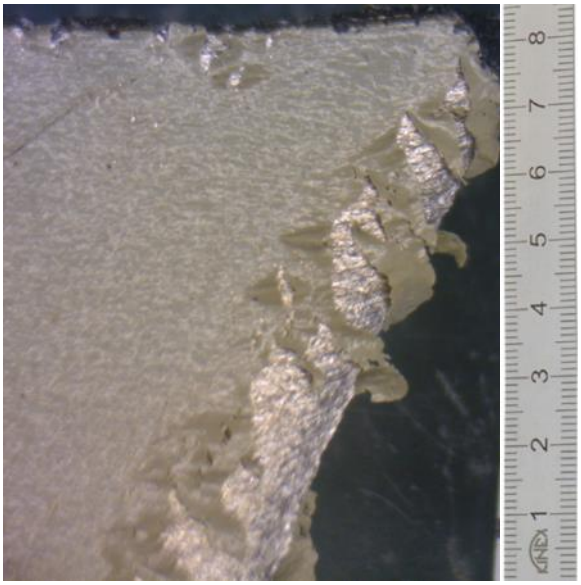
Testované vzorky, viz. obr. 34, dané šířky a [mm] a tloušťky b [mm] byly podrobeny tahovou zkouškou. Rozměry byly změřeny posuvným měřítkem. Uvedené výsledky jsou uvedeny v tabulce 9. Nejvíce proměnlivé jsou výsledky u Youngova modulu E. Čím je toto velké rozpětí dáno, nebylo zjištěno a ani nebylo předmětem tohoto experimentu. Hodnoty smluvního meze kluzu R_p a meze pevnosti R_m odpovídaly danému materiálu 1.0322 (DX56D). Stejně jako tažnost A_{50} a kontrakce Z.
Zajímavé bylo pozorovat čas do přetržení vzorku t [s], který se také výrazně lišil od různého způsobu nanášení plazmy. [47], [49] Taktéž tahová síla při porušení vzorku *F* byla u všech vzorků velmi podobná až na výjimku u vzorku BP16, kde byla výrazně nižší a rovněž napětí pro vznik oddělených částí vzorku R_{m1} bylo u vzorku BP16 odlišné a výrazně nižší. Dráha *s* a prodloužení dL byly vyhodnoceny počítačovým programem na zařízení UPC 1200.

10.4.4 Vzorky z tahové zkoušky pod mikroskopem

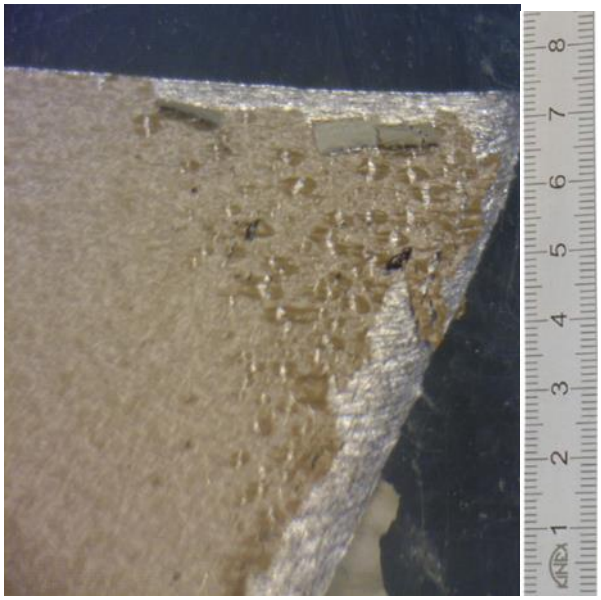
Vzorky BP11, BP16, BP7, TC6, TC9, Z12 byly prozkoumány pod stereomikroskopem pod zvětšením 10 x. Uvedené měřítko u obrázků 51 až 56 je v mm. Snímky byly pořízeny hned po přetržení na trhacím stroji, v místě, kde se plech odtrhl.



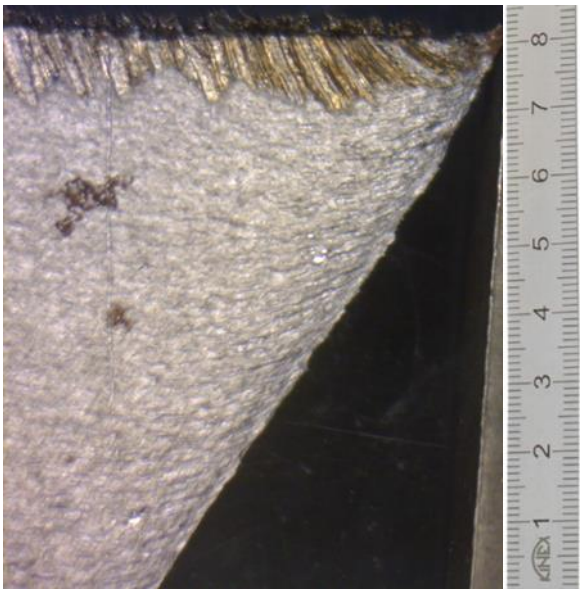
Obr. 51 Vzorek BP11



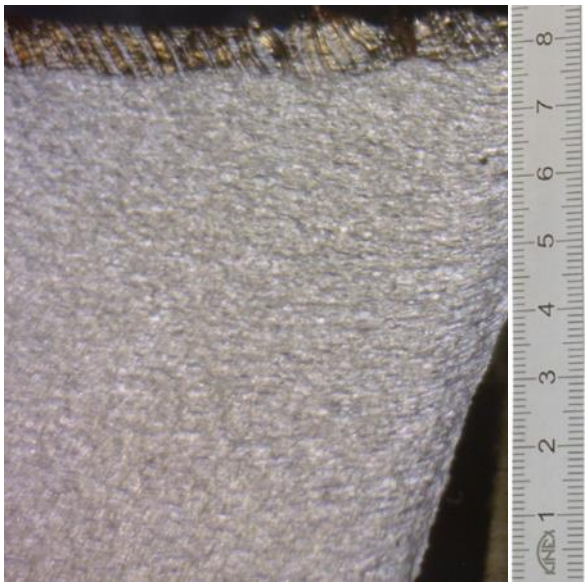
Obr. 52 Vzorek BP16



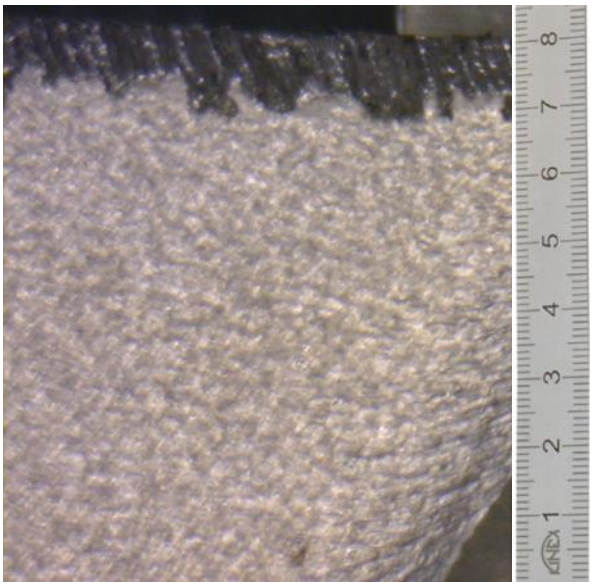
Obr. 53 Vzorek BP7



Obr. 54 Vzorek TC6



Obr. 55 Vzorek TC9



Obr. 56 Vzorek Z12

10.4.5 Výpočet exponentu zpevnění a dalších veličin pro vzorky z tahové zkoušky

VZOREK BP11

Výpočet exponentu zpevnění

$$n = \ln\left(1 + \frac{A_{50}}{100}\right) = ln\left(1 + \frac{42{,}18}{100}\right) = 0{,}352$$

Materiálová konstanta K

$$\mathrm{K} = \left(\frac{R_m\, e^n}{n^n}\right) = \left(\frac{259 \cdot e^{0{,}352}}{0{,}352^{0{,}352}}\right) = 531{,}848\ MPa$$

Skutečné napětí $\bar{\sigma}_1$

$$\bar{\sigma}_1 = K \cdot \varphi^n = 531{,}48 \cdot 0{,}0315^{0{,}352} = 157{,}359\ MPa$$

Extrapolovaná mez kluzu

$$\bar{\sigma}_{ke} = \frac{1-n}{1+n} \cdot K \cdot n^n = \frac{1-0{,}352}{1+0{,}352} \cdot 531{,}848 \cdot 0{,}352^{0{,}352} = 176{,}403\ MPa$$

Modul zpevnění

$$D = \frac{2}{1+n} \cdot K \cdot n^n = \frac{2}{1+0{,}352} \cdot 531{,}848 \cdot 0{,}352^{0{,}352} = 544{,}329\ MPa$$

Ohybové napětí podle jednopřímkové aproximace

$$\bar{\sigma}_2 = \bar{\sigma}_{ke} + D \cdot \varphi = 176{,}403 + 544{,}329 \cdot 0{,}0315 = 193{,}549\ MPa$$

Modul zpevnění pro dvoupřímkovou aproximaci

$$D' = K \cdot n \left[\frac{K(1-n)}{R_{p0,2}}\right]^{\frac{1-n}{n}} = 531{,}848 \cdot 0{,}352 \left[\frac{531{,}848\ (1-0{,}352)}{129{,}71}\right]^{\frac{1-0{,}352}{0{,}352}} = 1131{,}5\ MPa$$

Ohybové napětí podle dvoupřímkové aproximace

$$\bar{\sigma}_3 = R_{p0,2} + D' \cdot \varphi = 129{,}71 + 1131{,}5 \cdot 0{,}0315 = 165{,}352\ MPa$$

VZOREK BP16

Výpočet exponentu zpevnění

$$n = \ln\left(1 + \frac{A_{50}}{100}\right) = ln\left(1 + \frac{37{,}70}{100}\right) = 0{,}320$$

Materiálová konstanta K

$$\mathrm{K} = \left(\frac{R_m\ e^n}{n^n}\right) = \left(\frac{258 \cdot e^{0{,}320}}{0{,}320^{0{,}320}}\right) = 511{,}911\ MPa$$

Skutečné napětí $\bar{\sigma}_1$

$$\bar{\sigma}_1 = K \cdot \varphi^n = 511{,}911 \cdot 0{,}0315^{0{,}320} = 169{,}299\ MPa$$

Extrapolovaná mez kluzu

$$\bar{\sigma}_{ke} = \frac{1-n}{1+n} \cdot K \cdot n^n = \frac{1-0{,}320}{1+0{,}320} \cdot 511{,}911 \cdot 0{,}320^{0{,}320} = 183{,}016\ MPa$$

Modul zpevnění

$$D = \frac{2}{1+n} \cdot K \cdot n^n = \frac{2}{1+0{,}320} \cdot 511{,}911 \cdot 0{,}320^{0{,}320} = 538{,}282\ MPa$$

Ohybové napětí podle jednopřímkové aproximace

$$\bar{\sigma}_2 = \bar{\sigma}_{ke} + D \cdot \varphi = 183{,}016 + 538{,}282 \cdot 0{,}0315 = 199{,}972\ MPa$$

Modul zpevnění pro dvoupřímkovou aproximaci

$$D' = K \cdot n \left[\frac{K(1-n)}{R_{p0,2}}\right]^{\frac{1-n}{n}} = 511{,}911 \cdot 0{,}320 \left[\frac{511{,}911\ (1-0{,}320)}{135{,}87}\right]^{\frac{1-0{,}320}{0{,}320}} = 1209{,}42 MPa$$

Ohybové napětí podle dvoupřímkové aproximace

$$\bar{\sigma}_3 = R_{p0,2} + D' \cdot \varphi = 135{,}87 + 1209{,}42 \cdot 0{,}0315 = 173{,}967\ MPa$$

VZOREK BP7

Výpočet exponentu zpevnění

$$n = \ln\left(1 + \frac{A_{50}}{100}\right) = ln\left(1 + \frac{29{,}44}{100}\right) = 0{,}258$$

Materiálová konstanta K

$$\mathrm{K} = \left(\frac{R_m\, e^n}{n^n}\right) = \left(\frac{253 \cdot e^{0,258}}{0,258^{0,258}}\right) = 464,372\ MPa$$

Skutečné napětí $\bar{\sigma}_1$

$$\bar{\sigma}_1 = K \cdot \varphi^n = 464,372 \cdot 0,0315^{0,258} = 190,296\ MPa$$

Extrapolovaná mez kluzu

$$\bar{\sigma}_{ke} = \frac{1-n}{1+n} \cdot K \cdot n^n = \frac{1-0,258}{1+0,258} \cdot 464,372 \cdot 0,258^{0,258} = 112,331\ MPa$$

Modul zpevnění

$$D = \frac{2}{1+n} \cdot K \cdot n^n = \frac{2}{1+0,258} \cdot 464,372 \cdot 0,258^{0,258} = 520,480\ MPa$$

Ohybové napětí podle jednopřímkové aproximace

$$\bar{\sigma}_2 = \bar{\sigma}_{ke} + D \cdot \varphi = 112,331 + 520,480 \cdot 0,0315 = 128,726\ MPa$$

Modul zpevnění pro dvoupřímkovou aproximaci

$$D' = K \cdot n \left[\frac{K(1-n)}{R_{p0,2}}\right]^{\frac{1-n}{n}} = 464,372 \cdot 0,258 \left[\frac{464,372\ (1-0,258)}{143,91}\right]^{\frac{1-0,258}{0,258}} = 1475,196 MPa$$

Ohybové napětí podle dvoupřímkové aproximace

$$\bar{\sigma}_3 = R_{p0,2} + D' \cdot \varphi = 143,91 + 1475,196 \cdot 0,0315 = 190,379\ MPa$$

VZOREK TC6

Výpočet exponentu zpevnění

$$n = \ln\left(1 + \frac{A_{50}}{100}\right) = ln\left(1 + \frac{42,04}{100}\right) = 0,351$$

Materiálová konstanta K

$$\mathrm{K} = \left(\frac{R_m\, e^n}{n^n}\right) = \left(\frac{256 \cdot e^{0,351}}{0,351^{0,351}}\right) = 525,318\ MPa$$

Skutečné napětí $\bar{\sigma}_1$

$$\bar{\sigma}_1 = K \cdot \varphi^n = 525,318 \cdot 0,0315^{0,351} = 156,074\ MPa$$

Extrapolovaná mez kluzu

$$\bar{\sigma}_{ke} = \frac{1-n}{1+n} \cdot K \cdot n^n = \frac{1-0,351}{1+0,351} \cdot 525,318 \cdot 0,351^{0,351} = 174,630\ MPa$$

Modul zpevnění

$$D = \frac{2}{1+n} \cdot K \cdot n^n = \frac{2}{1+0{,}351} \cdot 525{,}318 \cdot 0{,}351^{0{,}351} = 538{,}150\ MPa$$

Ohybové napětí podle jednopřímkové aproximace

$$\bar{\sigma}_2 = \bar{\sigma}_{ke} + D \cdot \varphi = 174{,}630 + 538{,}150 \cdot 0{,}0315 = 191{,}582\ MPa$$

Modul zpevnění pro dvoupřímkovou aproximaci

$$D' = K \cdot n \left[\frac{K(1-n)}{R_{p0,2}}\right]^{\frac{1-n}{n}} = 525{,}318 \cdot 0{,}351 \left[\frac{525{,}318\ (1-0{,}351)}{136{,}70}\right]^{\frac{1-0{,}351}{0{,}351}} = 999{,}059 MPa$$

Ohybové napětí podle dvoupřímkové aproximace

$$\bar{\sigma}_3 = R_{p0,2} + D' \cdot \varphi = 136{,}70 + 999{,}059 \cdot 0{,}0315 = 168{,}170\ MPa$$

VZOREK TC9

Výpočet exponentu zpevnění

$$n = \ln\left(1 + \frac{A_{50}}{100}\right) = ln\left(1 + \frac{27{,}37}{100}\right) = 0{,}242$$

Materiálová konstanta K

$$\mathrm{K} = \left(\frac{R_m\ e^n}{n^n}\right) = \left(\frac{263 \cdot e^{0{,}242}}{0{,}242^{0{,}242}}\right) = 472{,}495\ MPa$$

Skutečné napětí $\bar{\sigma}_1$

$$\bar{\sigma}_1 = K \cdot \varphi^n = 472{,}495 \cdot 0{,}0315^{0{,}242} = 204{,}639\ MPa$$

Extrapolovaná mez kluzu

$$\bar{\sigma}_{ke} = \frac{1-n}{1+n} \cdot K \cdot n^n = \frac{1-0{,}242}{1+0{,}242} \cdot 472{,}495 \cdot 0{,}242^{0{,}242} = 204{,}452\ MPa$$

Modul zpevnění

$$D = \frac{2}{1+n} \cdot K \cdot n^n = \frac{2}{1+0{,}242} \cdot 472{,}495 \cdot 0{,}242^{0{,}242} = 539{,}348\ MPa$$

Ohybové napětí podle jednopřímkové aproximace

$$\bar{\sigma}_2 = \bar{\sigma}_{ke} + D \cdot \varphi = 204{,}452 + 539{,}348 \cdot 0{,}0315 = 221{,}441\ MPa$$

Modul zpevnění pro dvoupřímkovou aproximaci

$$D' = K \cdot n \left[\frac{K(1-n)}{R_{p0,2}}\right]^{\frac{1-n}{n}} = 472{,}495 \cdot 0{,}242 \left[\frac{472{,}495\ (1-0{,}242)}{138{,}32}\right]^{\frac{1-0{,}242}{0{,}242}} = 2249{,}791 MPa$$

Ohybové napětí podle dvoupřímkové aproximace

$\bar{\sigma}_3 = R_{p0,2} + D' \cdot \varphi = 138{,}32 + 2249{,}791 \cdot 0{,}0315 = 209{,}188\ MPa$

VZOREK Z12

Výpočet exponentu zpevnění

$$n = \ln\left(1 + \frac{A_{50}}{100}\right) = ln\left(1 + \frac{32{,}23}{100}\right) = 0{,}279$$

Materiálová konstanta K

$$\mathrm{K} = \left(\frac{R_m\, e^n}{n^n}\right) = \left(\frac{265 \cdot e^{0{,}279}}{0{,}279^{0{,}279}}\right) = 500{,}384\ MPa$$

Skutečné napětí $\bar{\sigma}_1$

$$\bar{\sigma}_1 = K \cdot \varphi^n = 500{,}384 \cdot 0{,}0315^{0{,}279} = 190{,}692\ MPa$$

Extrapolovaná mez kluzu

$$\bar{\sigma}_{ke} = \frac{1-n}{1+n} \cdot K \cdot n^n = \frac{1-0{,}279}{1+0{,}279} \cdot 500{,}384 \cdot 0{,}279^{0{,}279} = 169{,}371\ MPa$$

Modul zpevnění

$$D = \frac{2}{1+n} \cdot K \cdot n^n = \frac{2}{1+0{,}279} \cdot 500{,}384 \cdot 0{,}279^{0{,}279} = 547{,}723\ MPa$$

Ohybové napětí podle jednopřímkové aproximace

$$\bar{\sigma}_2 = \bar{\sigma}_{ke} + D \cdot \varphi = 169{,}371 + 547{,}723 \cdot 0{,}0315 = 186{,}624\ MPa$$

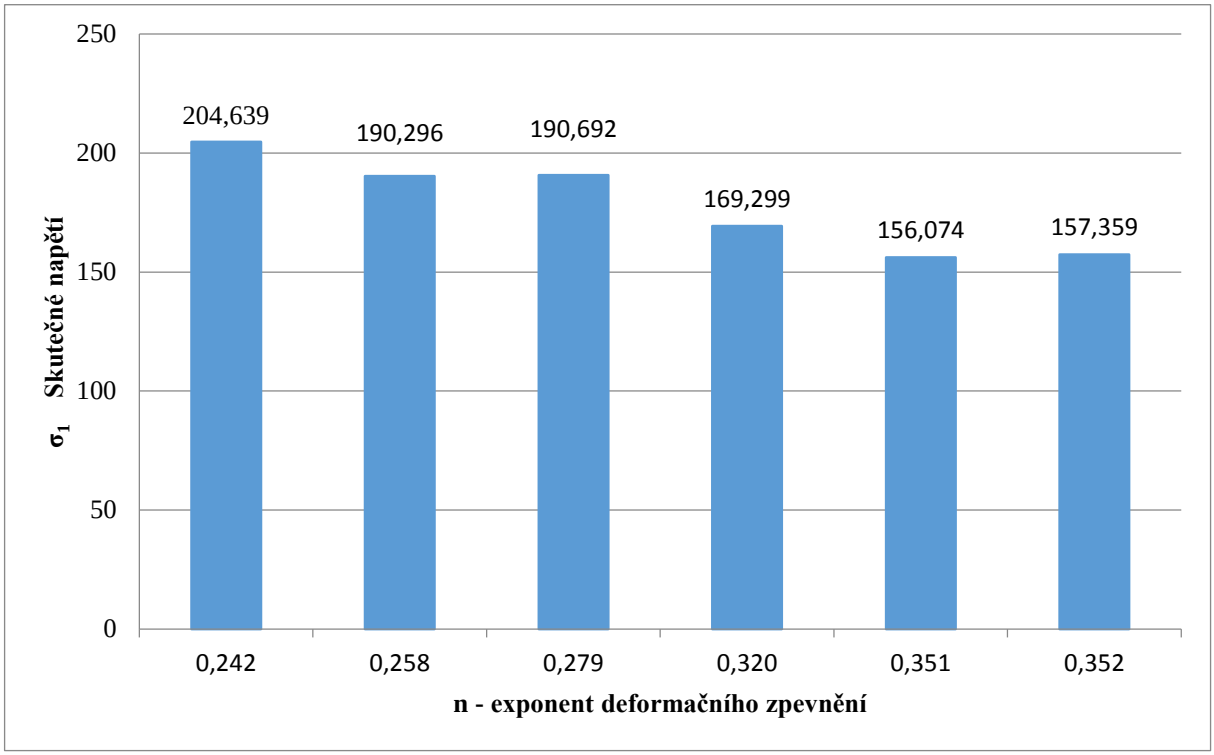
Modul zpevnění pro dvoupřímkovou aproximaci

$$D' = K \cdot n \left[\frac{K(1-n)}{R_{p0,2}}\right]^{\frac{1-n}{n}} = 500{,}384 \cdot 0{,}279 \left[\frac{500{,}384\ (1-0{,}279)}{147{,}45}\right]^{\frac{1-0{,}279}{0{,}279}} = 1409{,}736\ MPa$$

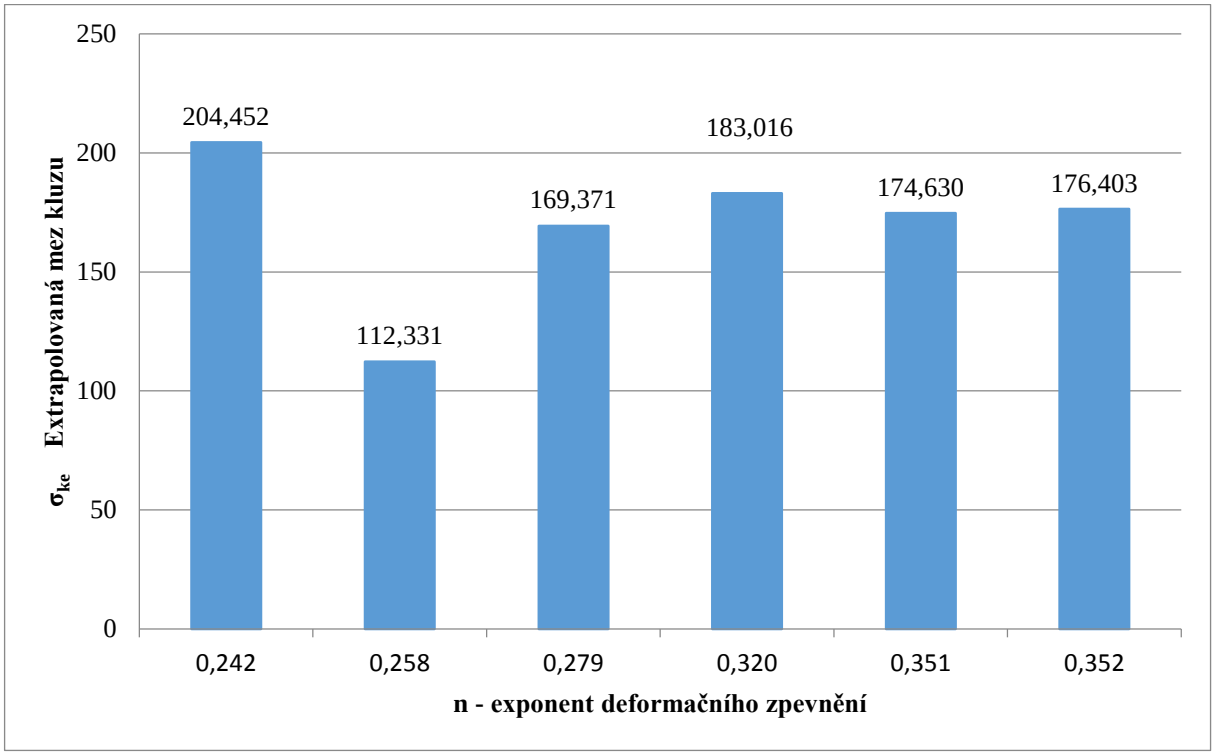
Ohybové napětí podle dvoupřímkové aproximace

$$\bar{\sigma}_3 = R_{p0,2} + D' \cdot \varphi = 147{,}45 + 1409{,}736 \cdot 0{,}0315 = 191{,}857\ MPa$$

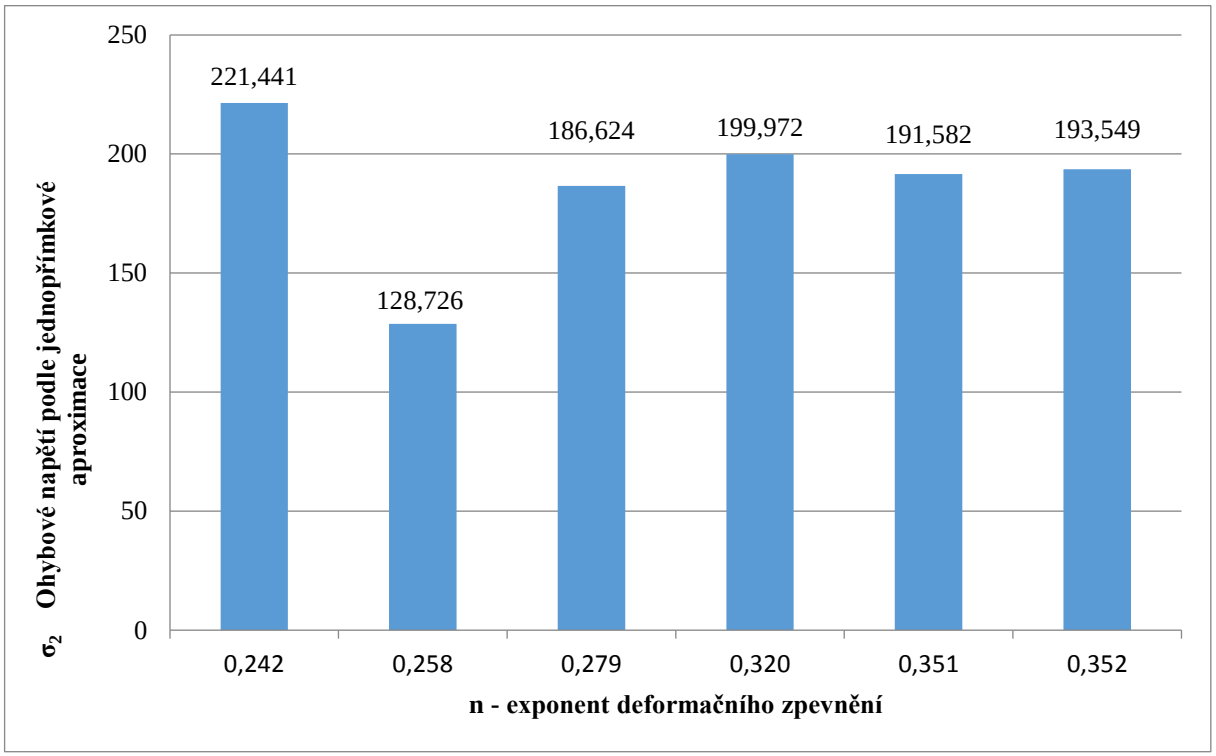
10.4.6 Grafické výsledky na vybraných vzorcích



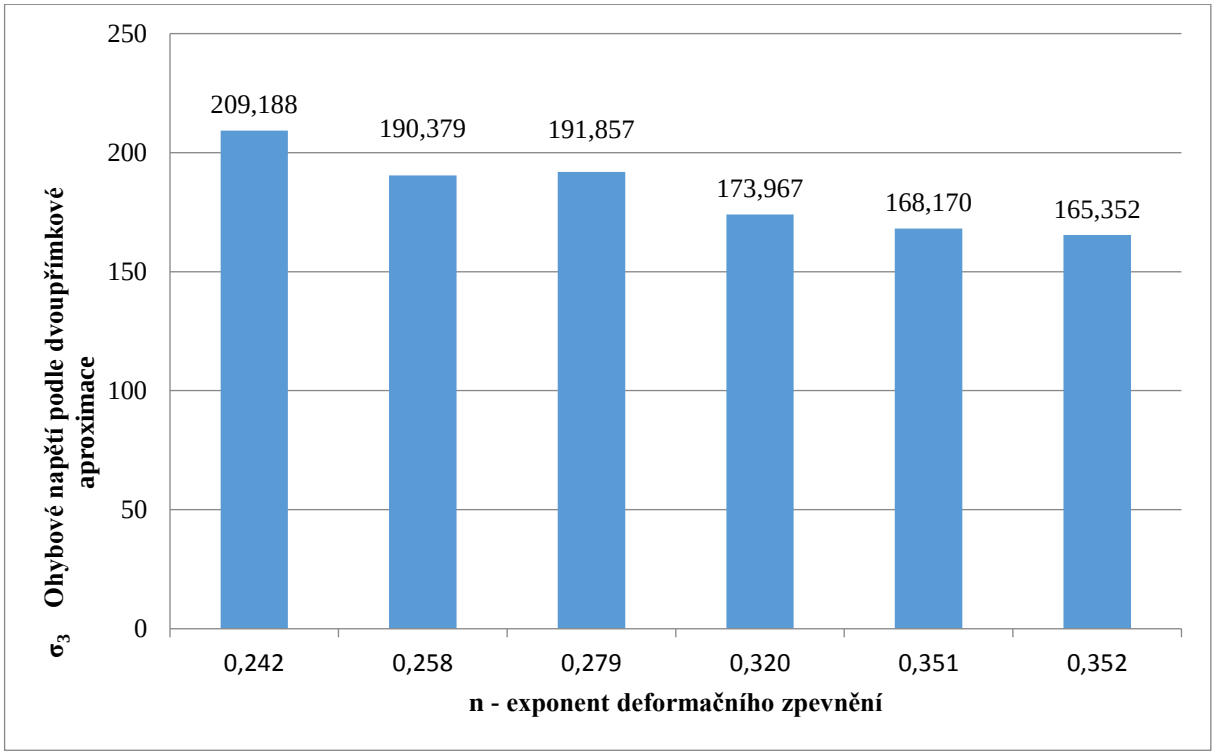
Obr. 57 Závislost exponentu deformačního zpevnění na skutečném napětí.



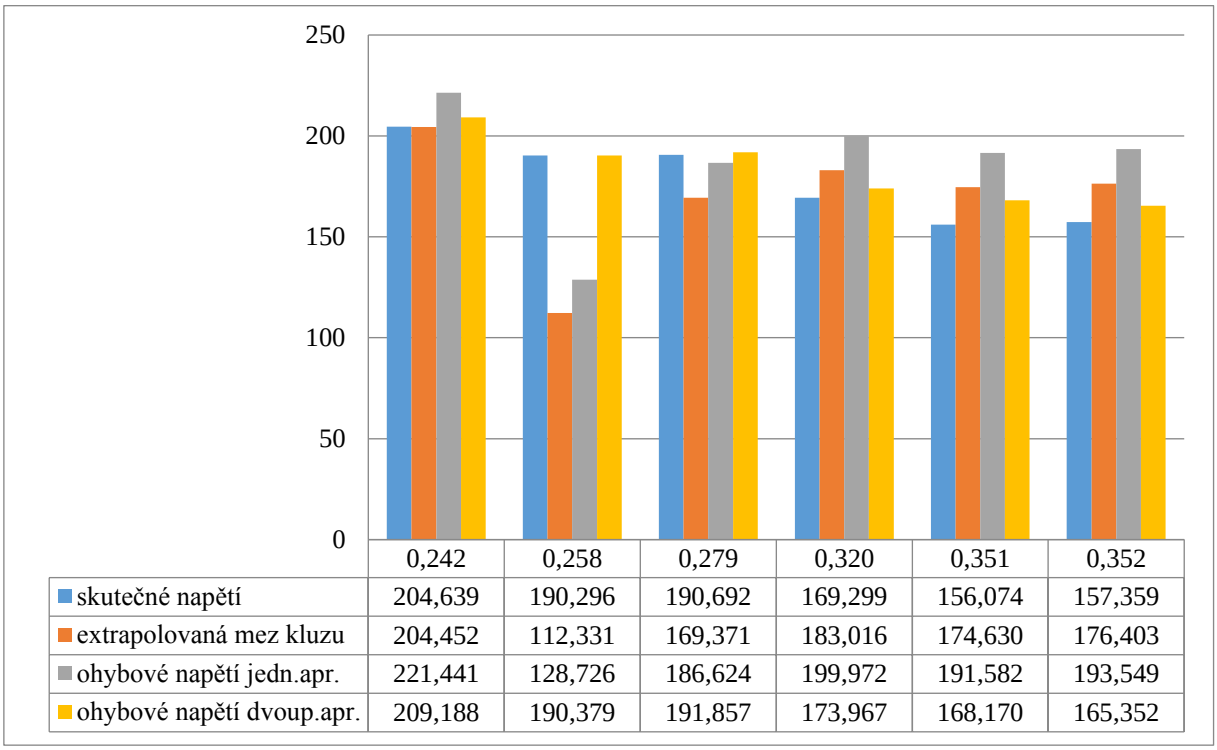
Obr. 58 Závislost exponentu deformačního zpevnění na extrapolované mezi kluzu.



Obr. 59 Závislost exponentu deformačního zpevnění na ohybovém napětí podle jednopřímkové aproximace.



Obr. 60 Závislost exponentu deformačního zpevnění na ohybovém napětí podle dvoupřímkové aproximace.



Obr. 61 Závislost exponentu deformačního zpevnění na vybraných parametrech.

10.5 Ohybová zkouška

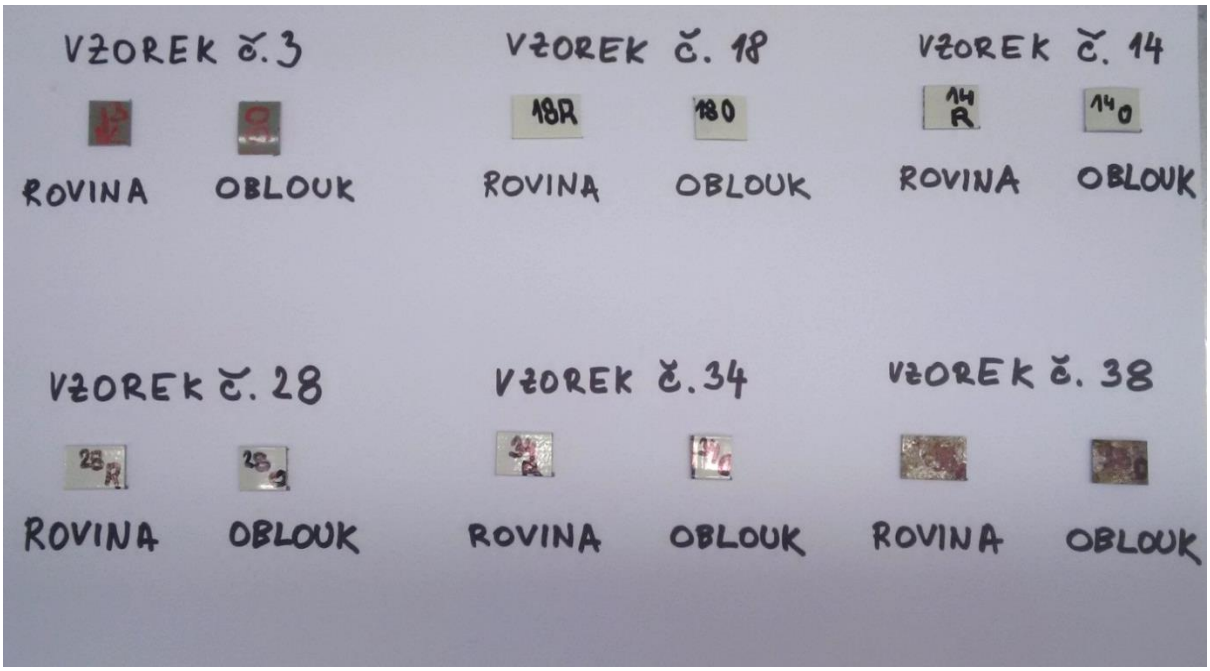
Na odstupňovaném ohýbacím přípravku byly ohnuty povlakované plechy s nanesenými kružnicemi. Kružnice byly naleptány na povlakovaný povrch. Testované vzorky byly ohnuty na poloměrech R11, R17, R23, R29 a R35 mm. Plechy se jmenovitým rozměrem 90 x 10 mm byly dále změřeny na měřícím optickém zařízení Scope-Check s přesností 0,0001 mm. Naměřená tloušťka u vybraných vzorků po ohnutí byla zaznamenána v tabulce 10. Na obr. 102 je vzorek, na kterém jsou naneseny a označeny kružnice, které se měřily.

10.5.1 Příprava materiálu z ohnutých vzorků

Ohnuté vzorky z každé sady byly rozděleny do dvou kategorií:

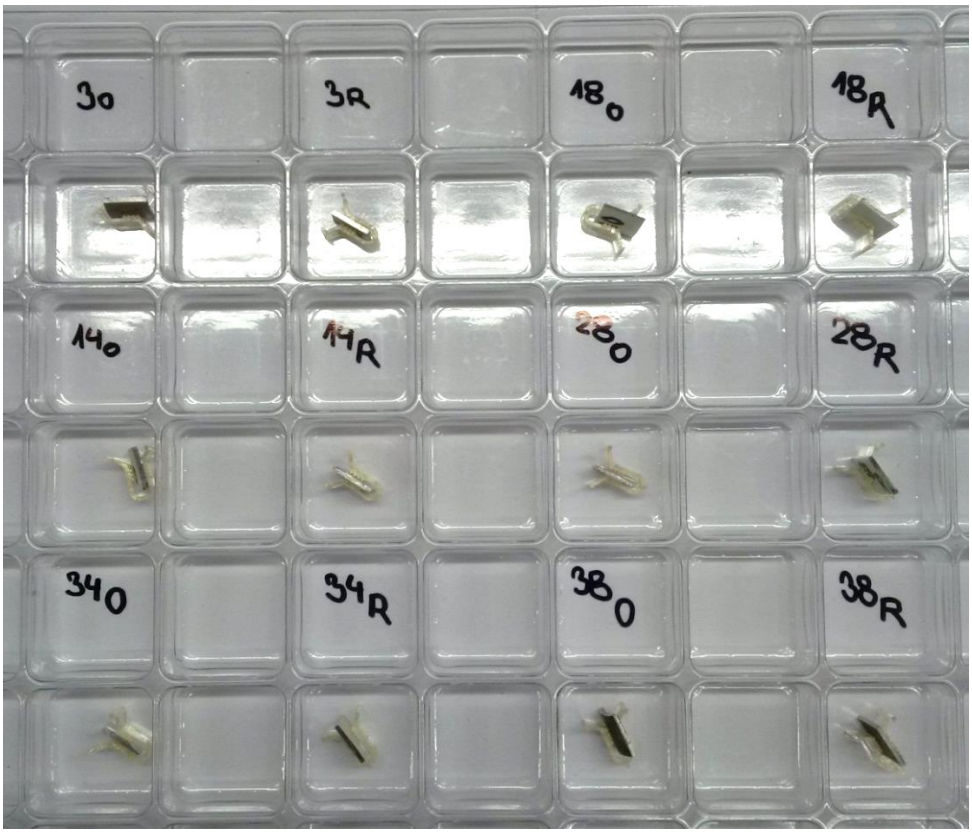
a) materiál rovné části ohnutého vzorku,
b) materiál z ohnuté části.

Testované vzorky (obr. 62) byly uříznuty na přesné pile (obr. 63) a vybroušeny do jemné struktury brusným papírem v pořadí hrubosti 280, 400 a 2500 (obr. 63) a poté byly ošetřeny brusnou pastou D3. Vzorky byly zalité do pryskyřice WEICON MS 1000 (obr. 64 - 65). Poté byly testované vzorky zkoumány pod mikroskopem LEICA DM ILM, typ: 090–135.003.

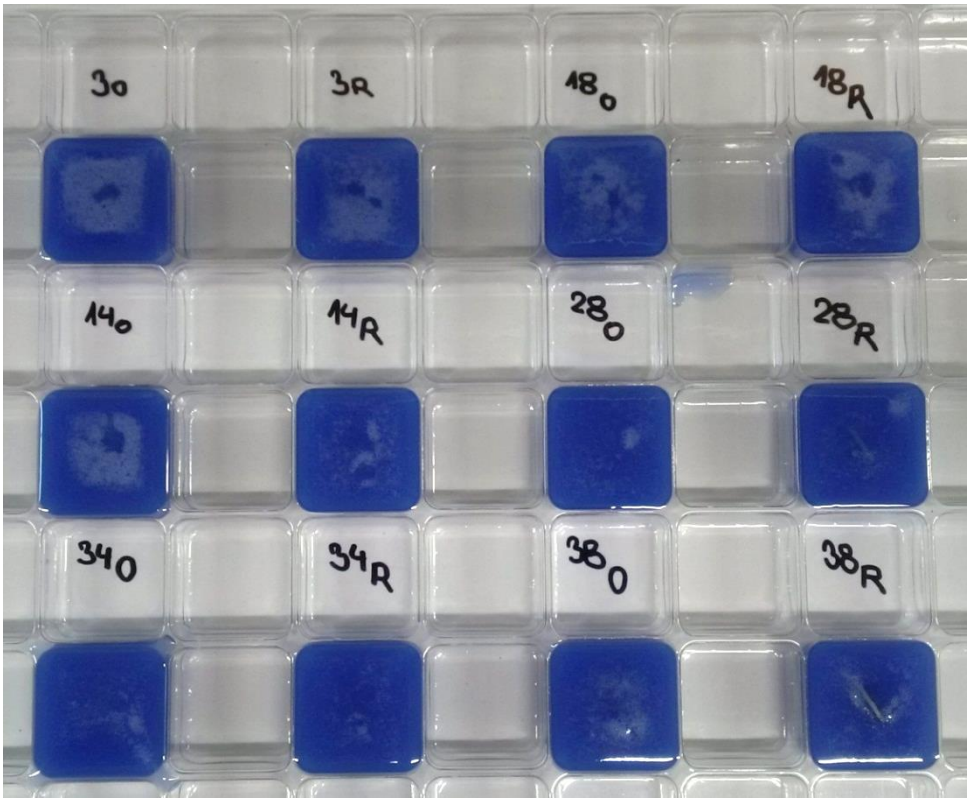


Obr. 62 Vzorky, které byly rozděleny do kategorie rovina a oblouk.

Obr. 63 Metalografická přesná pila Mikron 110 a bruska Kompakt 1031.



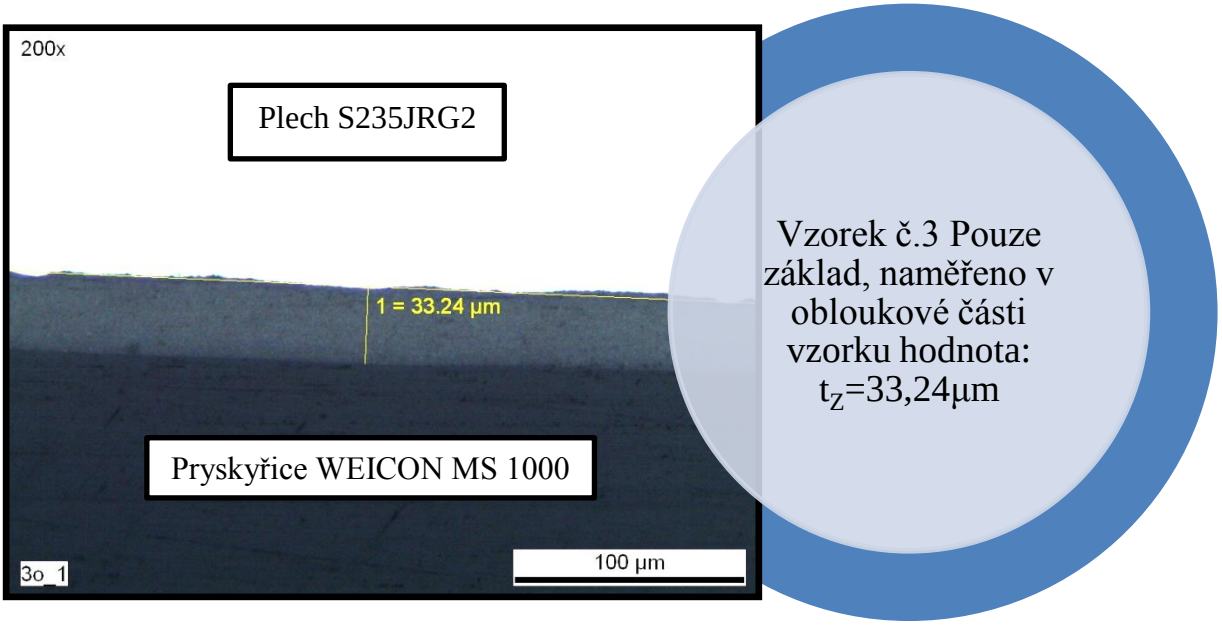
Obr. 64 Připravené vzorky pro zalití.



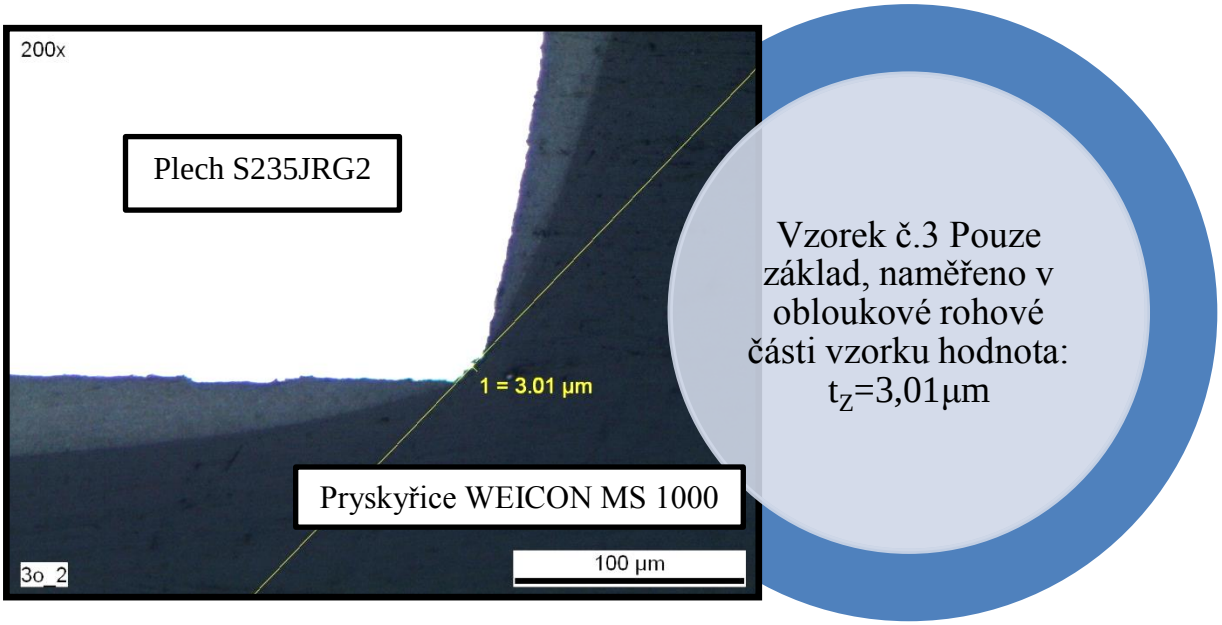
Obr. 65 Vybrané vzorky v zalévací hmotě.

10.5.2 Testované vzorky pod mikroskopem

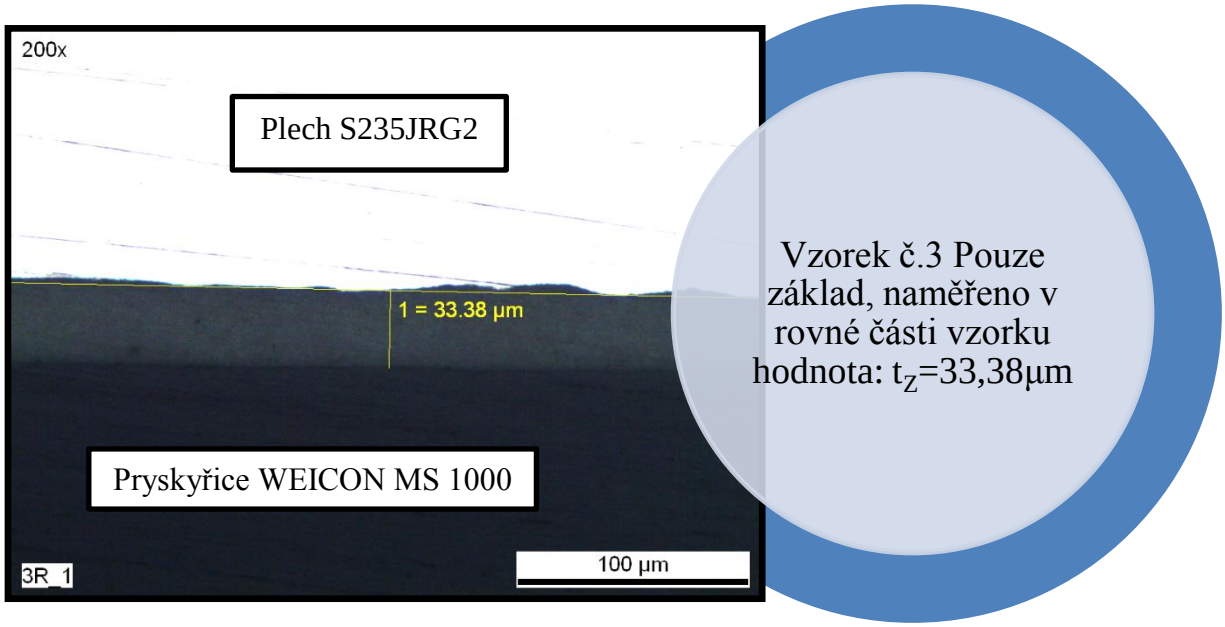
U obr. 66 až 97 je detailně zobrazeno měření v obloukové části vzorku, měření v obloukové rohové části vzorku, měření v rovné části vzorku a čtvrtá skupina měření se uskutečnila v rovné rohové části vzorku. Na obrázcích je zřetelně vidět základní materiál a jednotlivé vrstvy povlaků. Jednotlivé testované vzorky s ošetřeným povrchem a použitým médiem je detailně vidět z tab. 2.



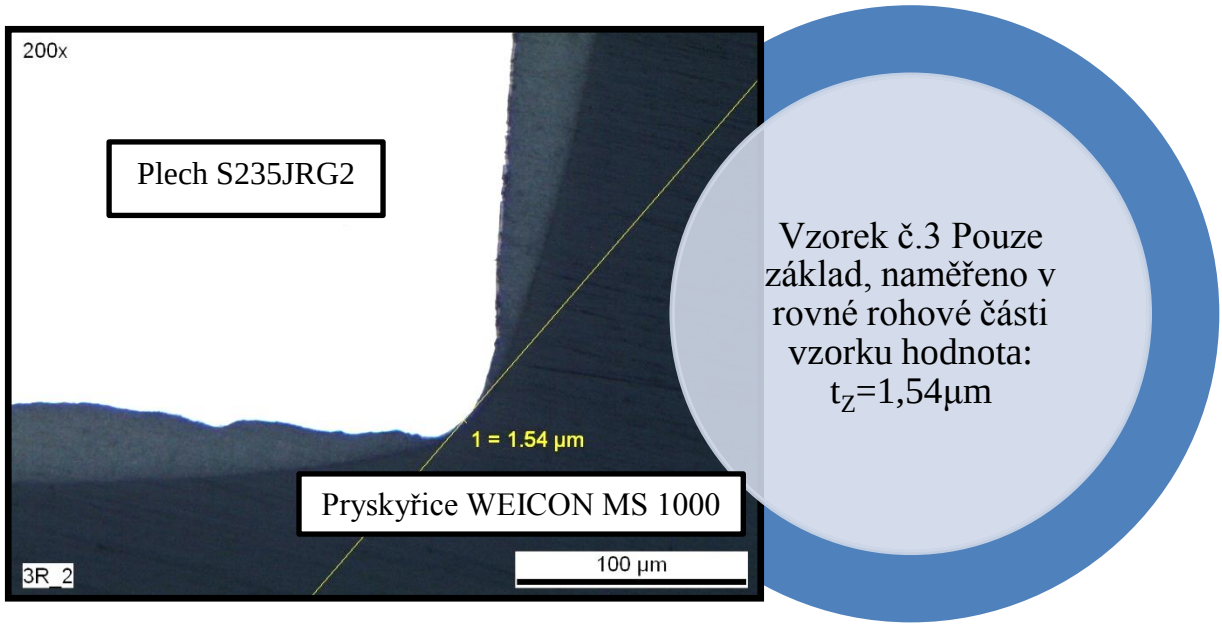
Obr. 66 Vzorek č. 3 - měřeno v obloukové části vzorku.



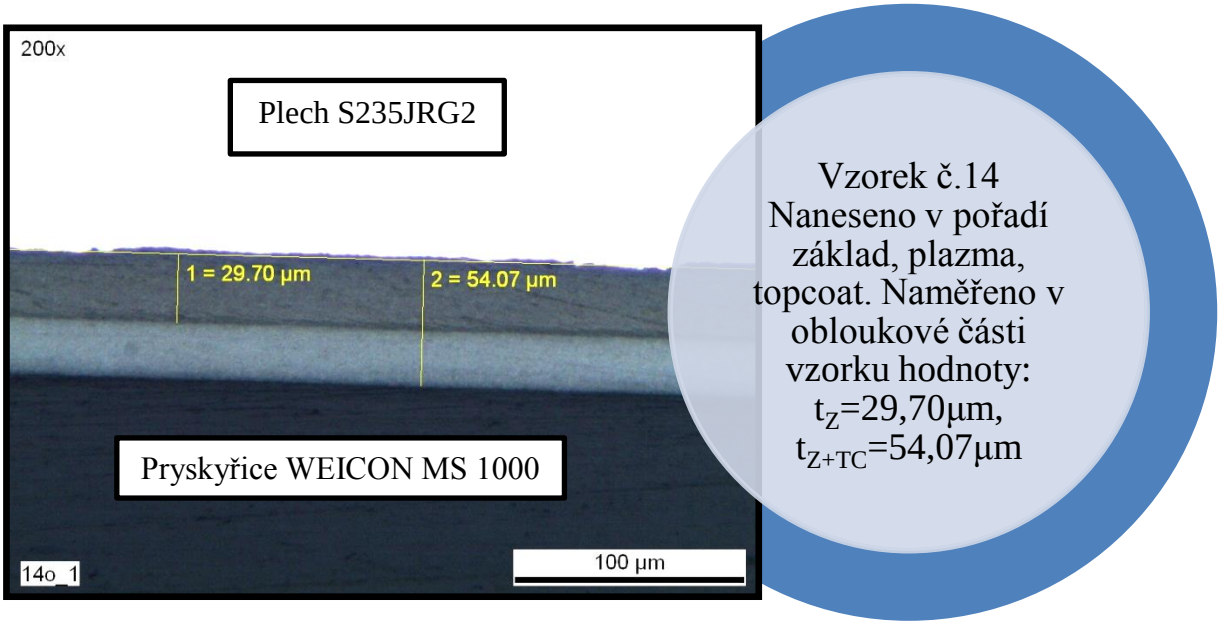
Obr. 67 Vzorek č. 3 - měřeno v obloukové rohové části vzorku.



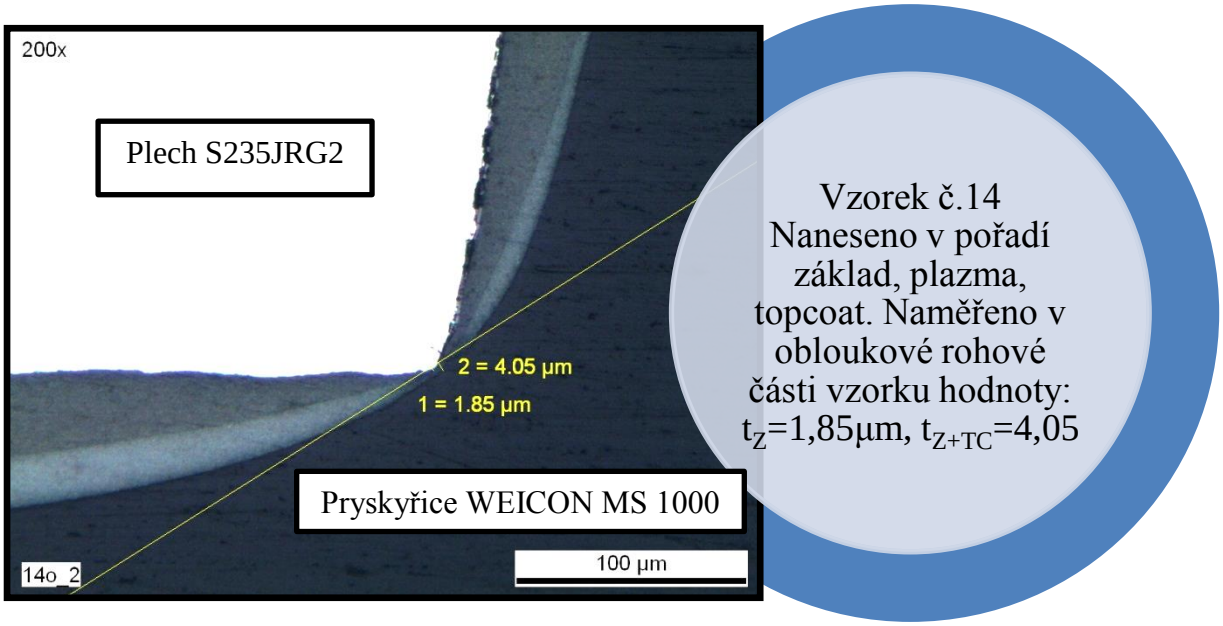
Obr. 68 Vzorek č. 3 - měřeno v rovné části vzorku.



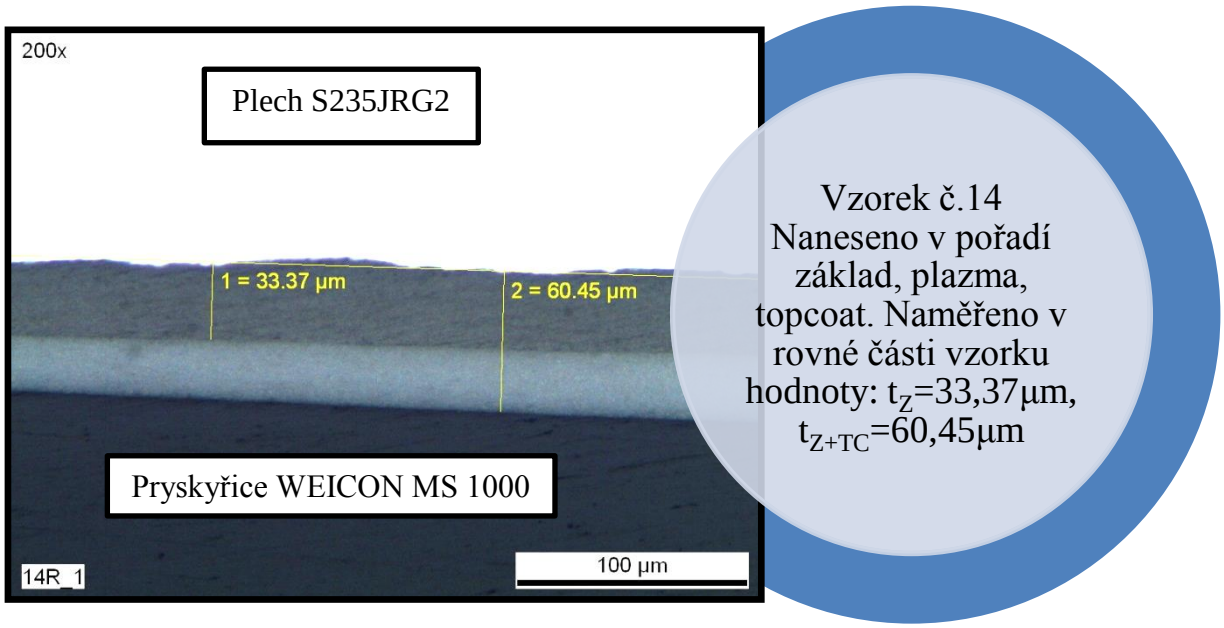
Obr. 69 Vzorek č. 3 - měřeno v rovné rohové části vzorku.



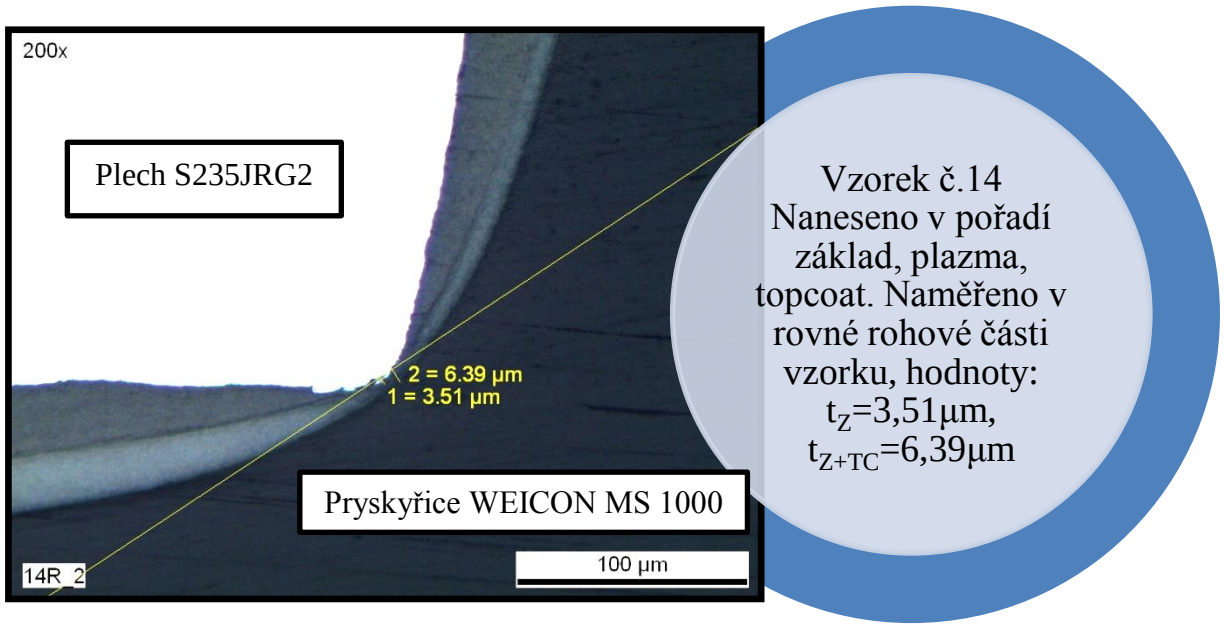
Obr. 70 Vzorek č. 14 - měřeno v obloukové části vzorku.



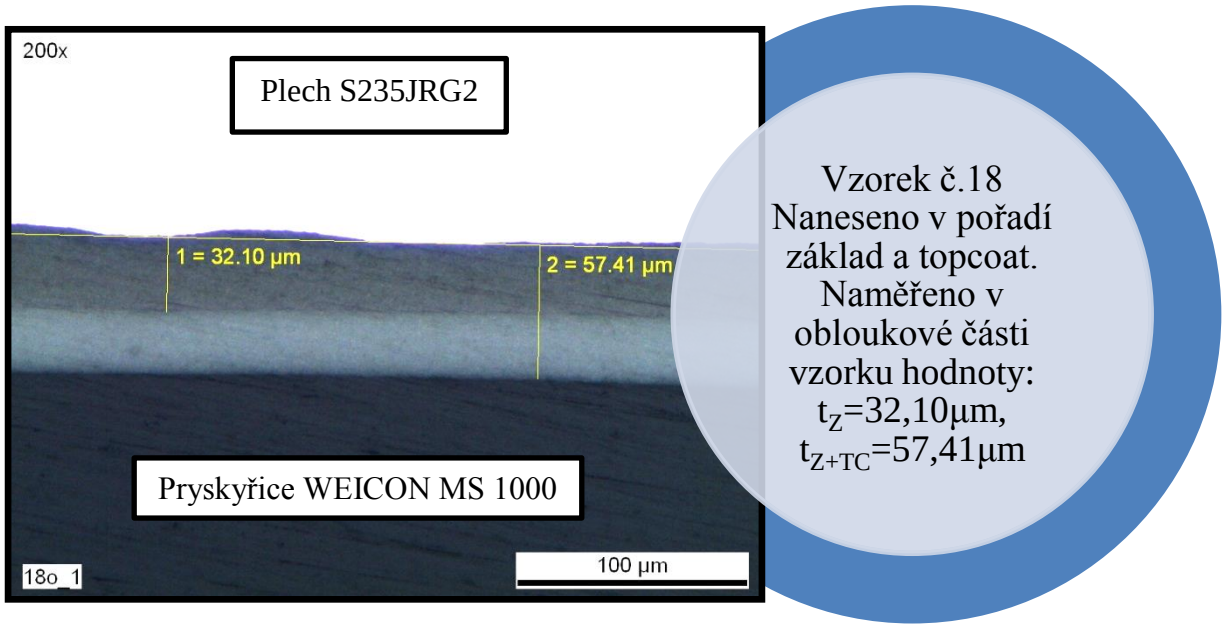
Obr. 71 Vzorek č. 14 - měřeno v obloukové rohové části vzorku.



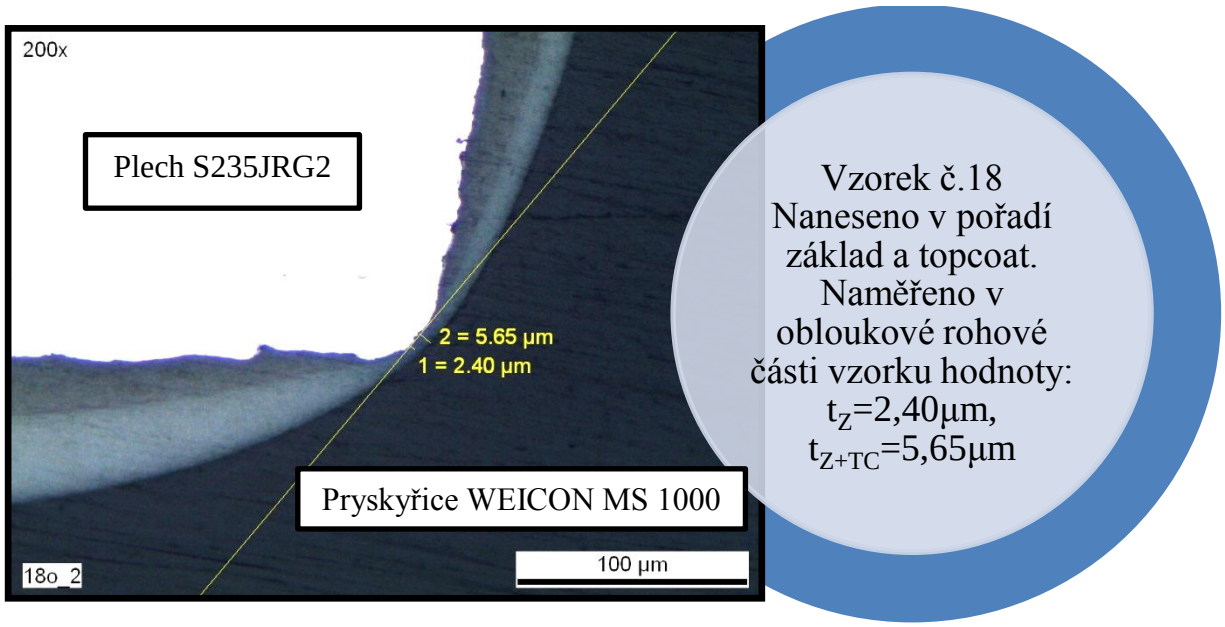
Obr. 72 Vzorek č. 14 - měřeno v rovné části vzorku.



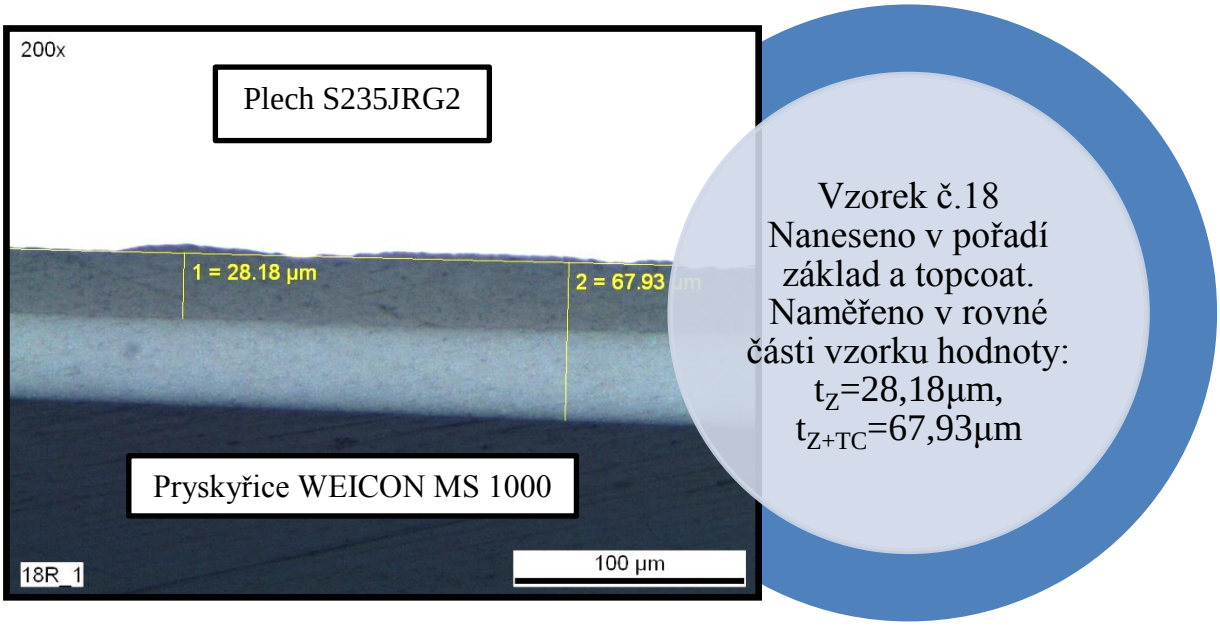
Obr. 73 Vzorek č. 14 - měřeno v rovné rohové části vzorku.



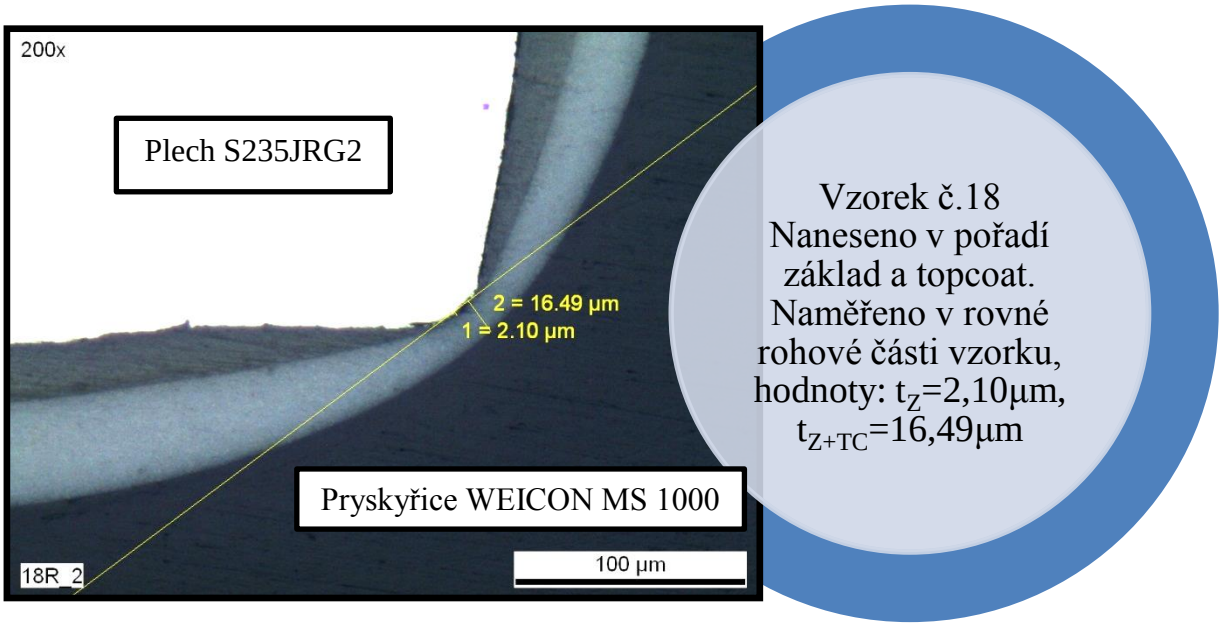
Obr. 74 Vzorek č. 18 - měřeno v obloukové části vzorku.



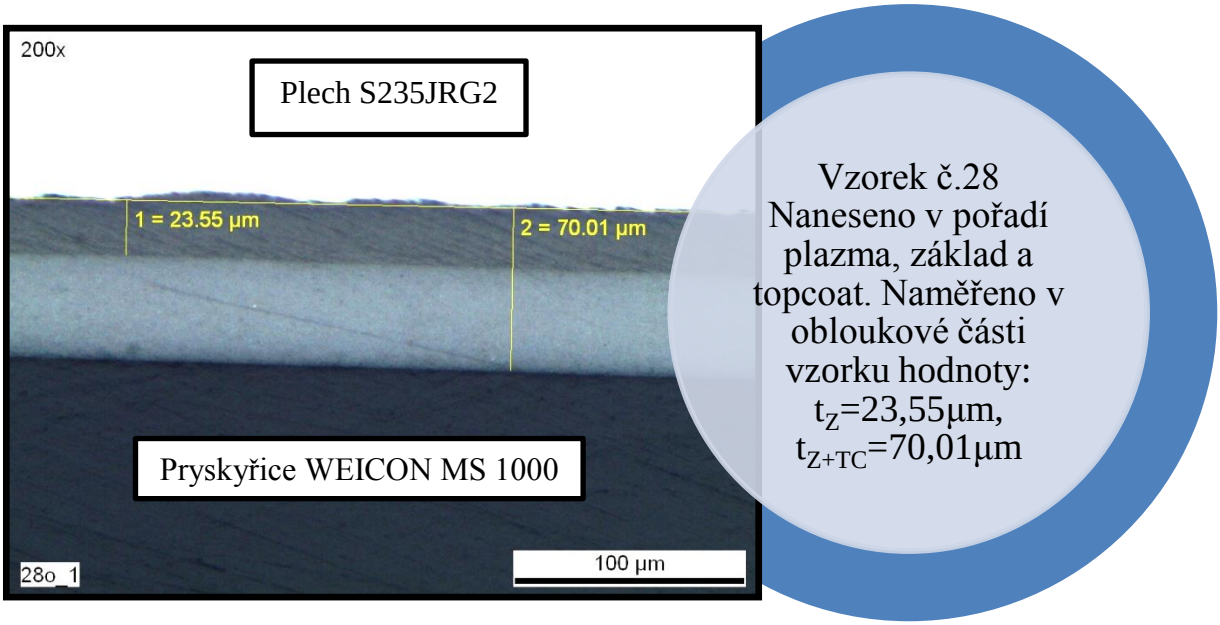
Obr. 75 Vzorek č. 18 - měřeno v obloukové rohové části vzorku.



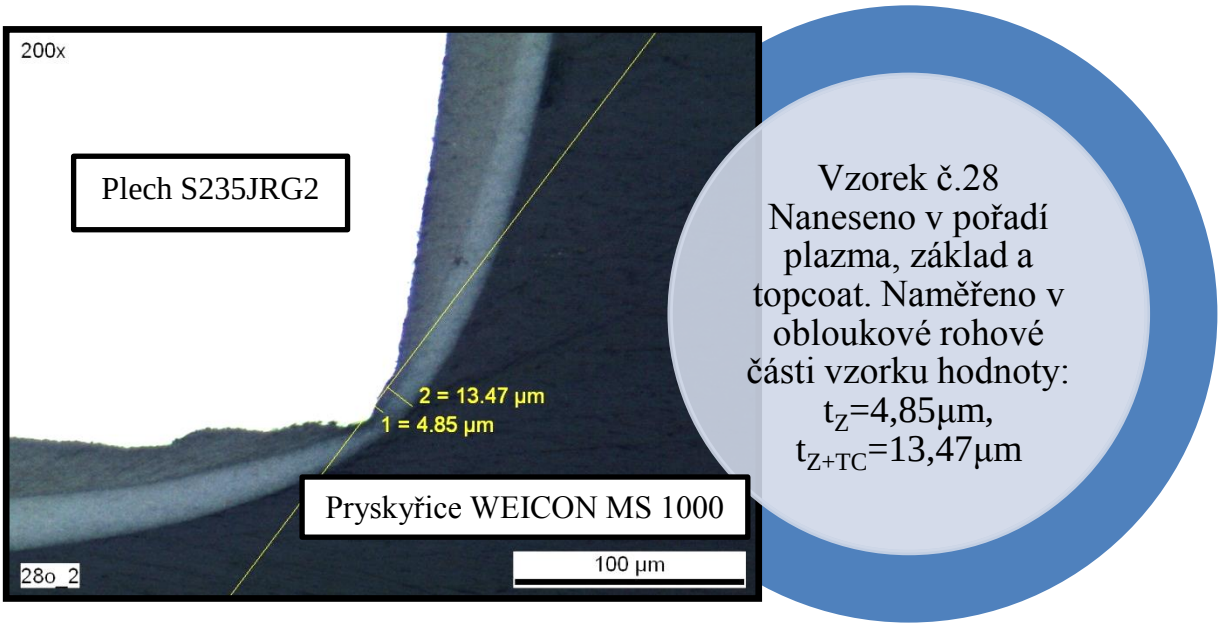
Obr. 76 Vzorek č. 18 - měřeno v rovné části vzorku.



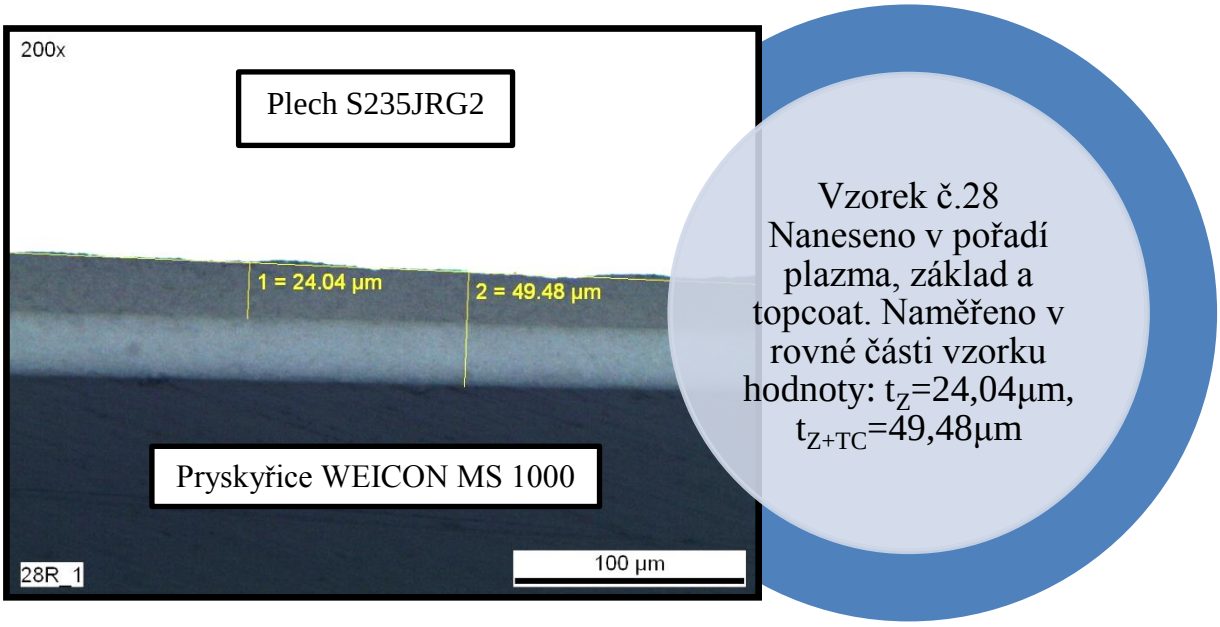
Obr. 77 Vzorek č. 18 - měřeno v rovné rohové části vzorku.



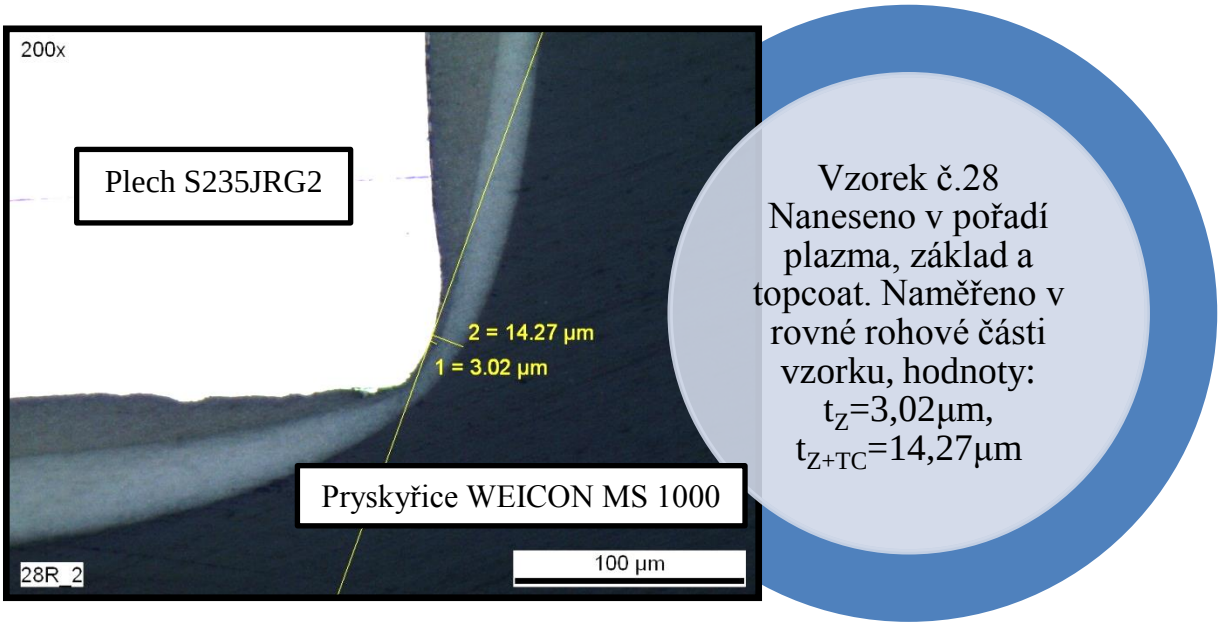
Obr. 78 Vzorek č. 28 - měřeno v obloukové části vzorku.



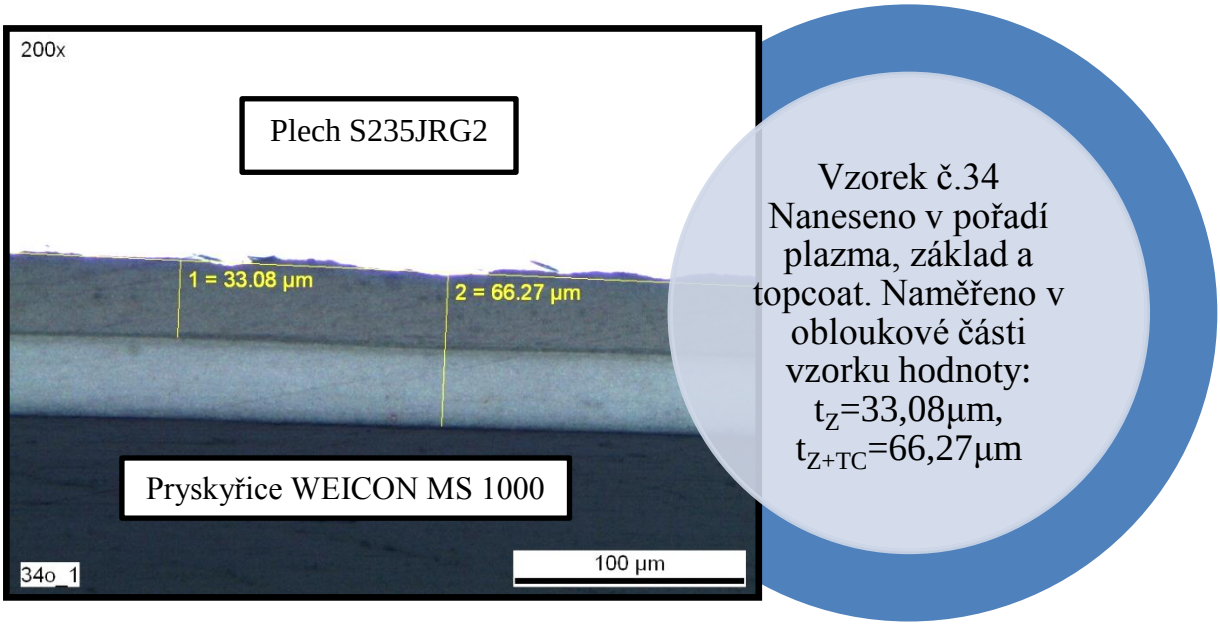
Obr. 79 Vzorek č. 28 - měřeno v obloukové rohové části vzorku.



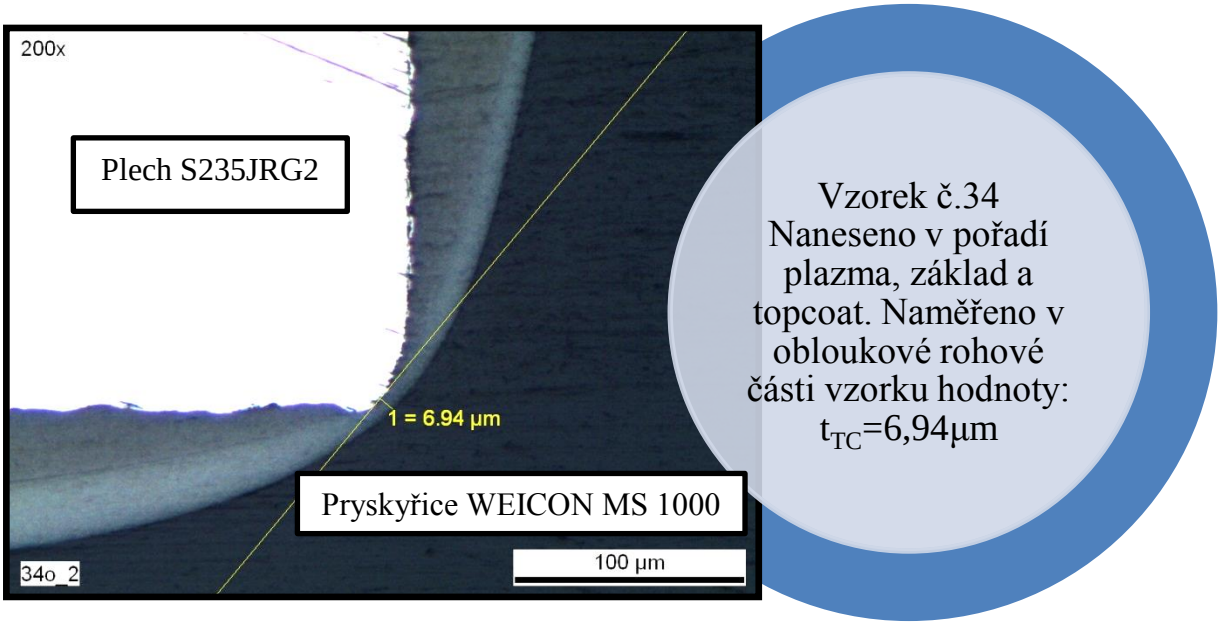
Obr. 80 Vzorek č. 28 - měřeno v rovné části vzorku.



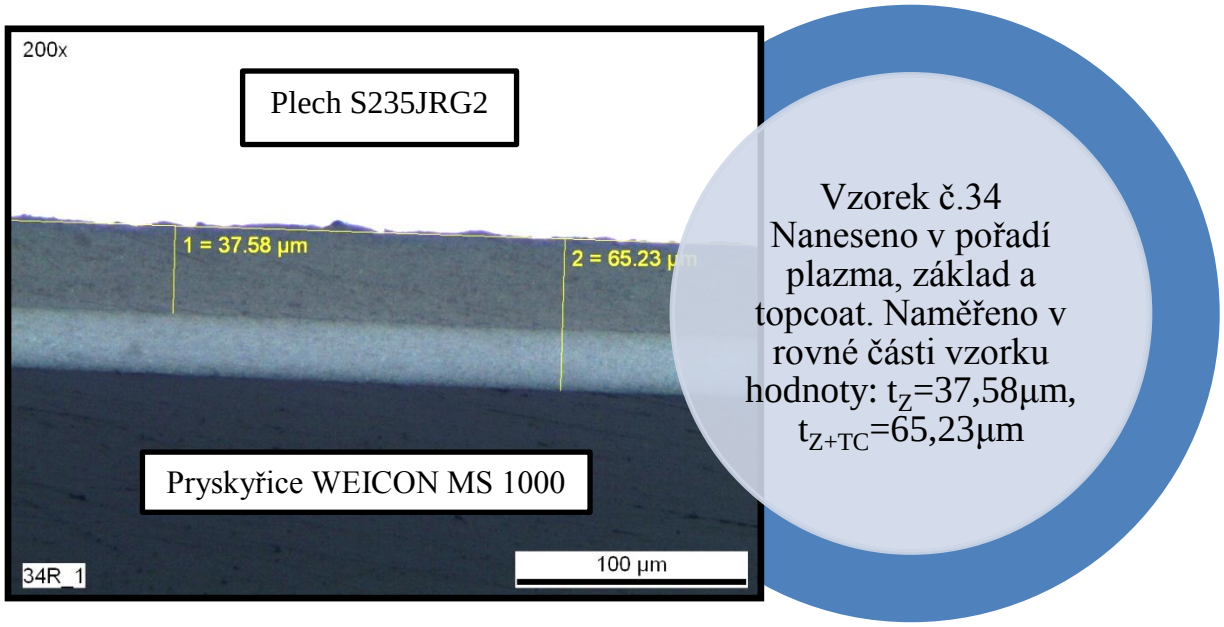
Obr. 81 Vzorek č. 28 - měřeno v rovné rohové části vzorku



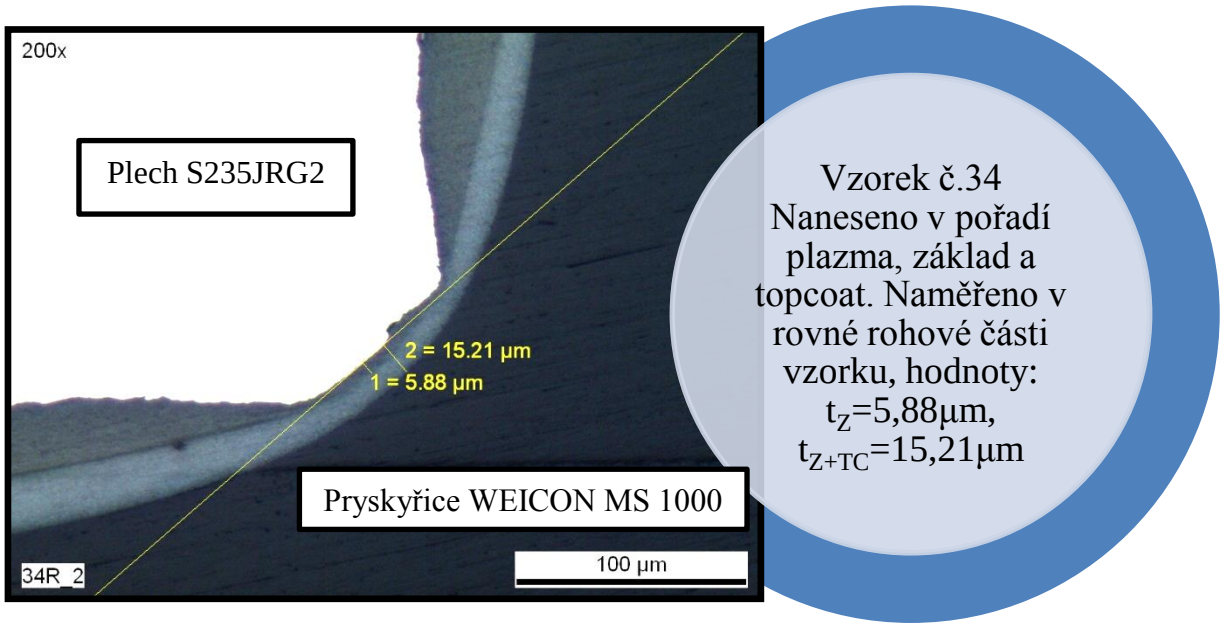
Obr. 82 Vzorek č. 34 - měřeno v obloukové části vzorku.



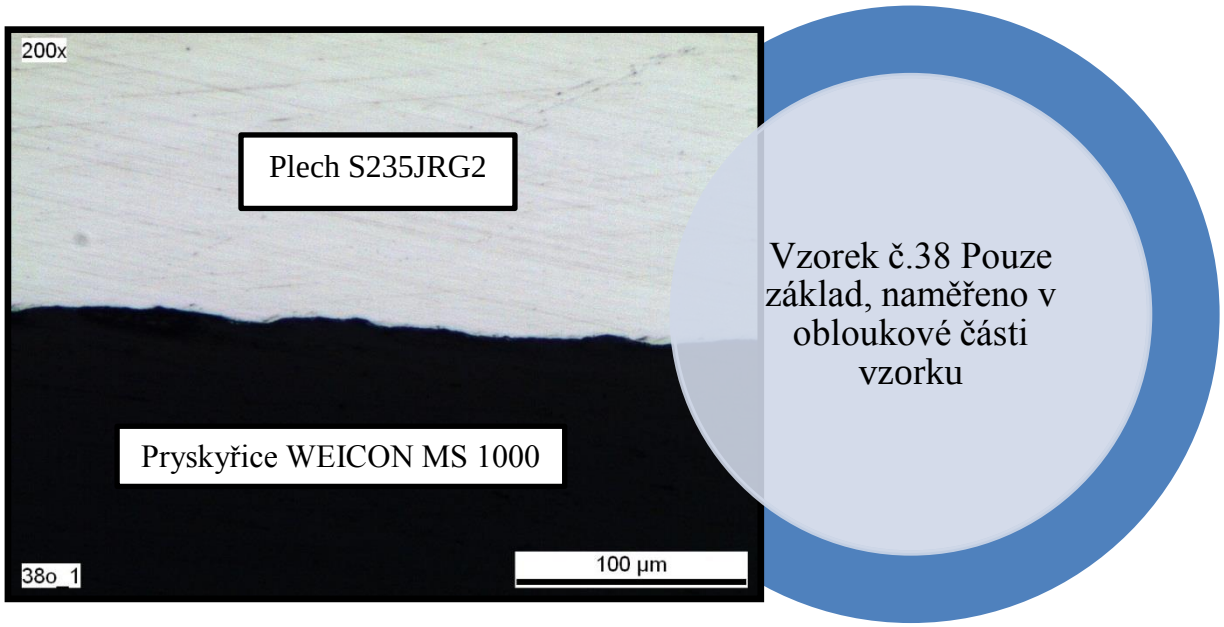
Obr. 83 Vzorek č. 34 - měřeno v obloukové rohové části vzorku.



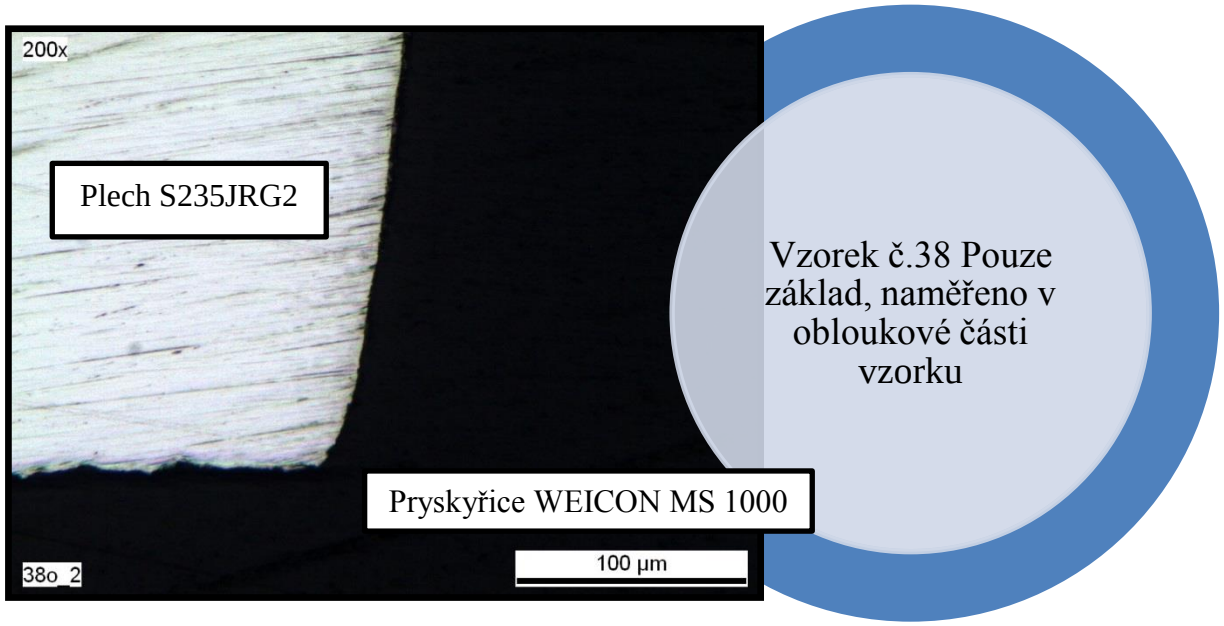
Obr. 84 Vzorek č. 34 - měřeno v rovné části vzorku.



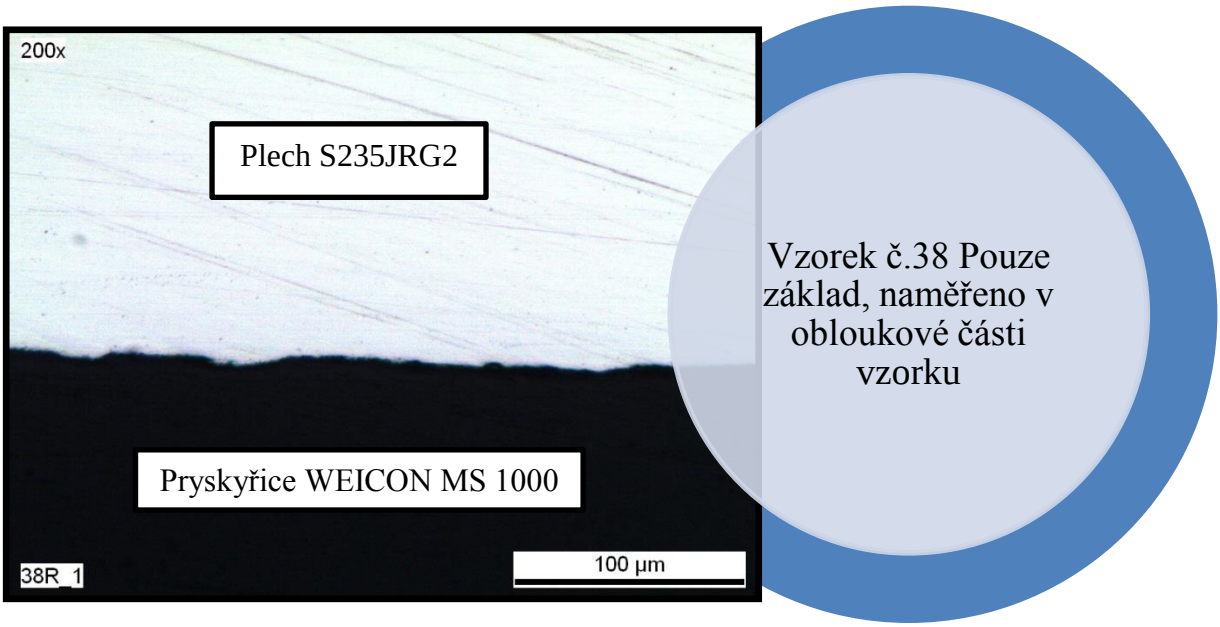
Obr. 85 Vzorek č. 34 - měřeno v rovné rohové části vzorku.



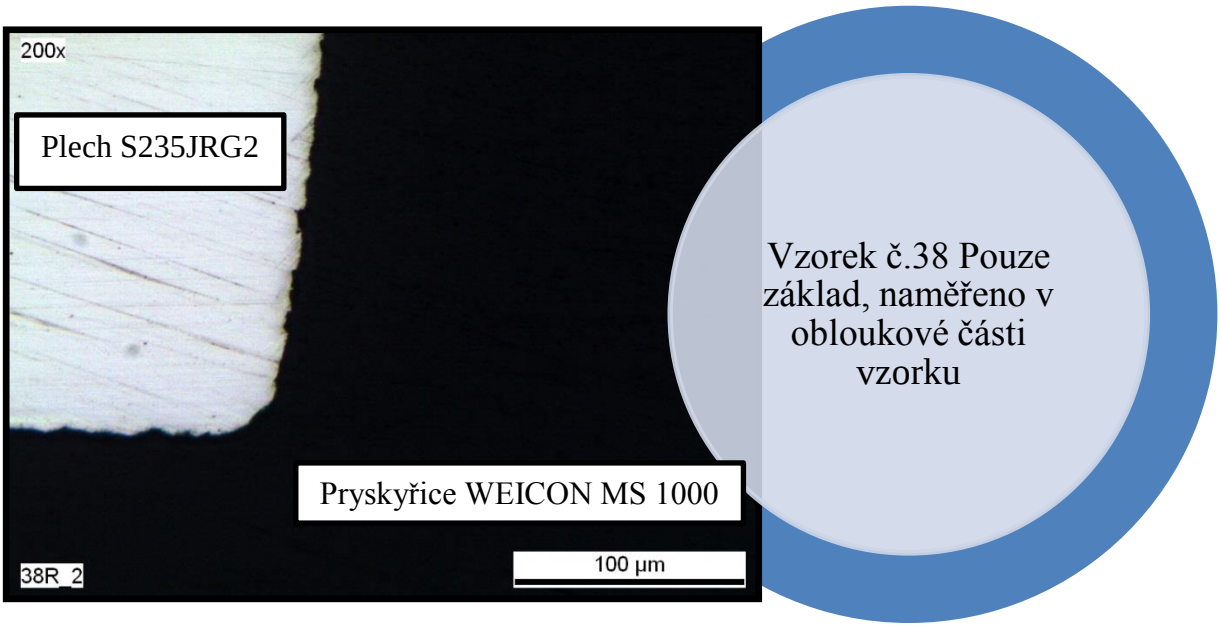
Obr. 86 Vzorek č. 38 - měřeno v obloukové části vzorku.



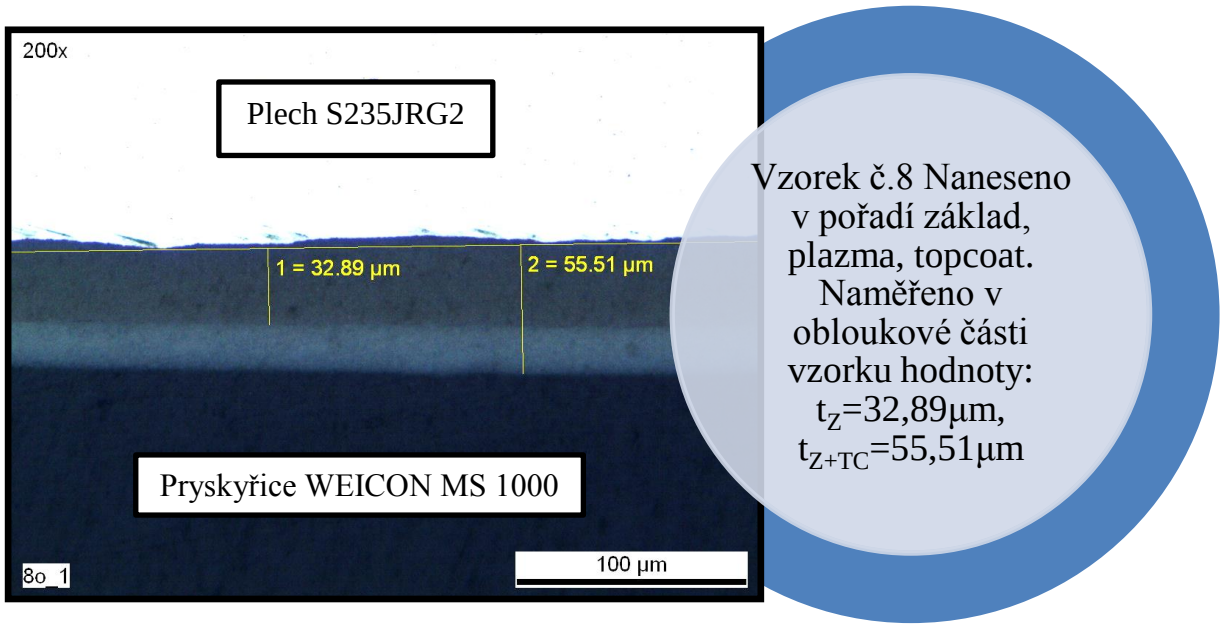
Obr. 87 Vzorek č. 38 - měřeno v obloukové rohové části vzorku.



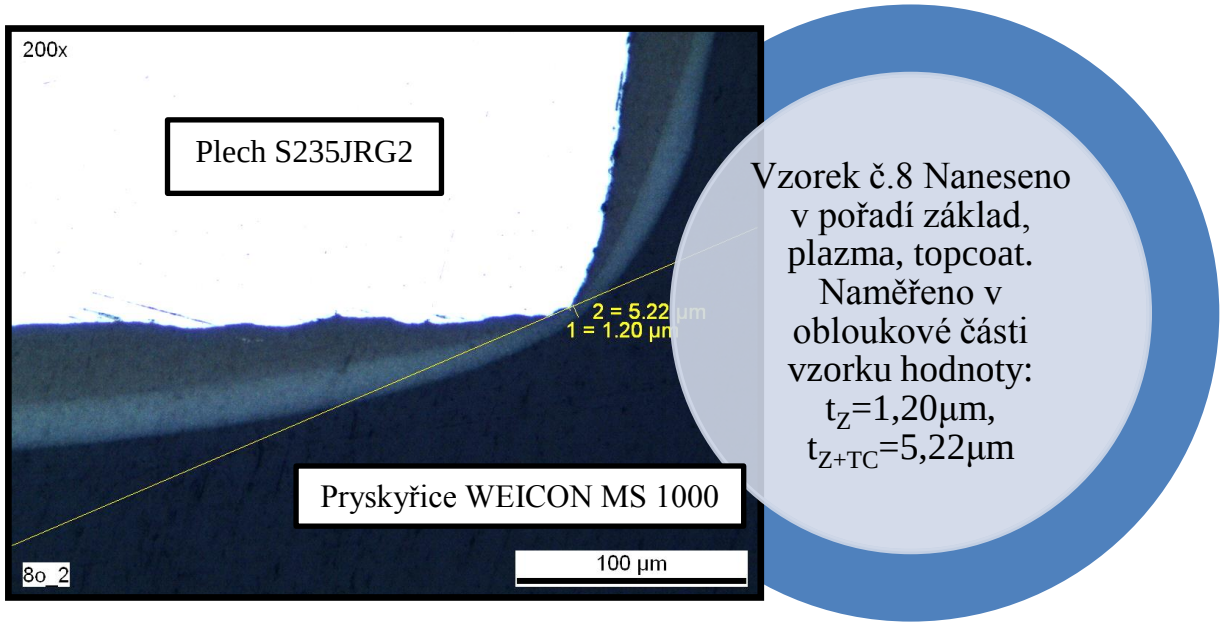
Obr. 88 Vzorek č. 38 - měřeno v rovné části vzorku.



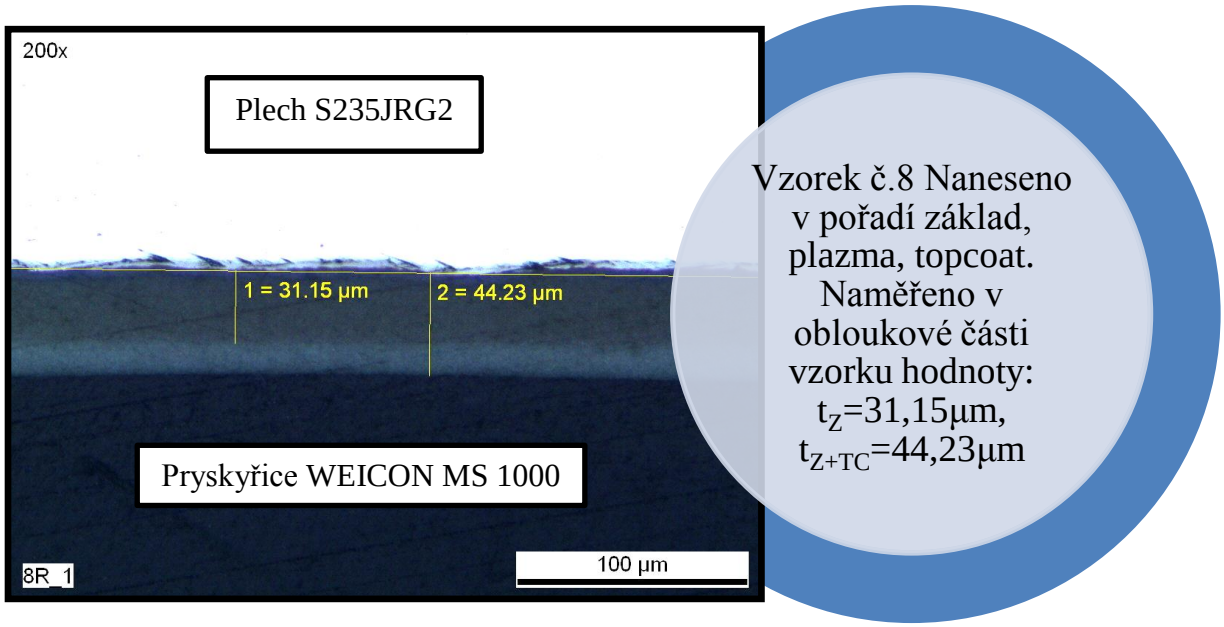
Obr. 89 Vzorek č. 38 - měřeno v rovné rohové části vzorku.



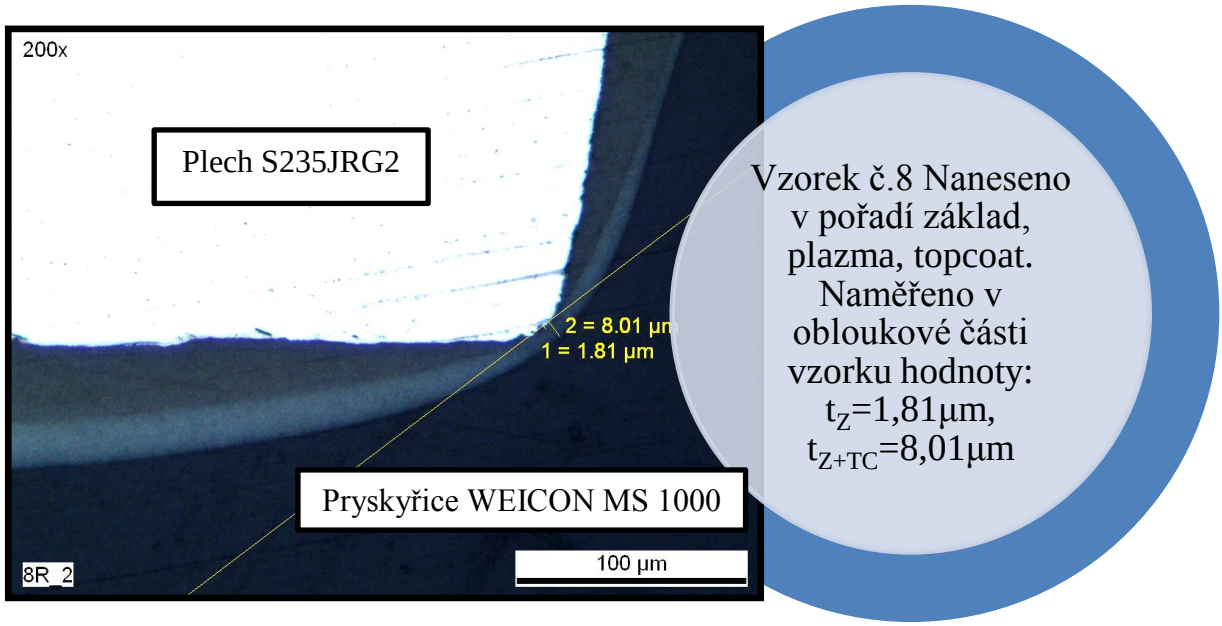
Obr. 90 Vzorek č. 8 - měřeno v obloukové části vzorku.



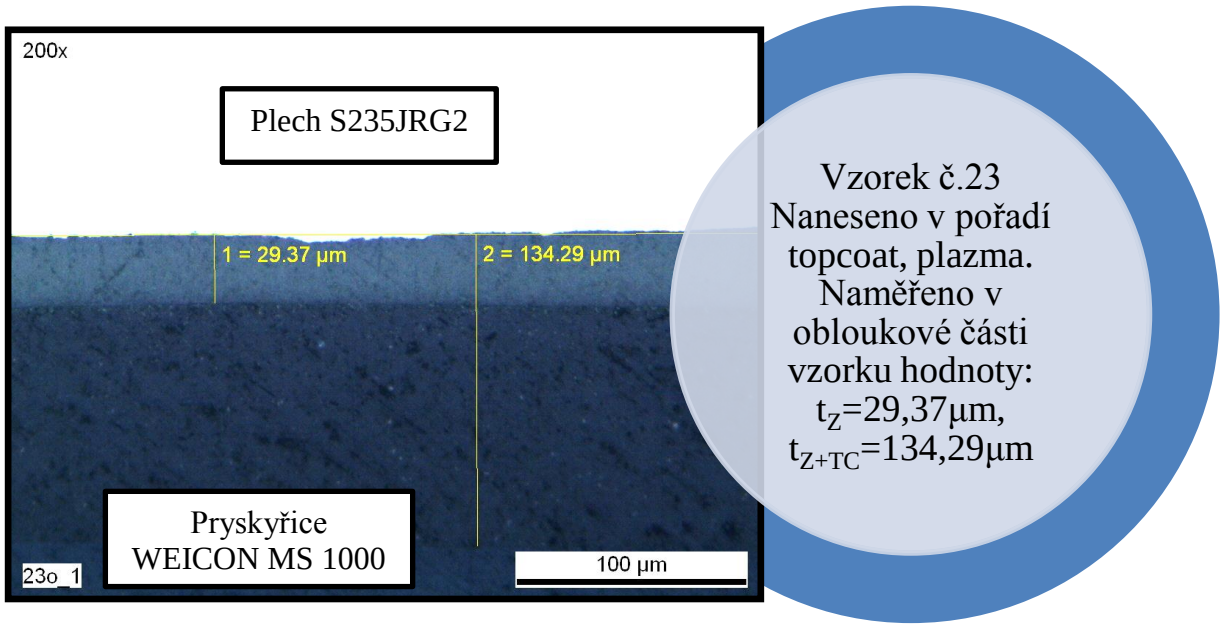
Obr. 91 Vzorek č. 8 - měřeno v obloukové rohové části vzorku.



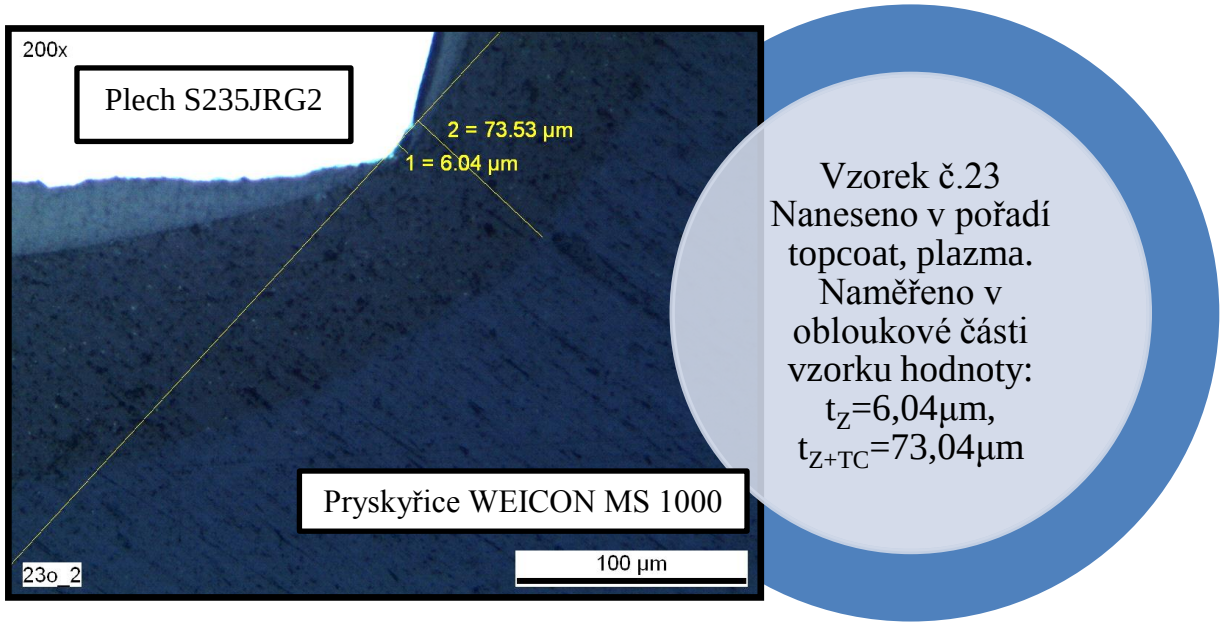
Obr. 92 Vzorek č. 8 - měřeno v rovné části vzorku.



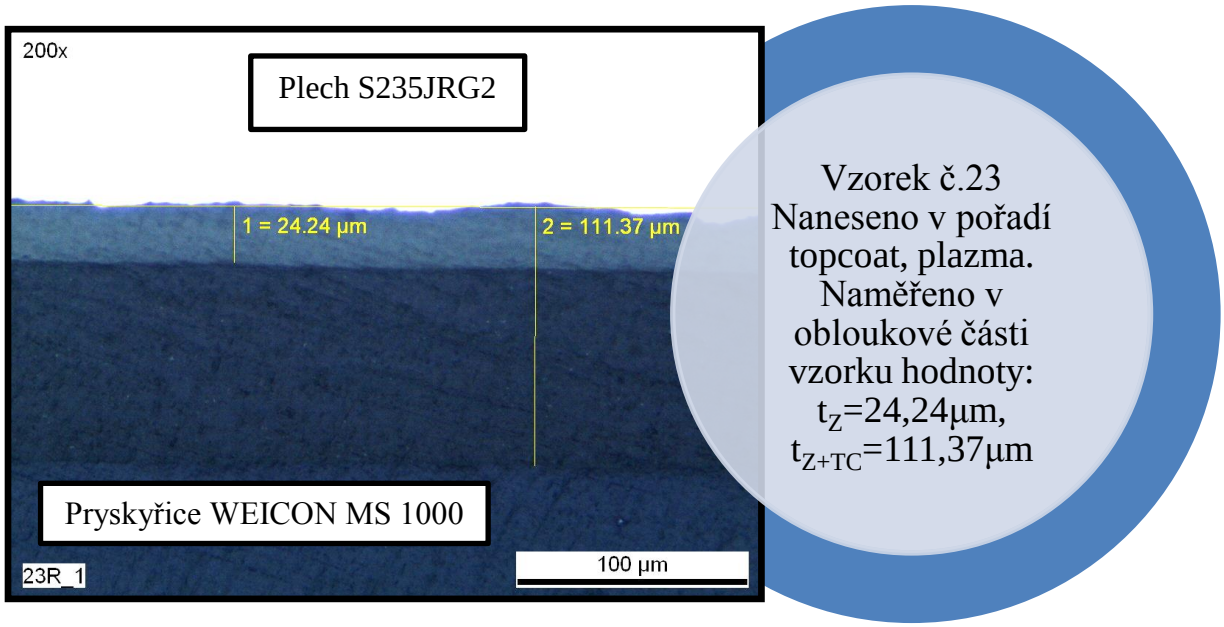
Obr. 93 Vzorek č. 8 - měřeno v rovné rohové části vzorku.



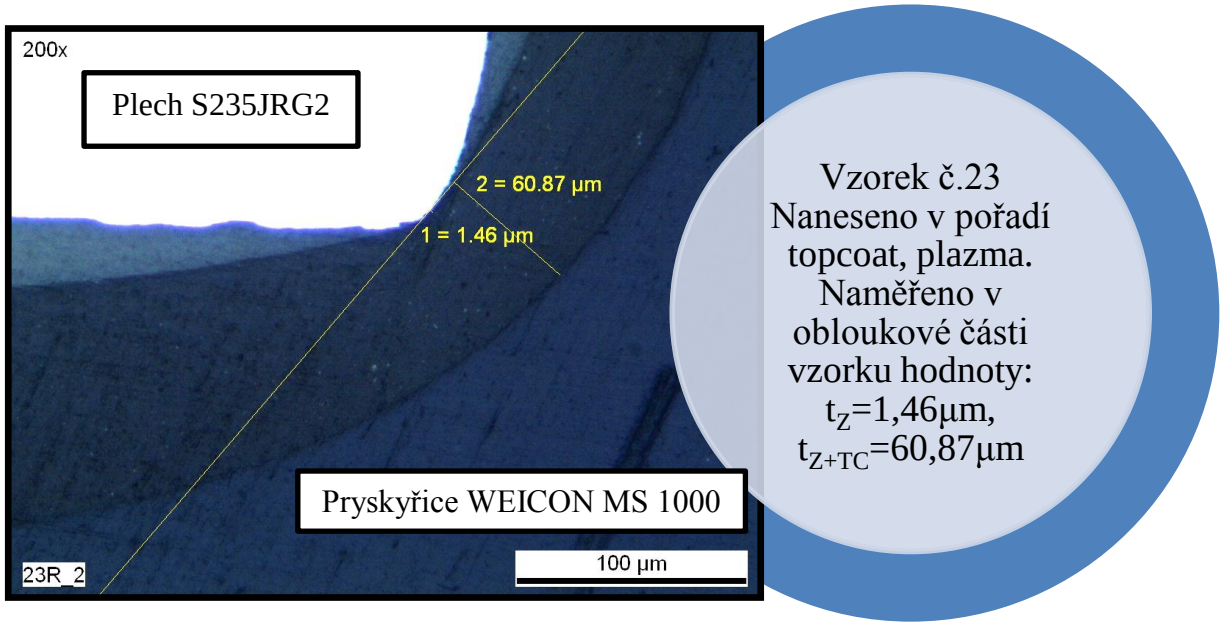
Obr. 94 Vzorek č. 23 - měřeno v obloukové části vzorku.



Obr. 95 Vzorek č. 23 - měřeno v obloukové rohové části vzorku.

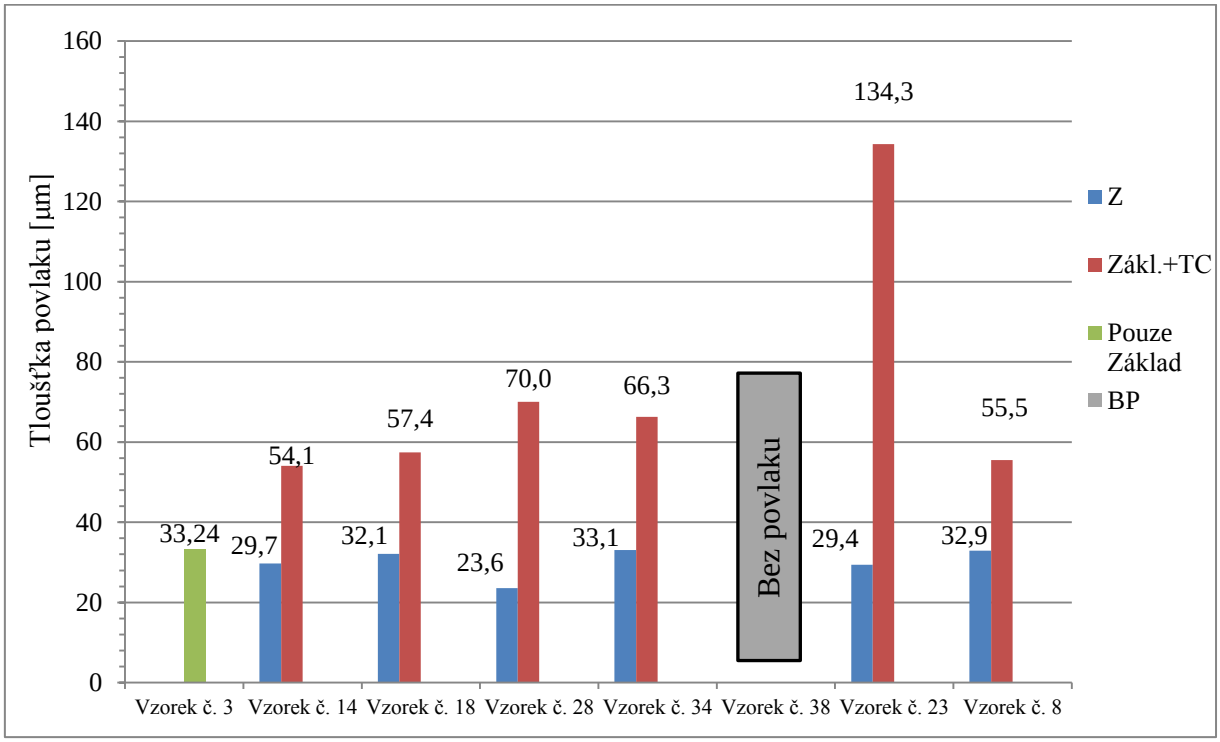


Obr. 96 Vzorek č. 23 - měřeno v rovné části vzorku.

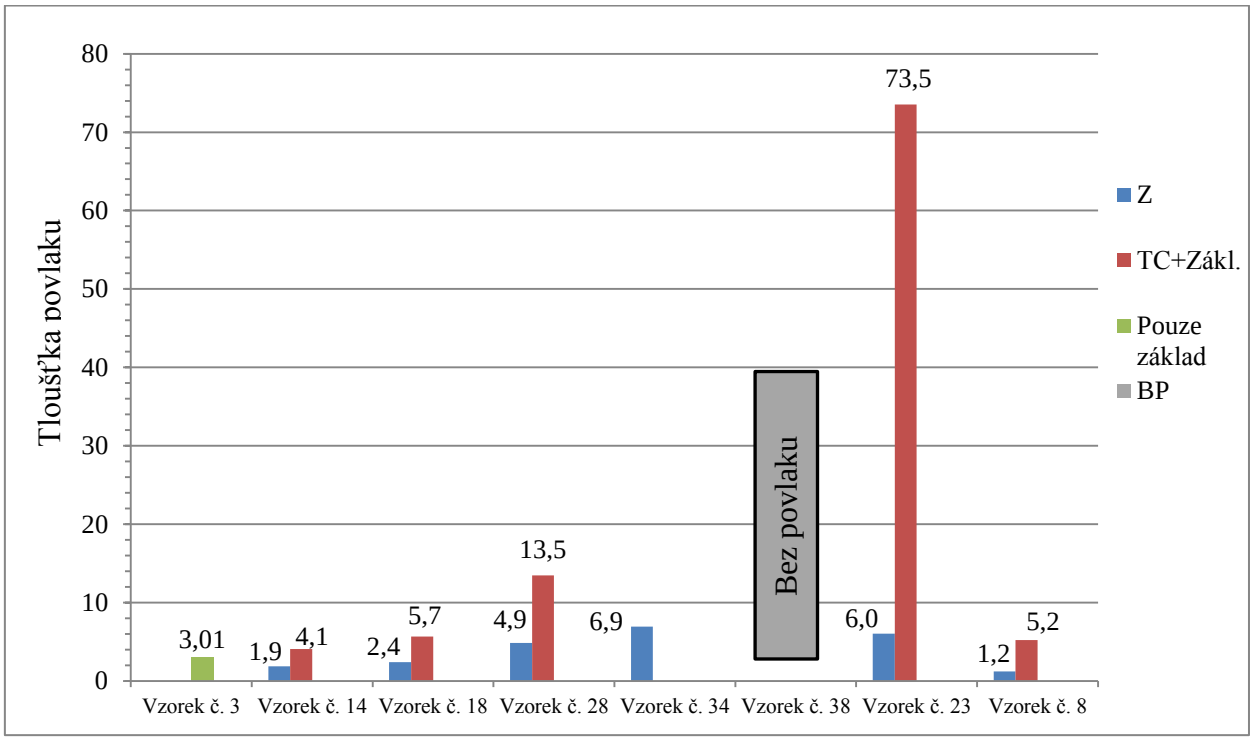


Obr. 97 Vzorek č. 23 - měřeno v rovné rohové části vzorku.

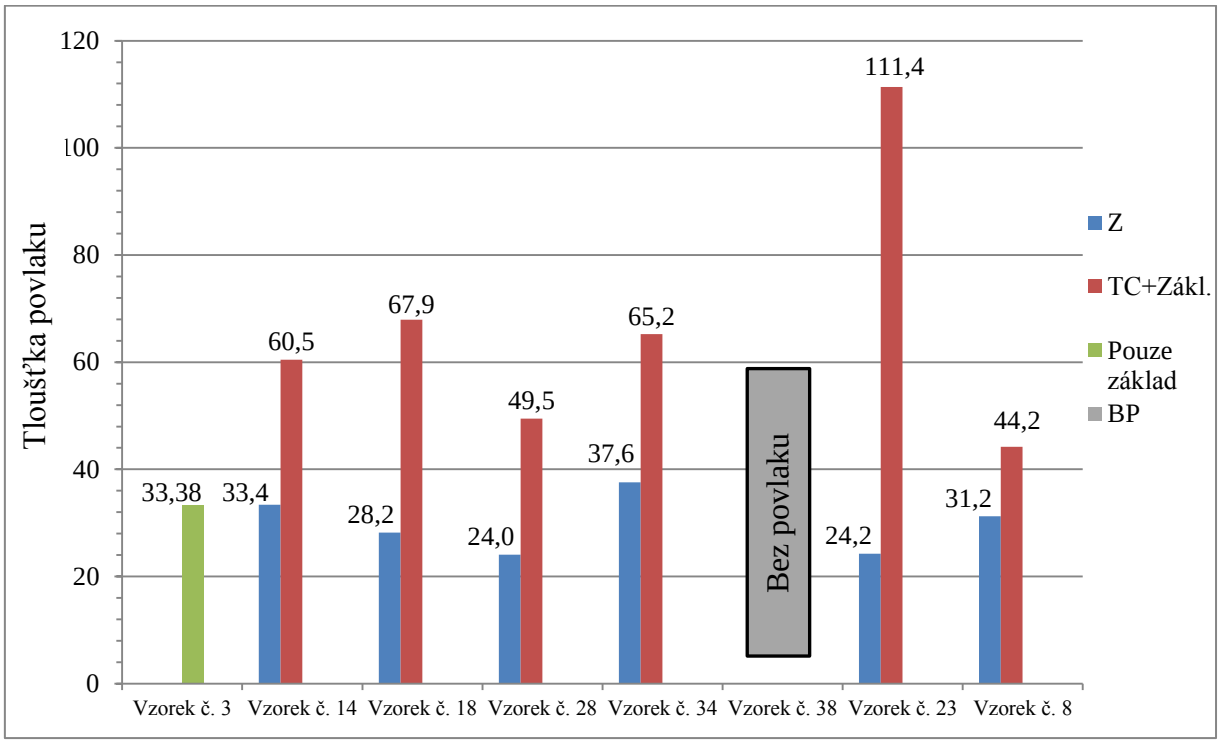
10.5.3 Grafická závislost testovaných vzorků



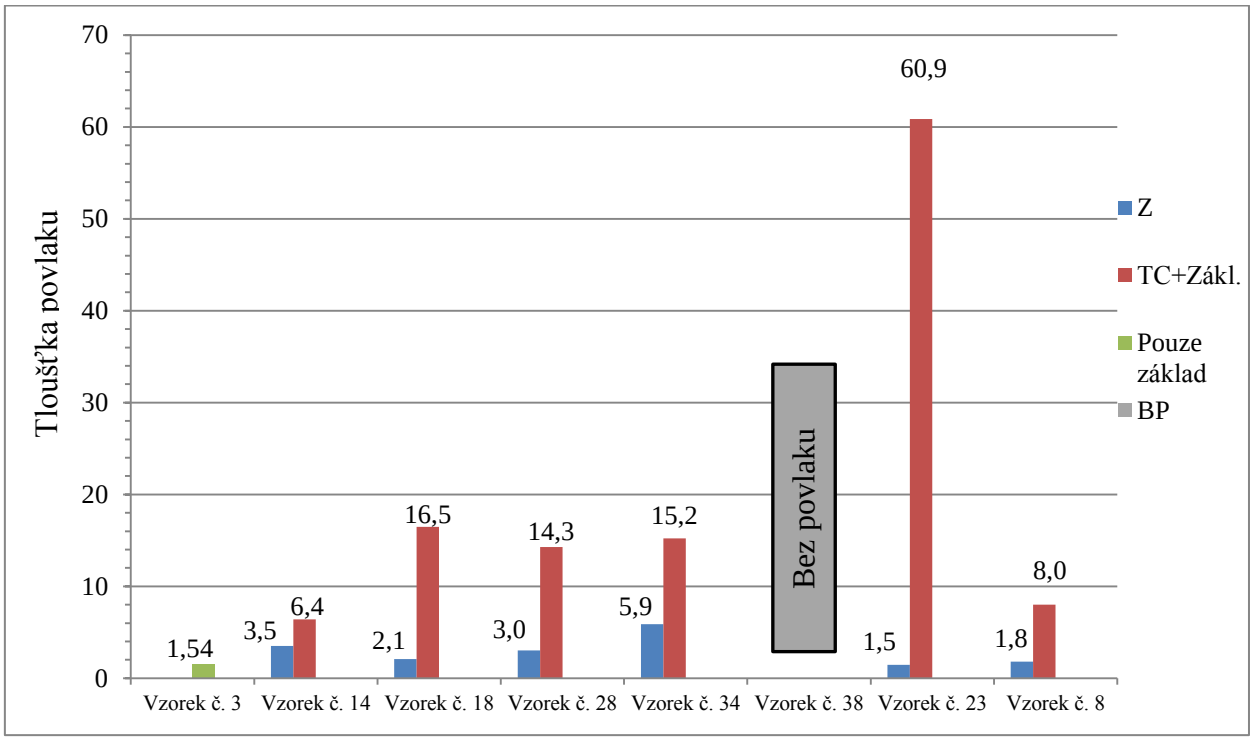
Obr. 98 Hodnoty v obloukové části vzorku.



Obr. 99 Hodnoty v obloukové rohové části vzorku.



Obr. 100 Hodnoty v rovné části vzorku.



Obr. 101 Hodnoty v rovné rohové části vzorku.

10.5.4 Výsledky z ohybové zkoušky

Tabulka 10 ukazuje, jaké hodnoty tloušťky povlaku byly u jednotlivých vzorků po ohnutí na ohýbacím přípravku. Měření je rozděleno do čtyř skupin.

Tab. 10 Testované vzorky a výsledné hodnoty z mikroskopu.
t_z = tloušťka základního povlaku, t_{z+tc} = tloušťka základního povlaku a vrchního povlaku

Vzorek	**OHNUTÝ VZOREK**			
	Měřeno v obloukové části vzorku [μm]	Měřeno v obloukové rohové části vzorku [μm]	Měřeno v rovné části vzorku [μm]	Měřeno v rovné rohové části vzorku [μm]
3	t_z = 33,24	t_z = 3,01	t_z = 33,38	t_z = 1,54
14	t_z = 29,70	t_z = 1,85	t_z = 33,37	t_z = 3,51
	t_{z+tc} = 54,07	t_{z+tc} = 4,05	t_{z+tc} = 60,45	t_{z+tc} = 6,39
18	t_z = 32,10	t_z = 2,40	t_z = 28,18	t_z = 2,10
	t_{z+tc} = 57,41	t_{z+tc} = 5,65	t_{z+tc} = 67,93	t_{z+tc} = 16,49
28	t_z = 23,55	t_z = 4,85	t_z = 24,04	t_z = 3,02
	t_{z+tc} = 70,01	t_{z+tc} = 13,47	t_{z+tc} = 49,48	t_{z+tc} = 14,27
34	t_z = 33,08	t_z = ----	t_z = 37,58	t_z = 5,88
	t_{z+tc} = 66,27	t_{tc} = 6,94	t_{z+tc} = 65,23	t_{z+tc} = 15,21
38	t_z = ----	t_z = ----	t_z = ----	t_z = ----
	t_{z+tc} = ----	t_{z+tc} = ----	t_{z+tc} = ----	t_{z+tc} = ----
8	t_z = 32,89	t_z = 1,20	t_z = 31,15	t_z = 1,81
	t_{z+tc} = 55,51	t_{z+tc} = 5,22	t_{z+tc} = 44,23	t_{z+tc} = 8,01
23	t_z = 29,37	t_z = 6,04	t_z = 24,24	t_z = 1,46
	t_{z+tc} = 134,29	t_{z+tc} = 73,04	t_{z+tc} = 111,37	t_{z+tc} = 60,87

V první skupině se měřilo v obloukové části vzorku. Druhá skupina měření se uskutečnila v obloukové rohové části vzorku. Třetí skupina vzorků byla měřena v rovné části vzorku. A čtvrtá skupina měření se uskutečnila v rovné rohové části vzorku.

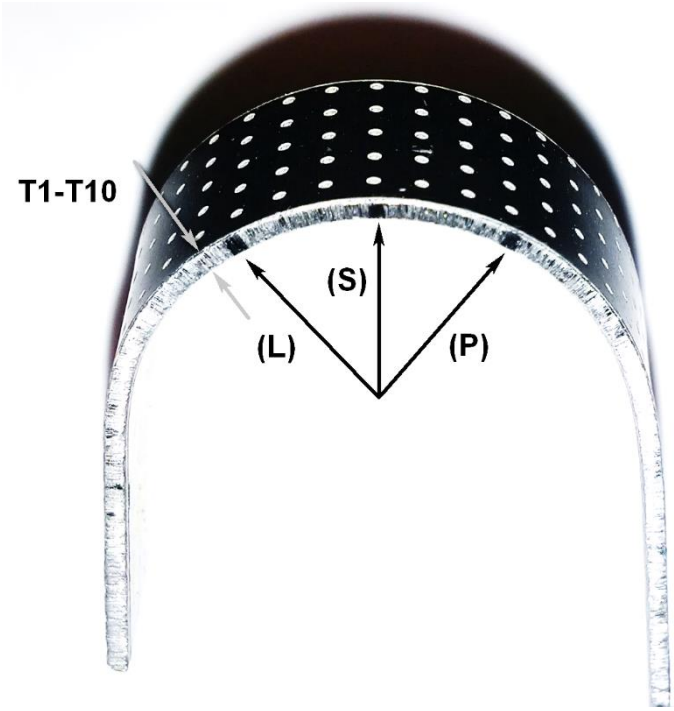
Z tabulky č. 10 je také jasně vidět, že u vzorku č. 23, kde byla nanesena plazma v pořadí BP+Z+TC+PL je u všech čtyř skupin převažující naměřená hodnota v tloušťce povlaků. Vzorek byl ošetřen mediem A_r+O_2. Tato kombinace nanesení povlaků a plazmy po ohnutí na ohýbacím přípravku se jeví jako nejpřijatelnější.

Druhý vzorek č. 28, kde byla nanesena plazma v pořadí BP+PL+Z+TC a byl ošetřen taktéž mediem A_r+O_2 a který převládal nad ostatními vzorky, měl vyšší hodnoty v obloukové části vzorku a v obloukové rohové části vzorku. V rovné části vzorku a v rovné rohové části vzorku už převládá vzorek č. 18, který nebyl ošetřen plazmou.

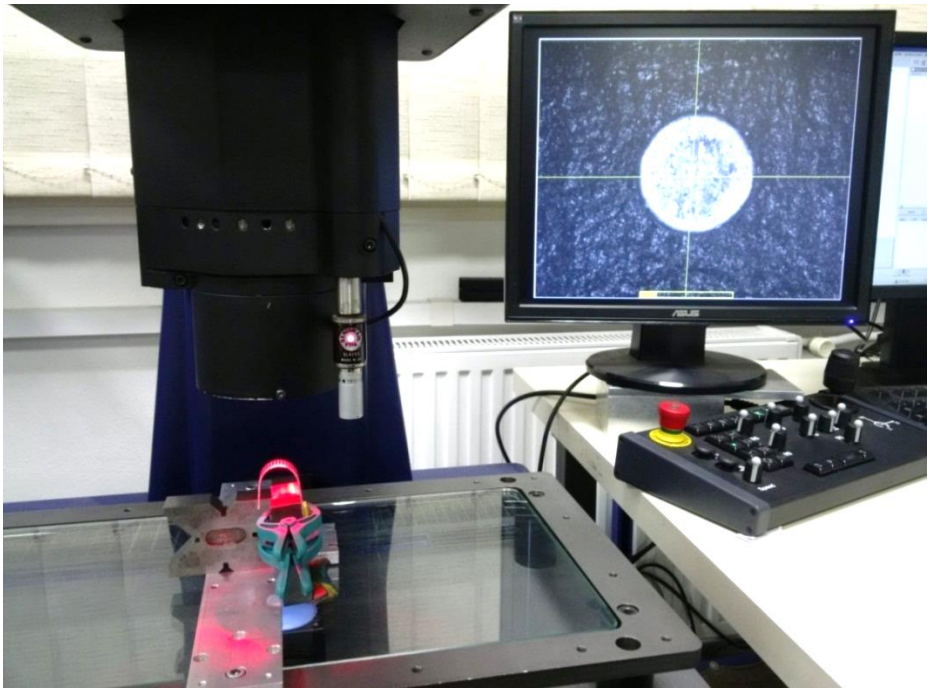
Jako další v pořadí byl vzorek č. 34, kde byla nanesena plazma v pořadí BP+PL+Z+TC. U všech čtyřech skupin je převažující naměřená hodnota v tloušťce povlaků. Vzorek byl ošetřen mediem A_r+N_2.

10.6 Vyhodnocení změny tloušťky a deformací na vybraných vzorcích

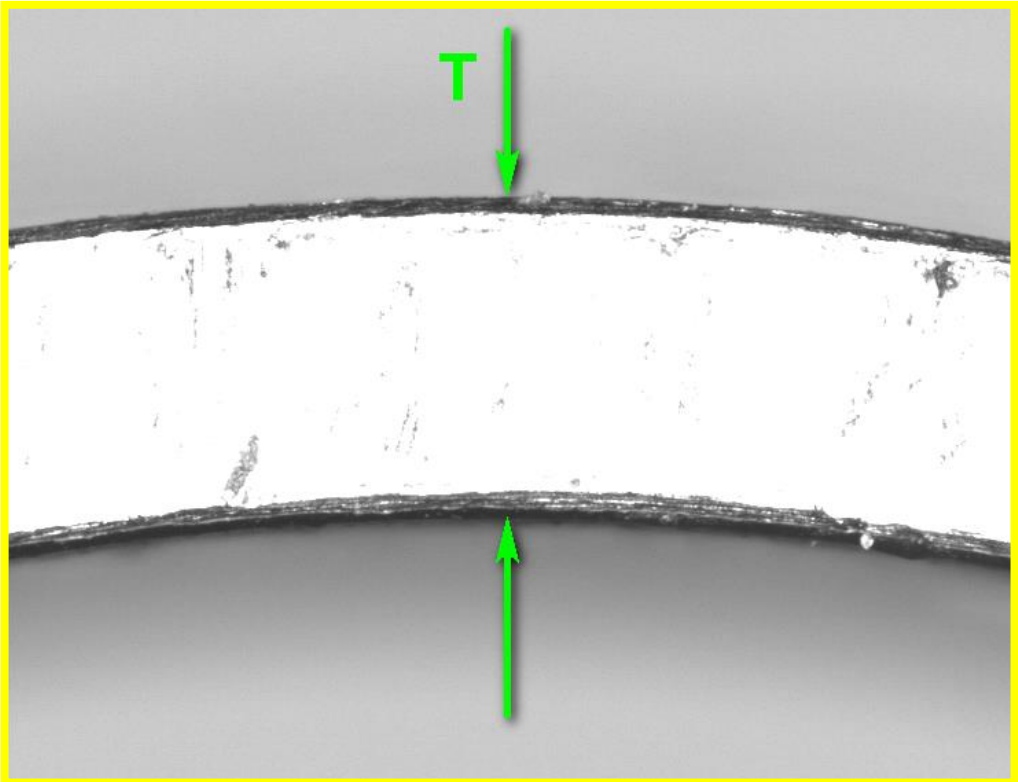
Vzorky byly ohnuty v ohýbacím přípravku. Byly sledovány změny tloušťky a deformace u vybraných následujících vzorků, viz. tab. 5. Ohnuté vzorky měly na svém povrchu nanesené kružnice. Měření bylo rozděleno na měření v levé části ohnutého vzorku (L), měření ve středu ohnutého vzorku (S) a měření v pravé části ohnutého vzorku (P). Jak je vidět z obr. 102, kružnice byly naneseny po celé šířce vzorku. Výsledky naměřených hodnot jsou uvedeny v tab. 12 až 17. Na odstupňovaném ohýbacím přípravku byly testované vzorky ohnuty na poloměrech R11, R17, R23, R29 a R35 mm.



Obr. 102 Ohnutý vzorek na ohýbacím přípravku s nanesenými kružnicemi.



Obr. 103 Měřící optické zařízení Scope-Check s přesností 0,0001 mm s upnutým vzorkem.



Obr. 104 Měřená tloušťka T na vzorku.

Naměřená tloušťka, viz. obr. 104 se měřila na ohnutém vzorku, viz. obr. 102. Výsledky k jednotlivým vzorkům jsou uvedeny v tabulce č. 11.

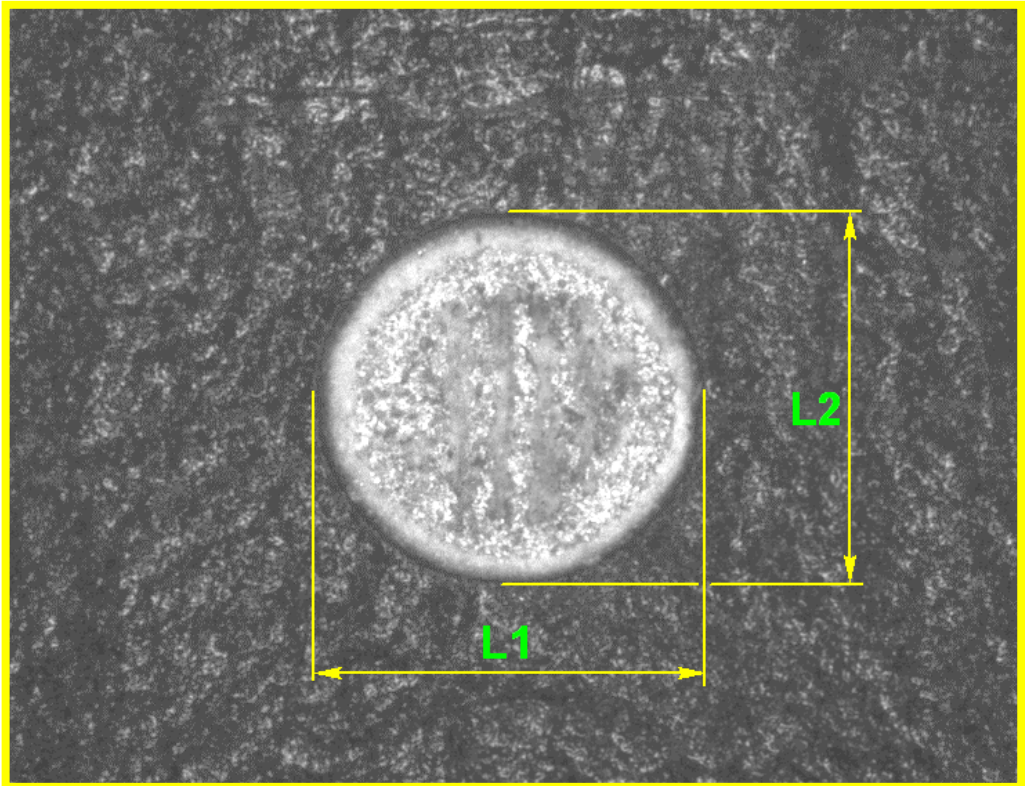
Tab. 11 Naměřená tloušťka u vybraných vzorků v [mm].

	TC12	**Z7**	**BP15**	**BP16**	**Z51**	**Z12**
T1	1,073	1,150	1,011	1,008	1,149	1,098
T2	1,077	1,132	1,018	1,004	1,152	1,093
T3	1,069	1,130	1,010	1,003	1.1503	1,098
T4	1,081	1,127	1,013	1,001	1,151	1,093
T5	1,077	1,116	1,029	1,007	1,148	1,085
T6	1,074	1,123	1,029	1,036	1,144	1,087
T7	1,075	1,123	1,033	1,011	1,139	1,080
T8	1,074	1,135	1,021	1,006	1,135	1,086
T9	1,072	1,125	1,029	1,004	1,121	1,073
T10	1,072	1,121	1,049	1,010	1,132	1,096

VYHODNOCENÍ DEFORMACÍ U SLEDOVANÝCH VZORKŮ PLECHU

Na obr. 105 je fotografie naleptané elipsy, s rozměry L_1 a L_2 na ohnutém vzorku. Při deformaci se nanesená síť kružnic mění na elipsy, kde jejich osy určují směr i velikost maximální a minimální logaritmické deformace u výlisku.

Jak je vidět z výsledků, délky L_1 jsou větší než délky L_2, což je logické, jelikož směr ohybu byl ve směru L_1. Stanovení velikosti logaritmické deformace φ_1, φ_2 a φ_3 určíme podle vzorců 23 až 25.



Obr. 105 Měřené délky po ohnutí vzorku. L_1 a L_2.

10.6.1 Stanovení tahové a tlakové deformace

U měřených ohnutých vzorků se měřila délka L_1 a L_2. U výchozího stavu se měřil průměr naleptaných kružnic, viz obr. 103. [23] Jelikož se měnila tloušťka plechu při tažení, deformace φ_3 se počítala podle vzorce 23. Výsledné deformace jednotlivých vybraných vzorků jsou uvedeny v tabulce 12 až tabulce 17.

Tab. 12 Stanovení velikosti logaritmické deformace φ_1, φ_2, φ_3 u vzorku TC12.

	L_1	L_2	φ_1	φ_2	φ_3	VZOREK
L	0,614	0,565	0,056	0,000	-0,028	TC12
	0,606	0,573	0,042	-0,015	-0,028	
	0,610	0,573	0,049	-0,015	-0,034	
	0,610	0,578	0,049	-0,006	-0,043	
	0,607	0,562	0,044	-0,033	-0,011	
S	0,611	0,564	0,050	-0,030	-0,020	
	0,615	0,569	0,056	-0,021	-0,036	
	0,611	0,570	0,050	-0,020	-0,030	
	0,615	0,569	0,057	-0,021	-0,036	
	0,611	0,559	0,050	-0,038	-0,012	
P	0,611	0,562	0,050	-0,034	-0,016	
	0,617	0,569	0,059	-0,021	-0,038	
	0,614	0,576	0,055	-0,008	-0,046	
	0,623	0,578	0,069	-0,005	-0,064	
	0,616	0,578	0,058	-0,006	-0,052	

Tab. 13 Stanovení velikosti logaritmické deformace φ_1, φ_2, φ_3 u vzorku Z7.

	L_1	L_2	φ_1	φ_2	φ_3	VZOREK
L	0,612	0,566	0,052	-0,026	-0,026	Z7
	0,620	0,569	0,064	-0,022	-0,042	
	0,624	0,568	0,072	-0,023	-0,049	
	0,613	0,572	0,053	-0,015	-0,038	
	0,619	0,563	0,063	-0,031	-0,032	
S	0,608	0,561	0,045	-0,036	-0,009	
	0,618	0,565	0,061	-0,028	-0,033	
	0,616	0,572	0,058	-0,016	-0,042	
	0,615	0,568	0,057	-0,023	-0,034	
	0,617	0,547	0,061	-0,060	-0,001	
P	0,612	0,570	0,052	-0,020	-0,032	
	0,619	0,581	0,063	0,000	-0,063	
	0,619	0,573	0,064	-0,015	-0,049	
	0,620	0,577	0,065	-0,007	-0,058	
	0,619	0,563	0,063	-0,032	-0,032	

Tab. 14 Stanovení velikosti logaritmické deformace φ_1, φ_2, φ_3 u vzorku BP15.

	L_1	L_2	φ_1	φ_2	φ_3	VZOREK
L	0,597	0,546	0,027	-0,062	0,036	BP15
	0,601	0,557	0,034	-0,042	0,008	
	0,592	0,554	0,019	-0,047	0,027	
	0,604	0,562	0,039	-0,033	-0,005	
	0,597	0,538	0,027	-0,077	0,049	
S	0,598	0,541	0,029	-0,072	0,043	
	0,580	0,555	-0,001	-0,046	0,047	
	0,591	0,553	0,017	-0,049	0,032	
	0,590	0,549	0,016	-0,056	0,040	
	0,602	0,547	0,036	-0,060	0,024	
P	0,583	0,547	0,003	-0,060	0,056	
	0,596	0,552	0,026	-0,050	0,024	
	0,602	0,546	0,036	-0,063	0,027	
	0,599	0,554	0,030	-0,047	0,017	
	0,599	0,557	0,031	-0,043	0,013	

Tab. 15 Stanovení velikosti logaritmické deformace φ1, φ2, φ3 u vzorku BP16.

	L_1	L_2	φ_1	φ_2	φ_3	VZOREK
L	0,579	0,546	-0,003	-0,063	0,066	BP16
	0,582	0,554	0,001	-0,047	0,046	
	0,588	0,562	0,012	-0,033	0,021	
	0,587	0,549	0,010	-0,057	0,047	
	0,584	0,557	0,006	-0,042	0,036	
S	0,586	0,545	0,009	-0,064	0,055	
	0,574	0,550	-0,013	-0,055	0,068	
	0,589	0,552	0,013	-0,051	0,038	
	0,590	0,561	0,015	-0,035	0,020	
	0,593	0,549	0,020	-0,057	0,037	
P	0,584	0,542	0,004	-0,069	0,065	
	0,586	0,541	0,009	-0,072	0,063	
	0,594	0,553	0,023	-0,049	0,027	
	0,591	0,556	0,017	-0,045	0,027	
	0,580	0,538	-0,003	-0,078	0,080	

Tab. 16 Stanovení velikosti logaritmické deformace φ_1, φ_2, φ_3 u vzorku $Z5_1$.

	L_1	L_2	φ_1	φ_2	φ_3	VZOREK
L	0,621	0,563	0,067	-0,032	-0,034	$Z5_1$
	0,622	0,568	0,068	-0,024	-0,045	
	0,628	0,580	0,078	-0,003	-0,075	
	0,630	0,590	0,081	0,015	-0,096	
	0,620	0,578	0,065	-0,005	-0,060	
S	0,627	0,566	0,076	-0,026	-0,050	
	0,616	0,573	0,058	-0,014	-0,044	
	0,630	0,580	0,080	-0,003	-0,078	
	0,632	0,584	0,084	0,005	-0,089	
	0,634	0,578	0,087	-0,005	-0,081	
P	0,616	0,534	0,058	-0,084	0,026	
	0,619	0,559	0,064	-0,039	-0,025	
	0,625	0,576	0,073	-0,008	-0,065	
	0,615	0,569	0,057	-0,020	-0,036	
	0,605	0,563	0,041	-0,031	-0,010	

Tab. 17 Stanovení velikosti logaritmické deformace φ_1, φ_2, φ_3 u vzorku Z12.

	L_1	L_2	φ_1	φ_2	φ_3	VZOREK
L	0,614	0,545	0,055	-0,063	0,009	Z12
	0,612	0,548	0,051	-0,059	0,008	
	0,611	0,558	0,051	-0,041	-0,010	
	0,611	0,553	0,051	-0,049	-0,002	
	0,612	0,544	0,051	-0,066	0,014	
S	0,617	0,556	0,059	-0,045	-0,015	
	0,614	0,545	0,055	-0,064	0,009	
	0,614	0,559	0,056	-0,039	-0,017	
	0,608	0,553	0,045	-0,050	0,005	
	0,623	0,540	0,069	-0,072	0,003	
P	0,610	0,261	0,049	-0,800	0,751	
	0,614	0,558	0,055	-0,041	-0,014	
	0,620	0,554	0,066	-0,048	-0,018	
	0,624	0,544	0,071	-0,065	-0,005	
	0,630	0,522	0,080	-0,107	0,026	

Poznámka k tabulkám 12 až 17:
L – měřeno v levé části ohnutého vzorku, viz obr. 102.
S – měřeno ve středu ohnutého vzorku, viz obr. 102.
P – měřeno v pravé části ohnutého vzorku, viz obr. 102.

Pro deformace φ_1 dominují kladné hodnoty až na vzorek BP16 kde jsou na levé, střední a pravé straně měřeného ohnutého vzorku i některé hodnoty záporné. Pro deformace φ_2 dominují u vybraných vzorků převážně záporné hodnoty.
Pro deformace φ_3 dominují záporné hodnoty pro vzorky TC12, Z7, $Z5_1$. U vzorků BP15, BP16 jsou hodnoty deformace φ_3 kladné. Ovšem u vzorku Z12 jsou pro deformace φ_3 hodnoty jak kladné tak záporné.

Na výsledky deformací může mít vliv i struktura konkrétního vzorku, ale toto nebylo sledováno v DDP a bude předmětem dalších experimentů ve vztahu ke struktuře plechů.
Povrchová vrstva je rozhraní dvou rozličných prostředí, kde se u kovových materiálů je třeba zabývat jeho strukturou i vlastnostmi. Struktura zahrnuje různé rozměry od atomů až po makroskopický popis. Široká oblast studia povrchů zahrnuje také hodnocení poruch a interakcí s prostředím i vliv vnějších sil.
Volný povrch kovů představuje zpravidla povrch velkého souboru zrn, tvořících rozhraní mezi pevnou fází a okolím. Povrch takového tělesa i z chemicky čistého kovu je fyzikálně velmi složitý systém. [5]

K posuzování vlastností povrchu je nutné znát modely zákonitosti "dokonalého" povrchu fyzikálně čistého kovu bez interakcí s jiným prostředím a rozdíly, jimiž se uspořádání liší od objemu uvnitř kovu. Teprve potom si lze udělat představu, jak charakterizovat "skutečný" povrch kovu, s nímž se běžně setkáváme. Mnohé vlastnosti těles souvisí víceméně s povrchem, např. drsnost povrchu ovlivňuje další fyzikální vlastnosti (odraz světla, opotřebení ap.). V mnohých případech skutečný povrch je prostředníkem působení vnějších podmínek a je tedy nutno zabývat se i vlastnostmi nebo změnami materiálu pod povrchem. Tento objem se nazývá povrchovou vrstvou, na rozdíl od povlaku, který vzniká nebo se vytváří na povrchu kovu nebo slitiny. Nevýhodou povlakovaných plechů je zvýšená možnost povrchových trhlinek v místě, kde dochází k maximálnímu zatížení při tváření. Tím dochází k následnému porušení celistvosti povrchu v místech plastické deformace, kde dochází k tomu, že korozní ochrana je narušena. Na vhodnou volbu materiálu mají vliv nejenom vlastnosti povlaku, ale také vlastnosti základního materiálu. U povlakovaných plechů se posuzuje zejména maximální dosažený stupeň deformace (stupeň tažení) a dovolená deformace povlaku, při zachování jeho ochranné funkce proti korozi. [5]

11 STATISTICKÁ KONTROLA

Někdy se při sledování biologických jevů objeví při měření na pozadí více méně stejnorodých hodnot hodnota silně odlišná – může to být vliv nějakého nového, neuvažovaného faktoru nebo chyba, způsobená např. při měření, v metodice, v přístroji apod. Takovou chybu nazýváme hrubou chybou a je nutno ji odlišit od chyby náhodné, která vzniká vlivem přirozené variability biologického materiálu. Hodnoty způsobené hrubou chybou je nutno ze souboru vyloučit. Zde je třeba si uvědomit zásadní věc: k vyloučení hodnoty ze souboru jsme oprávněni jen tehdy, je-li velmi nepravděpodobné, že tato hodnota pochází z téhož základního souboru jako ostatní hodnoty výběrového souboru. Posoudit, zda se jedná o atypickou (tj. odlehlou, extrémní) hodnotu je však možné pouze tehdy, víme-li, jaký typ rozdělení sledovaná náhodná veličina má; bez této znalosti ztrácí pojem „odlehlost“ smysl.

Na základě znalosti rozdělení daného souboru lze k objektivnímu posouzení, zda zjištěná zdánlivě odlehlá hodnota patří do souboru, použít statistických testů jako je např. Grubbsův test pro testování souborů odpovídajících normálnímu rozdělení. [46]

11.1 Grubbsův test

11.1.1 Grubbsův test u stanovení tloušťky povlaku na ohnutém měřeném vzorku

Protože byla opakovaně měřena veličina (t_z = tloušťka základu a t_{z+tc} = tloušťka základního povlaku a vrchního povlaku a hodnoty v obloukové části vzorku, v obloukové rohové části vzorku, v rovné části vzorku a hodnoty v rovné rohové části vzorku) za stejných podmínek, je třeba vyloučit případné hodnoty měření, které by mohly být způsobeny hrubou chybou při měření, a které by tedy zkreslily celkový výsledek měření. Všechny hodnoty získané měřením byly proto podrobeny statistické kontrole (Grubbsovu testu), který je schopen odhalit, zda odchylky krajních naměřených hodnot (minima a maxima) v sérii měření jsou důsledkem hrubé chyby při měření a je tedy nutné je ze souboru naměřených hodnot vyloučit, nebo zda jsou všechny výsledky měření použitelné.

Testovaná veličina:

$$\tau = \frac{\bar{x} - x_{(1)}}{s} \tag{43}$$

Respektive:

$$\tau = \frac{x_{(n)} - \bar{x}}{s} \tag{44}$$

Výběrový aritmetický průměr:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^{n} x_i \tag{45}$$

Výběrová směrodatná odchylka:

$$s = \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^{n} (x_i - \bar{x})^2} \tag{46}$$

Jestliže τ>Tp (T_p - kritické hodnoty Grubbsova testu – tab. č. 18), pak na úrovni pravděpodobnosti a = p zamítneme nulovou hypotézu. V případě zamítnutí H_o vyloučíme příslušné odlehlé pozorovaní ze souboru použitelných hodnot a musíme opravit výběrový aritmeticky průměr a výběrovou směrodatnou odchylku. [46]

Tab. 18 Kritické hodnoty T_p Grubbsova testu. [46]

n \ p	0,05	0,01	n \ p	0,05	0,01
3	1,412	1,414	15	2,493	2,800
4	1,689	1,723	16	2,523	2,837
5	1,869	1,955	17	2,551	2,871
6	1,996	2,130	18	2,577	2,903
7	2,093	2,265	19	2,600	2,932
8	2,172	2,374	20	2,623	2,959
9	2,237	2,464	21	2,644	2,984
10	2,294	2,540	22	2,664	3,008
11	2,343	2,606	23	2,683	3,030
12	2,387	2,663	24	2,701	3,051
13	2,426	2,714	25	2,717	3,071
14	2,461	2,759			

Test významnosti rozdílu mezi středními hodnotami, jestliže rozptyly nejsou stejné

Tloušťka povlaku [μm] s rozdílným nanášením plazmy a použitým médiem byla měřena na čtyřech místech. V obloukové části vzorku, v obloukové rohové části vzorku, v rovné části vzorku a hodnoty v rovné rohové části vzorku.

Byla zvolena úroveň pravděpodobnosti p = 0,01, tedy 99 %. Pro tuto úroveň pravděpodobnosti a počet měření n = 7 je T_p = 2,265 a počet měření n = 6 je T_p = 2,130.
Příklad výpočtu testované veličiny pro vzorky 3, 14, 18, 28, 34, 8, 23 v obloukové části vzorku:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^{n} x_i = \frac{1}{7} \cdot (33{,}24 + 29{,}70 + 32{,}10 + 23{,}55 + 33{,}08 + 32{,}89 + 29{,}37) = 30{,}56 \mu m$$

$$s = \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^{n} (x_i - \bar{x})^2} =$$

$$= \sqrt{\frac{1}{7}(33{,}24 - 30{,}56)^2 + (29{,}70 - 30{,}56)^2 + (32{,}10 - 30{,}56)^2 + (23{,}55 - 30{,}56)^2 +}$$

$$\sqrt{+(33{,}08 - 30{,}56)^2 + (32{,}89 - 30{,}56)^2 + (29{,}37 - 30{,}56)^2} = 3{,}222$$

$$\tau_1 = \frac{\bar{x} - x_{(\min)}}{s} = \frac{30{,}56 - 23{,}55}{3{,}222} = 2{,}176 \leq 2{,}265 \Rightarrow vyhovuje$$

$$\tau_2 = \frac{\bar{x} - x_{(\max)}}{s} = \frac{30{,}56 - 33{,}24}{3{,}222} = 0{,}832 \leq 2{,}265 \Rightarrow vyhovuje$$

Tab. 19 Výsledky vyhodnocení Grubbsova testu u tloušťky povlaku v obloukové části vzorku.

VZOREK	3	14	18	28	34	8	23
Tloušťka základního povlaku v obloukové části vzorku [µm]	33,24	29,70	32,10	23,55	33,08	32,89	29,37
Aritmetický průměr	30,56						
Směrodatná odchylka	3,222						
Grubbsova kritéria τ1	2,176						
Grubbsova kritéria τ2	0,832						
Kritická hodnota Tp (n=7,α=0,01)	**2,265**						
Minimální naměřená hodnota	VYHOVUJE						
Maximální naměřená hodnota	VYHOVUJE						

Tab. 20 Výsledky vyhodnocení Grubbsova testu u tloušťky povlaku v obloukové části vzorku.

VZOREK	14	18	28	34	8	23
Tloušťka základního povlaku a vrchního povlaku v obloukové části vzorku [µm]	54,07	57,41	70,01	66,27	55,51	134,29
Aritmetický průměr	72,93					
Směrodatná odchylka	28,042					
Grubbsova kritéria τ_1	0,672					
Grubbsova kritéria τ_2	2,188					
Kritická hodnota Tp (n=6,α=0,01)	**2,130**					
Minimální naměřená hodnota	VYHOVUJE					
Maximální naměřená hodnota	NEVYHOVUJE					

Tab. 21 Výsledky vyhodnocení Grubbsova testu u tloušťky povlaku v obloukové rohové části vzorku.

VZOREK	3	14	18	28	8	23
Tloušťka základního povlaku v obloukové rohové části vzorku [µm]	3,01	1,85	2,40	4,85	1,20	6,04
Aritmetický průměr	3,23					
Směrodatná odchylka	1,697					
Grubbsova kritéria τ_1	1,193					
Grubbsova kritéria τ_2	1,659					
Kritická hodnota Tp (n=6,α=0,01)	**2,130**					
Minimální naměřená hodnota	VYHOVUJE					
Maximální naměřená hodnota	VYHOVUJE					

Tab. 22 Výsledky vyhodnocení Grubbsova testu u tloušťky povlaku v obloukové rohové části vzorku.

VZOREK	14	18	28	34	8	23
Tloušťka základního povlaku a vrchního povlaku v obloukové rohové části vzorku [µm]	4,05	5,65	13,47	6,94	5,22	73,04
Aritmetický průměr	18,06					
Směrodatná odchylka	24,775					
Grubbsova kritéria τ_1	0,566					
Grubbsova kritéria τ_2	2,219					
Kritická hodnota Tp (n=6,α=0,01)	**2,130**					
Minimální naměřená hodnota	VYHOVUJE					
Maximální naměřená hodnota	NEVYHOVUJE					

Tab. 23 Výsledky vyhodnocení Grubbsova testu u tloušťky povlaku v rovné části vzorku.

VZOREK	3	14	18	28	34	8	23
Tloušťka základního povlaku v rovné části vzorku [µm]	33,38	33,37	28,18	24,04	37,58	31,15	24,24
Aritmetický průměr	35,32						
Směrodatná odchylka	5,894						
Grubbsova kritéria τ_1	1,914						
Grubbsova kritéria τ_2	0,383						
Kritická hodnota Tp (n=7,α=0,01)	**2,265**						
Minimální naměřená hodnota	VYHOVUJE						
Maximální naměřená hodnota	VYHOVUJE						

Tab. 24 Výsledky vyhodnocení Grubbsova testu u tloušťky povlaku v rovné části vzorku.

VZOREK	14	18	28	34	8	23
Tloušťka základního povlaku a vrchního povlaku v rovné části vzorku [µm]	60,45	67,93	49,48	65,23	44,23	111,37
Aritmetický průměr	66,45					
Směrodatná odchylka	21,753					
Grubbsova kritéria τ_1	1,021					
Grubbsova kritéria τ_2	2,065					
Kritická hodnota Tp (n=6,α=0,01)	**2,130**					
Minimální naměřená hodnota	VYHOVUJE					
Maximální naměřená hodnota	VYHOVUJE					

Tab. 25 Výsledky vyhodnocení Grubbsova testu u tloušťky povlaku v rovné rohové části vzorku.

VZOREK	3	14	18	28	34	8	23
Tloušťka základního povlaku v rovné rohové části vzorku [µm]	1,54	3,51	2,10	3,02	5,88	1,81	1,46
Aritmetický průměr	3,22						
Směrodatná odchylka	1,487						
Grubbsova kritéria τ_1	1,184						
Grubbsova kritéria τ_2	1,789						
Kritická hodnota Tp (n=7,α=0,01)	**2,265**						
Minimální naměřená hodnota	VYHOVUJE						
Maximální naměřená hodnota	VYHOVUJE						

Tab. 26 Výsledky vyhodnocení Grubbsova testu u tloušťky povlaku v rovné rohové části vzorku.

VZOREK	14	18	28	34	8	23
Tloušťka základního povlaku a vrchního povlaku v rovné rohové části vzorku [µm]	6,39	16,49	14,27	15,21	8,01	60,87
Aritmetický průměr	20,21					
Směrodatná odchylka	18,562					
Grubbsova kritéria τ_1	0,744					
Grubbsova kritéria τ_2	2,191					
Kritická hodnota Tp (n=6,α=0,01)	**2,130**					
Minimální naměřená hodnota	VYHOVUJE					
Maximální naměřená hodnota	NEVYHOVUJE					

Poznámka:
Vzorek 38 je bez povlaku. Výsledky nejsou do Grubbsova testu započítány. U vzorku 3 byl nanesen pouze základní povlak. U vzorku 34 v obloukové rohové části nebyl naměřen základní povlak ale pouze vrchní povlak.

Vyhodnocení Grubbsova testu u stanovení tloušťky povlaku na ohnutém měřeném vzorku

Z důvodu opakovaného měření stejné veličiny je nutné vyloučit případné hodnoty měření, které by mohly být způsobeny hrubou chybou při měření, a které by tedy zkreslily celkový výsledek měření. Všechny hodnoty získané měřením byly proto podrobeny statistické kontrole - Grubbsovu testu. Odchylky krajních naměřených hodnot (minima a maxima) v sérii měření nejsou důsledkem hrubé chyby při měření a jsou tedy všechny výsledky měření použitelné. Avšak, v tab. 20. u tloušťky povlaku v obloukové části vzorku nevyhovuje maximální naměřená hodnota. V tab. 22 u tloušťky povlaku v obloukové rohové části vzorku nevyhovuje maximální naměřená hodnota. A v tab. 26 u tloušťky povlaku v rovné rohové části vzorku nevyhovuje maximální naměřená hodnota.

Jedná se o vzorek č. 23, který má opakovatelně vyšší hodnoty tloušťky základního povlaku a vrchního povlaku než ostatní vzorky.

11.1.2 Grubbsův test pro délky L_1 a L_2 na ohnutém měřeném vzorku

U měřených ohnutých vzorků se měřila délka L_1 a L_2. Protože byla opakovaně měřena veličina L_1 a L_2 za stejných podmínek, je třeba vyloučit případné hodnoty měření, které by mohly být způsobeny hrubou chybou při měření, a které by tedy zkreslily celkový výsledek měření. Všechny hodnoty získané měřením byly proto podrobeny statistické kontrole (Grubbsovu testu), který je schopen odhalit, zda odchylky krajních naměřených hodnot

(minima a maxima) v sérii měření jsou důsledkem hrubé chyby při měření a je tedy nutné je ze souboru naměřených hodnot vyloučit, nebo zda jsou všechny výsledky měření použitelné. Byla zvolena úroveň pravděpodobnosti p = 0,01, tedy 99 %. Pro tuto úroveň pravděpodobnosti a počet měření n = 5 je T_p = 1,955.

Tab. 27 Výsledky vyhodnocení Grubbsova testu na ohnutém vzorku u měřených délek elipsy L_1 a L_2

VZOREK	**TC12**				
Měřená délka kružnice ve středu ohýbaného vzorku L1 [mm]	0,611	0,615	0,611	0,615	0,611
Aritmetický průměr	0,204				
Směrodatná odchylka	0,236				
Grubbsova kritéria τ_1	1,724				
Grubbsova kritéria τ_2	1,743				
Kritická hodnota Tp (n=5,α=0,01)	**1,955**				
Minimální naměřená hodnota	VYHOVUJE				
Maximální naměřená hodnota	VYHOVUJE				
Měřená délka kružnice ve středu ohýbaného vzorku L2 [mm]	0,564	0,569	0,570	0,569	0,559
Aritmetický průměr	0,189				
Směrodatná odchylka	0,218				
Grubbsova kritéria τ_1	1,701				
Grubbsova kritéria τ_2	1,747				
Kritická hodnota Tp (n=5,α=0,01)	**1,955**				
Minimální naměřená hodnota	VYHOVUJE				
Maximální naměřená hodnota	VYHOVUJE				

Tab. 28 Výsledky vyhodnocení Grubbsova testu na ohnutém vzorku u měřených délek elipsy L_1 a L_2.

VZOREK	**Z7**				
Měřená délka kružnice ve středu ohýbaného vzorku L1 [mm]	0,608	0,618	0,616	0,615	0,617
Aritmetický průměr	0,205				
Směrodatná odchylka	0,237				
Grubbsova kritéria τ_1	1,702				
Grubbsova kritéria τ_2	1,745				
Kritická hodnota Tp (n=5,α=0,01)	**1,955**				
Minimální naměřená hodnota	VYHOVUJE				
Maximální naměřená hodnota	VYHOVUJE				
Měřená délka kružnice ve středu ohýbaného vzorku L2 [mm]	0,561	0,565	0,572	0,568	0,547
Aritmetický průměr	0,187				
Směrodatná odchylka	0,217				
Grubbsova kritéria τ_1	1,662				
Grubbsova kritéria τ_2	1,775				
Kritická hodnota Tp (n=5,α=0,01)	**1,955**				
Minimální naměřená hodnota	VYHOVUJE				
Maximální naměřená hodnota	VYHOVUJE				

Tab. 29 Výsledky vyhodnocení Grubbsova testu na ohnutém vzorku u měřených délek elipsy L_1 a L_2.

VZOREK	**BP15**				
Měřená délka kružnice ve středu ohýbaného vzorku L1 [mm]	0,598	0,580	0,591	0,590	0,602
Aritmetický průměr	0,197				
Směrodatná odchylka	0,228				
Grubbsova kritéria τ_1	1,679				
Grubbsova kritéria τ_2	1,775				
Kritická hodnota Tp (n=5,α=0,01)	**1,955**				
Minimální naměřená hodnota	VYHOVUJE				
Maximální naměřená hodnota	VYHOVUJE				
Měřená délka kružnice ve středu ohýbaného vzorku L2 [mm]	0,541	0,555	0,553	0,549	0,547
Aritmetický průměr	0,183				
Směrodatná odchylka	0,211				
Grubbsova kritéria τ_1	1,692				
Grubbsova kritéria τ_2	1,759				
Kritická hodnota Tp (n=5,α=0,01)	**1,955**				
Minimální naměřená hodnota	VYHOVUJE				
Maximální naměřená hodnota	VYHOVUJE				

Tab. 30 Výsledky vyhodnocení Grubbsova testu na ohnutém vzorku u měřených délek elipsy L_1 a L_2.

VZOREK	**BP16**				
Měřená délka kružnice ve středu ohýbaného vzorku L1 [mm]	0,586	0,574	0,589	0,590	0,593
Aritmetický průměr	0,195				
Směrodatná odchylka	0,226				
Grubbsova kritéria τ_1	1,676				
Grubbsova kritéria τ_2	1,761				
Kritická hodnota Tp (n=5,α=0,01)	**1,955**				
Minimální naměřená hodnota	VYHOVUJE				
Maximální naměřená hodnota	VYHOVUJE				
Měřená délka kružnice ve středu ohýbaného vzorku L2 [mm]	0,545	0,550	0,552	0,561	0,549
Aritmetický průměr	0,184				
Směrodatná odchylka	0,212				
Grubbsova kritéria τ_1	1,702				
Grubbsova kritéria τ_2	1,777				
Kritická hodnota Tp (n=5,α=0,01)	**1,955**				
Minimální naměřená hodnota	VYHOVUJE				
Maximální naměřená hodnota	VYHOVUJE				

Tab. 31 Výsledky vyhodnocení Grubbsova testu na ohnutém vzorku u měřených délek elipsy L_1 a L_2.

VZOREK	**Z5₁**				
Měřená délka kružnice ve středu ohýbaného vzorku L1 [mm]	0,627	0,616	0,630	0,632	0,634
Aritmetický průměr	0,209				
Směrodatná odchylka	0,242				
Grubbsova kritéria τ_1	1,683				
Grubbsova kritéria τ_2	1,757				
Kritická hodnota Tp (n=5,α=0,01)	**1,955**				
Minimální naměřená hodnota	VYHOVUJE				
Maximální naměřená hodnota	VYHOVUJE				
Měřená délka kružnice ve středu ohýbaného vzorku L2 [mm]	0,566	0,573	0,580	0,584	0,578
Aritmetický průměr	0,192				
Směrodatná odchylka	0,222				
Grubbsova kritéria τ_1	1,686				
Grubbsova kritéria τ_2	1,767				
Kritická hodnota Tp (n=5,α=0,01)	**1,955**				
Minimální naměřená hodnota	VYHOVUJE				
Maximální naměřená hodnota	VYHOVUJE				

Tab. 32 Výsledky vyhodnocení Grubbsova testu na ohnutém vzorku u měřených délek elipsy L_1 a L_2.

VZOREK	**Z12**				
Měřená délka kružnice ve středu ohýbaného vzorku L1 [mm]	0,617	0,614	0,614	0,608	0,623
Aritmetický průměr	0,205				
Směrodatná odchylka	0,237				
Grubbsova kritéria τ_1	1,701				
Grubbsova kritéria τ_2	1,765				
Kritická hodnota Tp (n=5,α=0,01)	**1,955**				
Minimální naměřená hodnota	VYHOVUJE				
Maximální naměřená hodnota	VYHOVUJE				
Měřená délka kružnice ve středu ohýbaného vzorku L2 [mm]	0,556	0,545	0,559	0,553	0,540
Aritmetický průměr	0,184				
Směrodatná odchylka	0,212				
Grubbsova kritéria τ_1	1,684				
Grubbsova kritéria τ_2	1,772				
Kritická hodnota Tp (n=5,α=0,01)	**1,955**				
Minimální naměřená hodnota	VYHOVUJE				
Maximální naměřená hodnota	VYHOVUJE				

Vyhodnocení Grubbsova testu pro délky L_1 a L_2 na ohnutém měřeném vzorku

Z důvodu opakovaného měření stejné veličiny je nutné vyloučit případné hodnoty měření, které by mohly být způsobeny hrubou chybou při měření, a které by tedy zkreslily celkový výsledek měření. Všechny hodnoty získané měřením byly proto podrobeny statistické kontrole - Grubbsovu testu. Odchylky krajních naměřených hodnot (minima a maxima) v sérii měření nejsou důsledkem hrubé chyby při měření a jsou tedy všechny výsledky měření použitelné.

ZÁVĚR

V dizertační práci je popsána problematika povlaků v kombinací s plazmochemickou předúpravou povrchu a její vzájemnou kombinací mezi jednotlivými povlaky po ohnutí na ohýbacím přípravku. Práce je zaměřena na kvalitu povrchově upravených ocelových plechů s povlakem na testování ohybem a tažením.

Automobilový průmysl a především zákazník požaduje především kvalitu tvářeného plechu s perfektní ochranou proti korozi a samozřejmě je to estetičnost daného výrobku (plechu) při zachování funkčních vlastností dané vrstvy po technologii tváření.

Na základě rešerše dostupné literatury bylo zjištěno, že úspěšná aplikace plazmochemické předúpravy vytvořená na ocelovém plechu nebyla dosud v průmyslové výrobě zavedena a publikována. Cílem experimentu je optimalizování složení plazmatu pro konkrétní povlaky na plech. Experimenty probíhaly s různými variantami plynů a byly zvoleny tyto média: argon, kyslík, dusík, oxid uhličitý, argon+voda. U všech vzorků byl měněn výkon. Konstantní byl průtok a posuv.

Podle zkoušek hlubokotažnosti obstál vzorek č. 17. Hodnota poškození byla až při IE 7,5 mm. U tohoto vzorku bylo použito médium Ar+H_2O při použití multitryskového plazmového systému. Postup byl takový, že na výchozí stav plechu byl nanesen základní povlak, poté vrchní povlak a poté ošetřen multitryskovým plazmovým systémem. Zajímavý experiment se ukázal také v tomto pořadí. U vzorku BP4 byl ocelový základ ošetřen multitryskovým plazmovým systémem a následně nanesena základní vrstva povlaku. Hodnotu IE jsme zastavily na hodnotě hloubení 9,75mm bez zjevného poškození. Po této hodnotě už povlak ukazoval známky poškození.

Samozřejmě bude záležet na přilnavosti povlaku k předchozím povlakům. V našem případě je povrchová vrstva různě namáhaná v závislosti na její poloze v ohýbadle.

V kapitole 4.1 je detailně popsán stav kdy jsou ohnuty malé poloměry a jaké je rozdělení deformací. Je potřeba brát v úvahu že se jedná o technologii zpracování materiálu za studena. V experimentech se nanášení základního povlaku na vybrané vzorky používal kataforézní způsob lakování. Tloušťka povlaku se pohybuje v rozmezí 15 až 30µm. Při použití multitryskového plazmového systému povlak nevykazoval známky poškození po ohybu vzorku na odstupňovaném ohýbacím přípravku. Optimalizované parametry plazmochemické předúpravy při zvolených podmínkách jako je výkon 550 W, průtok 0,2 l/min, posuv 3 m/min a dvou přejezdech, je modifikování povrchu pomocí plazmy optimální pro zachování celistvosti povlaku, tedy všech vazeb mezi povlakem a základním materiálem.

Další experimenty byly zaměřeny na zkoušky tahem. Tento test byl zaměřen na studium vlivu definovaných hodnot deformace v tahu a účinku nízkoteplotního plazmatu na přilnavost zvoleného povlaku na ocelových vzorcích s využitím tahové zkoušky plochých zkušebních tyčí. Vybrané vzorky s rozměrem 90 x 90 mm jsou po přejetí multitryskového plazmového systému upraveny na rozměry 90 x 10 mm pro tahovou zkoušku. Vzorky pro tahovou zkoušku jsou uvedeny v tabulce 8.

Na vybraných zkušebních vzorcích byly zjištěny z tahové zkoušky materiálové charakteristiky. Hodnoty smluvního meze kluzu a meze pevnosti odpovídaly danému materiálu 1.0322 (DX56D). Stejně jako tažnost A_{50} [%] a kontrakce Z [%].

Postup nanášení multitryskového plazmového systému je výhodný v pořadí: plazma+základ, jelikož u vzorků BP7 a BP16 zůstala část povlaku, jak je vidět ze snímků ze stereomikroskopu. A také čas přetržení vzorku u BP7, BP11, BP16 je výrazně delší než u vzorků TC6, TC9, Z12.

Po tahové zkoušce byly pro vybrané vzorky vypočteny hodnoty exponentu zpevnění. Pevnost ocelí i ostatních kovů se po tváření zvyšuje. Kluzové napětí, při kterém nastává

plastická deformace, vzrůstá během nárůstu velikosti deformace. Popis tohoto chování je vyjádřeno exponentem zpevnění „n“. Čím vyšší je jeho hodnota, tím je křivka napětí – deformace příkřejší. To také znamená, že deformace při maximálním zatížení je u vyšších hodnot exponentu „n“ rovněž větší a vzrůstá i rozdíl mezi mezí pevnosti v tahu a kluzu. Vyšší hodnoty exponentu zpevnění byly u vzorků BP11 a TC6. Nižší hodnoty exponentu zpevnění byly u vzorků BP7 a TC9. I zde se prokazuje, že použití multitryskového plazmového systému ovlivňuje povlak a potvrzuje, že postup: plazma+základ je výhodnější než ostatní postupy nanášení povlaků a plazmy.

Na dalších vzorcích, které byly ohnuty na odstupňovaném ohýbacím přípravku byla nanesena elektrolytickým leptáním síť a byly vyhodnoceny změny tloušťky povlaků a deformací. Vybrané vzorky byly vybroušeny do jemné struktury a ošetřeny brusnou pastou a poté zalité do pryskyřice. Následně byly vzorky zkoumány pod mikroskopem a byly pořízeny fotografie, které jsou uvedeny v kapitole 10.5.2.

Během ohýbání se měnila tloušťka plechu, a proto se stanovily tahové a tlakové deformace. Rozměry délek L_1, L_2 a deformací jsou uvedeny v kapitole 10.6.1.
Pro deformace φ_1 dominují kladné hodnoty až na vzorek BP16, kde jsou na levé, střední a pravé straně měřeného ohnutého vzorku i některé hodnoty záporné. Pro deformace φ_2 dominují u vybraných vzorků převážně záporné hodnoty. Pro deformace φ_3 dominují záporné hodnoty pro vzorky TC12, Z7, $Z5_1$. U vzorků BP15, BP16 jsou hodnoty deformace φ_3 kladné. Ovšem u vzorku Z12 jsou pro deformace φ_3 hodnoty, jak kladné, tak záporné.

S využitím multitryskového plazmového systému se prokázalo, že v experimentu na ohýbacím přípravku, konkrétně u vzorku č. 23, kde byl postup nanášení povlaku a plazmy v pořadí základ+topcoat+plazma s použitým plynem $Ar+O_2$ bylo poškození povlaku nejmenší a po modifikování plazmy byla tloušťka povlaku soudržná a povlak nepraskal.

Vybrané naměřené hodnoty byly podrobeny statistické kontrole podle Grubbsova testu. Jedná se o naměřené délky na ohnutém vzorku a tloušťky povlaku, které byly měřeny v obloukové a rovné části vzorků.

SPLNĚNÍ CÍLŮ PRÁCE

a) Návrh metody použití multitryskového plazmového systému na zkušební vzorky s povlakem.

Metoda spočívá v multitryskovém plazmovém systému o šířce 100 mm s 19 tryskami. Experimenty probíhaly s různými variantami plynů a byly zvoleny tyto média: argon, kyslík, dusík, oxid uhličitý, argon+voda. U všech vzorků byl měněn výkon. Konstantní byl průtok a posuv. Optimalizované parametry plazmochemické předúpravy jsou následující:
Výkon 550 W, průtok 0,2 $l \cdot min^{-1}$, posuv 3 $m \cdot min^{-1}$ a při projetí dvou přejezdech je modifikování povrchu pomocí plazmy optimální pro zachování celistvosti povlaku, tedy všech vazeb mezi povlakem a základním materiálem.

b) Testování povrchově upravených plechů (vzorků) s nátěrem na novém odstupňovaném ohýbacím přípravku na Ústavu strojírenské technologie, odbor technologie tváření pro vybrané poloměry ohybu za účelem porovnání přilnavosti povlaku.

Vybrané vzorky byly ohnuty na odstupňovaném ohýbacím přípravku. Vzorek č. 23, který byl ohnutý na kladce s rádiusem R = 23 mm s následujícím postupem nanášení:
Základ+topcoat+plazma, nevykazoval známky poškození a změřené hodnoty povlaku převyšovaly ostatní kombinace a varianty plynů.

c) Porovnání výsledků vzorků s použitím metody multitryskového plazmového systému na vybraných vzorcích topcoat+ktl, ktl, bez povlaku, společně s Erichsenovou zkouškou a pomocí Tarnogrodského přístroje pro úhly v intervalu (0º, 180º).

Jako nejlepší vzorek ze série zkoušek hlubokotažnosti byl vzorek 17. Hodnota poškození byla až při IE 7,5 mm. U tohoto vzorku bylo použito médium $Ar+H_2O$ při použití multitryskového plazmového systému. Postup je základ+topcoat+plazma. U vzorku BP4 byl ocelový základ ošetřen multitryskovým plazmovým systémem a následně nanesena základní vrstva povlaku. Hodnotu IE jsme zastavily na hodnotě hloubení 9,75 mm bez zjevného poškození. Optimální kombinace nanášení plazmy je zvolený plyn $Ar+H_2O$ a zvolený postup nanášení povlaků a plazmy je plazma+základ nebo základ+topcoat+plazma. Jedno z hlavních měření bylo rozděleno do čtyř skupin. A to měření v obloukové části vzorku, obloukové rohové části vzorku, rovné části vzorku, rovné rohové části vzorku.
U všech čtyř skupin převládá vzorek č. 23, kde je systém multitryskového plazmového systému nanesen v pořadí základ+topcoat+plazma.

d) Optimalizování složení plazmatu pro konkrétní navržené povlaky na ocelový plech S235JRG2, tloušťka 1mm, aby po ovlivnění povrchu vzorku před nanesením povlaku, resp. více povlaků, byla maximální přilnavost povlaku k ocelovému základu.

Optimalizace plazmatu poskytující nízkoteplotní a neizotermický výboj za atmosférického tlaku byl optimalizován s použitým médiem $Ar+H_2O$ a základní vrstvou povlaku o tloušťce 15 – 30 µm, která se nanášela elektroforézním způsobem, v rozmezí teplot 160 – 180 °C. Povlak nevykazoval známky poškození. Optimální varianta nanášení multitryskového plazmového systému byla podle experimentů zvolena v kombinaci základ+topcoat+plazma. Při této optimalizaci parametrů plazmatu za použití plazmového zařízení, lze dosáhnout funkčních povlaků.

e) Výsledkem aplikace použitého multitryskového plazmového systému na zkušební vzorky při optimálních nastavených parametrech plazmatu, budou funkční vzorky po ohybu s přesně definovaným poloměrem ohybu a úhlem ohybu.

U vzorku č. 23, kde byla nanesena plazma v pořadí BP+Z+TC+PL. Vzorek byl ošetřen mediem A_r+O_2. Tato kombinace nanesení povlaků a plazmy po ohnutí na ohýbacím přípravku se jeví jako nejpřijatelnější. Vzorek byl ohnut na odstupňovaném ohýbacím přípravku na válcovém segmentu s poloměrem R = 23 mm.
Druhý vzorek č. 28, kde byla nanesena plazma v pořadí BP+PL+Z+TC a byl ošetřen taktéž mediem A_r+O_2 a který převládal nad ostatními vzorky a měl vyšší hodnoty v obloukové části vzorku a v obloukové rohové části vzorku. Vzorek byl ohnut na odstupňovaném ohýbacím přípravku na válcovém segmentu s poloměrem R = 23 mm.
V rovné části vzorku a v rovné rohové části vzorku už převládá vzorek č. 18, který nebyl ošetřen plazmou. Vzorek byl ohnut na odstupňovaném ohýbacím přípravku na válcovém segmentu s poloměrem R = 23 mm.
Jako další v pořadí byl vzorek č. 34, kde byla nanesena plazma v pořadí BP+PL+Z+TC. Vzorek byl ošetřen mediem A_r+N_2. Vzorek byl ohnut na odstupňovaném ohýbacím přípravku na válcovém segmentu s poloměrem R = 17 mm.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. DVOŘÁK, Milan. *Technologie II*. Brno: CERM, 2001. Učební texty vysokých škol. ISBN 80-214-2032-4.
2. KREIBICH, Viktor. *Teorie a technologie povrchových úprav*. Praha: České vysoké učení technické, 1996. ISBN 80-01-01472-X.
3. ČSN EN ISO 2409 (67 3085) *Nátěrové hmoty - Mřížková zkouška*. 2000. Český normalizační institut.
4. TAYLOR, Blanks. *Metals Handbook – Mechanical testing*. American Society for Metals. 8th ed. 1985. 837p. ISBN 0-87170-007-1.
5. KRAUS, Václav. *Povrchy a jejich úpravy*. Plzeň: Západočeská univerzita, 2000. ISBN 80-7082-668-1.
6. BAČA, Josef, Jozef BÍLIK, Viktor TITTEL. *Technológia tvárnenia. 1*. vyd. Bratislava: Edícia vysokoškolských učebníc, 2010. 245 s. ISBN 978-80-227-3242-0.
7. ČADA, Radek. *Plošná tvařitelnost kovových materiálů*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 1998. ISBN 80-7078-557-8.
8. HERMANN, František, SCHILLER, Marek. *Zkoušení nátěrových hmot a ochranných povlaků* [online]. Pardubice - Zelené předměstí: SYNPO a.s., 2005 [cit. 2005-10-23]. Dostupné z: http://www.sczl.cz/dokumenty/k06_04.pdf.
9. KREJČÍK, Vladimír. *Povrchová úprava kovů II pro 3. ročník středních odborných učilišť*. Praha: SNTL, 1988.
10. Zkouška odolnosti nátěrových hmot [online]. Proinex Instruments, s.r.o. Ostrava : Měřící přístroje, tloušťkoměry, tvrdoměry, leskoměry, teploměry. 2004, 2008 [cit. 2010-01-04]. Český/anglický. Dostupné z: http://www.proinex.cz.
11. ČSN EN ISO 1519 (673079). *Nátěrové hmoty - Zkouška ohybem (na válcovém trnu)*. 2011. Český normalizační institut.
12. ČSN EN ISO 7438 (420401). *Kovové materiály - Zkouška ohybem*. 2016. Český normalizační institut.
13. FOREJT, Milan a Miroslav PÍŠKA. *Teorie obrábění, tváření a nástroje*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006. ISBN 80-214-2374-9.
14. ČSN EN ISO 20482 (420406). *Kovové materiály - Plechy a pásy - Zkouška hloubením podle Erichsena*. Praha : 2014. Český normalizační institut.
15. ČSN EN 13144 (038166). *Kovové a jiné anorganické povlaky - Metoda kvantitativního měření přilnavosti zkouškou tahem*. 2003. Český normalizační institut.
16. Patent EP 1077021, US 6,525,481. *Method of Making a Physically and Chemicaly active Environment by Means of a Plasma jet and the Related Plasma Jet*. Brno : Masaryk University, 2005. 6 s.
17. HUŠEK, Martin, DVOŘÁK, Milan. Zkouška přilnavosti multifunkčního povlaku na plechu pomocí odstupňovaného ohýbacího přípravku. *Strojírenská technologie,* 2010, roč. XV, č. 2, s. 15-20. ISSN: 1211- 4162.
18. *Technologie svařování a zařízení: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů*. Ostrava: ZEROSS, 2001. Svařování. ISBN 80-85771-81-0.

19. FÜRBACHER, Ivan, zástupce ředitele a vedoucí akreditovaných laboratoří v SVÚM a.s. Praha. *Lexikon ocelí, část 3, díl 1, str. 1, nelegované jakostní oceli.* Praha. 2015. ISSN 20080204.
20. MARCINIAK, Z., J. L. DUNCAN a S. J. HU. *Mechanics of sheet metal forming*. 2nd ed /. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2002.
21. DAĎOUREK, Karel. *Vybrané technologie povrchových úprav.* vyd.: Liberec, Technická univerzita v Liberci, 2007. 117s. ISBN 978-80-7372-168-8.
22. FOREJT, Milan. *Teorie tváření. 1.vyd.* vyd.: Brno. Vysoké učení technické v Brně, 1992. 167s. ISBN 80-214-0415-9.
23. MRÁZEK, D. *Ověření určování velikosti deformací pomocí systému ARGUS.* Praha, 2015. 71 s. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí diplomové práce František Tatíček.
24. KUČERA, R. *Význam deformační sítě v oblasti tváření.* Brno, 2012. 32 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí bakalářské práce Eva Šmehlíková.
25. PETRUŽELKA, Luboš. *Tvařitelnost a nekonvenční metody ve tváření*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, Strojní fakulta, 2000. ISBN 80-7078-635-3.
26. BAREŠ, Karel, a kol. *Lisování. 1.vyd*. Praha: SNTL 1971 - Nakladatelství technické literatury. 542 s.
27. ČADA, Radek. Vysoká škola báňská - technická universita Ostrava: *Technologie I* [online]. 2007 [cit. 2015-05-13]. Dostupné z: http://www.elearn.vsb.cz/archivcd/FS/TECH1/Technologie-I.pdf
28. DVOŘÁK, Milan, František GAJDOŠ a Karel NOVOTNÝ. *Technologie tváření: plošné a objemové tváření.* Vyd. 5., V Akademickém nakladatelství CERM 3. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2013. ISBN 978-80-214-4747-9.
29. LENFELD, Petr. Technická univerzita Liberec: Katedra strojírenské technologie [online]. 2015 [cit. 2014-9-11]. Dostupné z: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/uvod.htm
30. DVOŘÁK, Milan, ZIMOLOVÁ, Markéta. Vliv morfologie povrchu plechu na kvalitu tvářeného dílce. In *Metal 2005. Ostrava*: Tanger spol. s r.o. Ostrava, 2005. s. 73-78. ISBN: 80-86840-13- 1.
31. LENFELD, Petr. *Metody tváření kovů a plastů. Hodnocení plechů s povlaky* [online]. 2010 [cit. 2014-9-11]. Dostupné z WWW: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/stud_materialy/mtk/Plechyspovlaky.pdf>.
32. ČADA, Radek. *Tvářitelnost ocelových plechů*. Ostrava: Repronis, 2001. ISBN 80-86122-77-8.
33. HRUBÝ, Jiří. *Strojírenské tváření – Základy teorie tváření* [online]. 2005 [cit. 2014-9-11]. Dostupné z: http://www.345.vsb.cz/jirihruby/Stv/Prednesy.htm
34. LENFELD, Petr. *Technologie II, tváření kovů, zpracování plastů, Technologie plošného tváření – tažení* [online]. 2013. [cit. 2014-9-11]. Dostupné z: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce/09.htm

35. Lakum-KTL, a.s. *Povrchové úpravy – Kataforéza – KTL průběžná, KTL taktovací, práškové lakování* [online]. 1998 [cit. 2014-9-11]. Dostupné z: http://lakum.cz/cz/povrchove-upravy

36. PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu*. Brno: CERM, c2001. ISBN 80-7204-193-2.

37. CÍSAŘOVÁ, Michaela. *Vliv morfologie povlaku Zn na mezní podmínky při tažení tenkých plechů* [online]. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2012 [cit. 2016-08-24]. Dostupné z: http://hdl.handle.net/11012/20322. Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie.

38. HOLOUBEK, Vít. *Povrchové úpravy – Kataforické lakování* [online]. 2005 [cit. 2014-9-11]. Dostupné z: http://www.povrchoveupravy.cz/2005-04-clanek01.html

39. LAKOL s.r.o. – *Kataforézní lakování* [online]. 2006 [cit. 2014-9-11]. Dostupné z: http://www.lakol.cz/lakovani/katoforezni-lakovani/katoforezni-lakovani-ktl.html

40. ČECH, Jaroslav, Jiří PERNIKÁŘ a Libor JANÍČEK. *Strojírenská metrologie*. Brno: CERM, 2002. Učební texty vysokých škol (Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství). ISBN 80-214-2252-1.

41. PERNIKÁŘ, Jiří, Miroslav TYKAL a Josef VAČKÁŘ. *Jakost a metrologie*. Brno: CERM, 2001. Učební texty vysokých škol (Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství). ISBN 80-214-1997-0.

42. ČSN ISO 15530-3 (014101). *Geometrické specifikace produktu (GPS) - Souřadnicové měřicí stroje (CMM): Metody určování nejistoty měření - Část 3: Použití kalibrovaných obrobků nebo etalonů*. 2012. Český normalizační institut.

43. ČSN P ENV 13005 (014109). *Pokyn pro vyjádření nejistoty měření*. Praha : 2005. Český normalizační institut.

44. SVOBODA, T. *Modifikace povrchů plazmovými tryskami*. Brno: Masarykova univerzita v Brně, Přírodovědecká fakulta, 2010. Diplomová práce. 89 str.

45. MM, Průmyslové spektrum. *Testování přilnavosti povlaku k plechu ohýbání* [online]. 2010 [cit. 2014-9-11]. Dostupné z: http://m.mmspektrum.com/clanek/testovani-prilnavosti-povlaku-k-plechu-ohybanim

46. HUŠEK, Martin. *Tvařitelnost tenkých ocelových plechů s povrchovou úpravou eloxovaného hliníku* [online]. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2012 [cit. 2015-09-17]. Dostupné z: http://hdl.handle.net/11012/8887. Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie.

47. KLÍMA, Miloš, KEDROŇOVÁ, Eva, SVOBODA, Tomáš. *Moderní plazmo-chemické postupy pro konzervování-restaurování předmětů kulturního dědictví* [online]. 2011 [cit. 2015-09-17]. Dostupné z: http://www.sci.muni.cz/chemsekce/frvs2011/pdf/plazma.pdf.

48. ČSN EN ISO 4516 (038159). *Kovové a jiné anorganické povlaky - Zkoušky mikrotvrdosti podle Vickerse a podle Knoopa*. 2003. Český normalizační institut.

49. KLÍMA, Miloš, Zdeněk MUZIKÁŘ, Milan DVOŘÁK a Milan ALBERTI. Povrchové úpravy nízkoteplotním neizotermickým plazmatem za atmosférického tlaku. In *41st International Conference on Coatings Technology. Pardubice, Czech Rep.: Univerzita Pardubice, 2010.* s. 251-262, 12 s. ISBN 978-80-7395-258-7.

50. KLÍMA, Miloš. Plazmo-chemické, chemické a diagnostické metody pro povrchové úpravy. In *TRANSFER Výzkum a vývoj pro letecký průmysl č 22 / 2014. Elektronický sborník VZLÚ, Praha, 16-17 června, 2014*, str. 34-43. ISSN 1801 - 9315.

51. KLÍMA, Miloš, KEDROŇOVÁ, Eva, BURŠÍKOVÁ, Vilma. Plazmochemická modifikace jednovrstevných nátěrových hmot a jejich diagnostika. In *TRANSFER Výzkum a vývoj pro letecký průmysl. č 25 / 2015. Elektronický sborník VZLÚ, Praha, 4 – 5. června, 2015***,** str. 8-16. ISSN 1801 - 9315.

52. BUREŠ, Jiří. *Shore - Zkouška tvrdosti podle Shorea* [online]. 2000 [cit. 2016-4-26]. Dostupné z: http://www.converter.cz/jednotky/tvrdost-shore.htm.

53. ČSN EN ISO 7438 (420401). *Kovové materiály - Zkouška ohybem.* 2016. Český normalizační institut.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratka/Symbol	Jednotka	Popis
BP	-	Ocelový plech bez povlaku (pouze základní materiál)
Z	-	Základní povlak, který je nanesen metodou KTL
TC	-	Topcoat - vrchní povlak
PL	-	Plazma
A_r	-	Argon
N_2	-	Dusík
O_2	-	Kyslík
H_2O	-	Voda
CO_2	-	Oxid uhličitý
P	W	Výkon
t_z	µm	Tloušťka základního povlaku
t_c	µm	Tloušťka vrchního povlaku
t_{z+tc}	µm	Tloušťka základního povlaku a vrchního povlaku
φ_1, φ_2, φ_3	-	Logaritmické deformace
IE	mm	Index hloubení
d_1	mm	Průměr kulového zakončení tažníku
d_2	mm	Vnitřní průměr přidržovacího kroužku
d_3	mm	Vnitřní průměr tažnice
b	mm	Šířka zkušebního tělesa před zkouškou
h	mm	Hloubka prohloubení
a	mm	Tloušťka plechu
R_a	µm	Drsnost (střední aritmetická úchylka profilu)
D	mm	Průměr rondelu
d	mm	Průměr tažníku
T	%	Přirozený stupeň hlubokotažnosti
F_1	N	Síla
F_2	N	Tažná síla
L	mm	Vzdálenost podpěr u zkoušky lámavosti
r	mm	Poloměr ohybu u zkoušky lámavosti
L_1	mm	Rozměr na naleptané elipse na ohnutém vzorku
L_2	mm	Rozměr na naleptané elipse na ohnutém vzorku
F_p	N	Síla přidržovače
F_t	N	Síla na tažníku
R	mm	Poloměr zaoblení funkční části čela ohybníku
l_a	mm	Délka střední plochy u elementu plechu ohnutého malým poloměrem ohybu
ρ	mm	Rádius elementu plechu ohnutého malým poloměrem

		ohybu
θ	°	Úhel vybraného elementu plechu ohnutého malým poloměrem ohybu
l	mm	Délka oblouku
R_0	mm	Poloměr vnějšího povrchu
R	mm	Poloměr vnitřního povrchu.
l_0	mm	Délka plechu
t	mm	Tloušťka plechu
y_o	mm	Vlákno od středního (neutrálního) povrchu
A'B'	mm	Délka vlákna
r_b	mm	Poloměr vlákna v bodě B
ε_1	-	Poměrná deformace
ε_2	-	Tlaková deformace
σ_1	Pa	Nominální tahové napětí
σ_2	Pa	Střední hodnota z napětí $\sigma_1 + \sigma_3$
σ_3	Pa	Nominální tlakové napětí
σf	Pa	Mez kluzu
r_b	mm	Poloměr k neutrální ose
HB	-	Brinellovo tvrdostní číslo
HV	-	Vickersovo číslo tvrdosti
HR	-	Rockwellovo tvrdostní číslo
H	mm	Pádová výška u Shoreova skleroskopu
h	mm	Výška odskoku u Shoreova skleroskopu
Δy		Maximální přípustná chyba přístroje
s	-	Směrodatná odchylka výběrového souboru
Δx	-	Výsledná chyba měření
e	-	Systematická složka
T_p	-	Třída přesnosti měřicího přístroje
u_A	-	Standardní nejistota typu A
u_{Ak}	-	Korigovaná nejistota typu A
k	-	Koeficient závislý na počtu měření
u_B	-	Standardní nejistota typu B
u_C	-	Standardní nejistota typu C
R11 až R35	mm	Poloměry na odstupňovaném ohýbacím přípravku
KTL		Kataforézní lakování
S235JRG2		Nelegovaná jakostní ocel
E	MPa	Modul pružnosti v tahu
$R_{p0,2}$	MPa	Smluvní mez kluzu
R_m	MPa	Mez pevnosti v tahu
A_{50}	%	Tažnost
Z	%	Kontrakce
t	s	Čas
F	N	Tahová síla při porušení vzorku
n	-	Exponent zpevnění

K	MPa	Materiálová konstanta
D	MPa	Modul zpevnění
D´	MPa	Modul zpevnění pro dvoupřímkovou aproximaci
τ1, τ2	-	Grubbsova kriteria
$\bar{\sigma}_1$	MPa	Skutečné napětí
$\bar{\sigma}_{ke}$	MPa	Extrapolovaná mez kluzu
D	MPa	Modul zpevnění
$\bar{\sigma}_2$	MPa	Ohybové napětí podle jednopřímkové aproximace
D´	MPa	Modul zpevnění pro dvoupřímkovou aproximaci
$\bar{\sigma}_3$	MPa	Ohybové napětí podle dvoupřímkové aproximace

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1 Přehled vlastností oceli S235JR
Příloha 2 Přehled testovaných vzorků

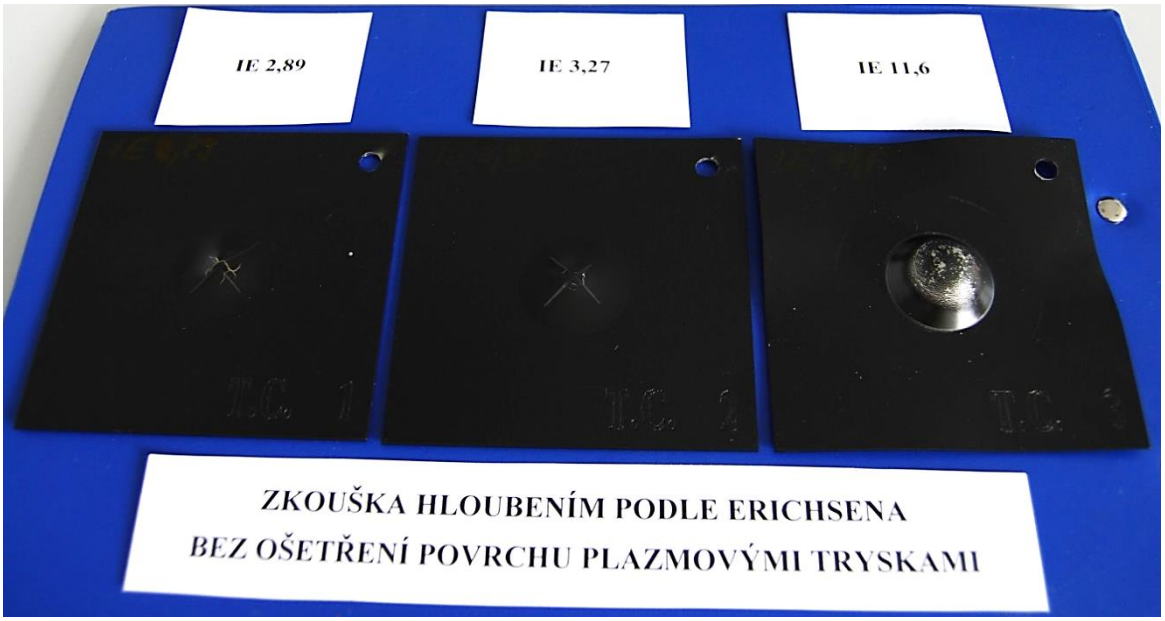
PŘÍLOHA 1: Přehled vlastností oceli S235JR

Přehled vlastností oceli S235JR								1.0038
Druh oceli	**Nelegovaná jakostní konstrukční ocel**							
TDP	ČSN EN 10025-2: 2005							
Dřívější označení	S235JRG2 podle EN 10025: 1990 + A1: 1993; RSt 37-2 podle DIN 17100; 11 375 podle ČSN							
Chemické složení v % hmot. (rozbor tavby)	**C max. pro tloušťku v mm**			**Mn max.**	**Si max.**	**P max.**	**S max.**	**N max.**
	≤16	**>16≤40**	**>40 [1]**					
	0,17	0,17	0,20	1,40	-	0,035	0,035	0,012
Složení hotového výrobku	0,19	0,19	0,23	1,50	-	0,045	0,045	0,014
Mechanické vlastnosti pro zkoušky v podélném směru	**Minimální mez kluzu R_{eH} MPa pro výrobky jmenovité tloušťky v mm :**							
	≤16	>16≤40	>40≤63	>63≤80	>80≤100	>100≤150	>150≤200	>200≤250
	235	225	215	215	215	195	185	175
	Pevnost v tahu R_m MPa pro výrobky jmenovité tloušťky v mm :							
	≥ 3≤ 100		>100≤150			>150≤ 250		
	360-510		350-500			340-490		
	Minimální tažnost v % ($L_0 = 5.65\sqrt{S_0}$) pro výrobky jmenovité tloušťky v mm [5] :							
	> 3 ≤ 40	> 40 ≤ 63	> 63 ≤ 100	> 100 ≤ 150	> 150 ≤ 250			
	26	25	24	22	21			
	Minimální nárazová práce KV (J) při 20° C pro výrobky jmenovité tloušťky v mm : [2], [5]							
	≤150			>150≤250				
	27 [4]			27 [4]				
Maximální hodnota CEV [3]	**Pro výrobky jmenovité tloušťky v mm:**							
	≤ 30	> 30 ≤ 40	> 40 ≤ 150	> 150 ≤ 250				
	0,35	0,35	0,38	0,40				
Technologické vlastnosti								
Svařitelnost	Vhodná ke svařování všemi obvykle používanými způsoby svařování. S rostoucí tloušťkou výrobku a rostoucí hodnotou uhlíkového ekvivalentu se zvyšuje riziko výskytu trhlin za studena v oblasti sváru. Je účelné dbát doporučení stanovující podmínky pro svařování, jak je ku příkladu uvádí ECSC IC 2 (EN 1011).							
Tváření za tepla	Jsou-li dodávané výrobky dále tvářeny za tepla, splňují uvedené mechanické vlastnosti pouze po následném normalizačním žíhání.							
Tvařitelnost za studena	Ocel určená pro tváření za studena musí být označena písmenem C (S235JRC). To se týká i tažení za studena.							

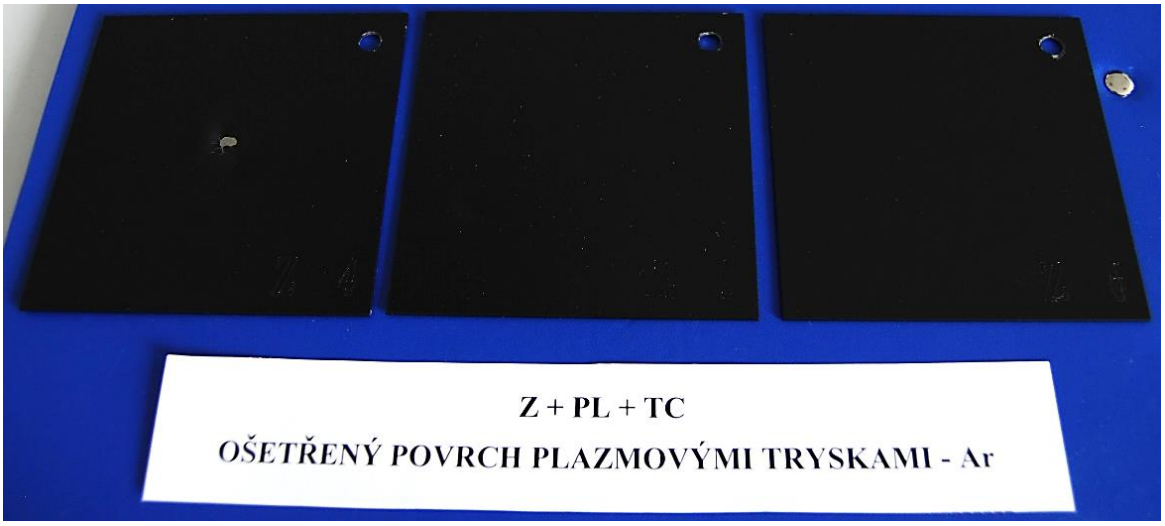
[1] pro profily o jmenovité tloušťce nad 100 mm se obsah C stanoví po dohodě.
[2] pro profily o jmenovité tloušťce nad 100 mm je hodnoty nutno dohodnout
[3] hodnota uhlíkového ekvivalentu CEV se vypočte z rozboru tavby podle vzorce :
CEV = C + Mn : 6 + (Cr+Mo+V) : 5 + (Ni+Cu) : 15
CEV je volitelný požadavek.
[4] průměrná hodnota vypočtená z výsledků tří stanovení musí splňovat předepsané požadavky. Jedna hodnota může být nižší, než předepsaná minimální průměrná hodnota za předpokladu, že nebude nižší než 70% této hodnoty.
V opačném případě se odebírají ze zkušebního vzorku další 3 zkušební tělesa. Průměrná hodnota ze 6 zkoušek pak nesmí být nižší než předepsaná minimální hodnota, přičemž 2 výsledky mohou být nižší, ale pouze jeden s hodnotou nižší, než 70% předepsané minimální hodnoty.
[5] pro podélný směr zkoušení.

PŘÍLOHA 2: Přehled testovaných vzorků

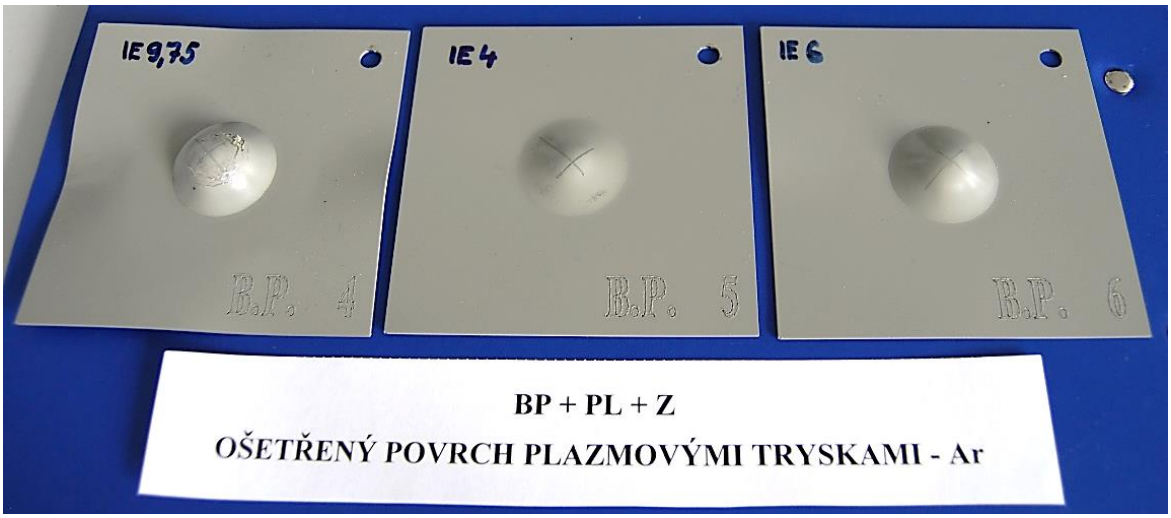
Vzorky ocelového plechu (90x90x1 mm) s nanesenou základní barvou. Vzorky jsou bez ošetření povrchu plazmovými tryskami. Na vzorcích je provedena Erichsenova zkouška.



Vzorky ocelového plechu (90x90x1 mm) s vrchním povlakem. Vzorky jsou bez ošetření povrchu plazmovými tryskami. Na vzorcích je provedena Erichsenova zkouška.



Vzorky ocelového plechu (90x90x1 mm) se základním povlakem, který byl ošetřen plazmovými tryskami a poté nanesen vrchní povlak. Použitý plyn: Argon.



Vzorky ocelového plechu (90x90x1 mm) bez povlaku, který byl ošetřen plazmovými tryskami a poté nanesen základní povlak. Použitý plyn: Argon. Na vzorcích je provedena Erichsenova zkouška.

Vzorky ocelového plechu (90x90x1 mm) s vrchním povlakem, který byl ošetřen plazmovými tryskami. Použitý plyn: Argon. Na vzorcích je provedena Erichsenova zkouška.

Vzorky ocelového plechu (90x90x1 mm) se základním povlakem, který byl ošetřen plazmovými tryskami a poté nanesen vrchní povlak. Použité plyny: Argon + Kyslík.

Vzorky ocelového plechu (90x90x1 mm) bez povlaku, který byl ošetřen plazmovými tryskami a poté nanesen základní povlak. Použité plyny: Argon + Kyslík.

Vzorky ocelového plechu (90x90x1 mm) s vrchním povlakem, který byl ošetřen plazmovými tryskami. Použité plyny: Argon + Kyslík. Na vzorcích je provedena Erichsenova zkouška.

Vzorky ocelového plechu (90x90x1 mm) se základním povlakem, který byl ošetřen plazmovými tryskami a poté nanesen vrchní povlak. Použité plyny: Argon + Dusík.

Vzorky ocelového plechu (90x90x1 mm) bez povlaku, který byl ošetřen plazmovými tryskami a poté nanesen základní povlak. Použité plyny: Argon + Dusík.

Vzorky ocelového plechu (90x90x1 mm) s vrchním povlakem, který byl ošetřen plazmovými tryskami. Použité plyny: Argon + Dusík. Na vzorcích je provedena Erichsenova zkouška.

Vzorky ocelového plechu (90x90x1 mm) se základním povlakem, který byl ošetřen plazmovými tryskami a poté nanesen vrchní povlak. Použité plyny: Argon + Oxid uhličitý.

Vzorky ocelového plechu (90x90x1 mm) bez povlaku, který byl ošetřen plazmovými tryskami a poté nanesen základní povlak. Použité plyny: Argon + Oxid uhličitý.

Vzorky ocelového plechu (90x90x1 mm) s vrchním povlakem, který byl ošetřen plazmovými tryskami. Použité plyny: Argon + Oxid uhličitý. Na vzorcích je provedena Erichsenova zkouška.

Vzorky ocelového plechu (90x90x1 mm) se základním povlakem, který byl ošetřen plazmovými tryskami a poté nanesen vrchní povlak. Použité plyny: Argon + Voda.

Vzorky ocelového plechu (90x90x1 mm) bez povlaku, který byl ošetřen plazmovými tryskami a poté nanesen základní povlak. Použité plyny: Argon + Voda.

Vzorky ocelového plechu (90x90x1 mm) s vrchním povlakem, který byl ošetřen plazmovými tryskami. Použité plyny: Argon + Voda. Na vzorcích je provedena Erichsenova zkouška.