



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI  
Fakulta mechatroniky, informatiky  
a mezioborových studií ■

# Vliv laserového zpracování karosářských plechů na strukturu povrchu a pevnost lepeného spoje

## Bakalářská práce

*Studijní program:* B3942 – Nanotechnologie  
*Studijní obor:* 3942R002 – Nanomateriály

*Autor práce:* **Adam Kuře**  
*Vedoucí práce:* Ing. Pavel Kejzlar, Ph.D.





TECHNICAL UNIVERSITY OF LIBEREC  
Faculty of Mechatronics, Informatics  
and Interdisciplinary Studies ■

# Effect of laser processing of car body sheets on surface structure and bonding strength of glued joints

## Bachelor thesis

*Study programme:* B3942 – Nanotechnology  
*Study branch:* 3942R002 – Nanomaterials

*Author:* **Adam Kuře**  
*Supervisor:* Ing. Pavel Kejzlar, Ph.D.



## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Adam Kuře**  
Osobní číslo: **M15000139**  
Studijní program: **B3942 Nanotechnologie**  
Studijní obor: **Nanomateriály**  
Název tématu: **Vliv laserového zpracování karosářských plechů na strukturu povrchu a pevnost lepeného spoje**  
Zadávací katedra: **Katedra materiálu**

### Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Zpracujte rešerši na téma laserové čištění povrchů.
2. Z vybraných materiálů-plechů připravte zkušební vzorky.
3. Pomocí mikroskopických metod zhodnoťte vliv vybraných parametrů laserového zpracování na strukturu.
4. Zhodnoťte vliv laserového opracování na výslednou pevnost lepených spojů.

Rozsah grafických prací: - dle potřeby  
Rozsah pracovní zprávy: 35-55 stran  
Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická  
Seznam odborné literatury:

[1] EDITORS, Jacques PERRIERE, Eric MILLON a Eric FOGARASSY. *Recent Advances in Laser Processing of Materials*. Burlington: Elsevier, 2006. ISBN 9780080459714.

[2] JERVIS, T.R., M. NASTASI a J.-P. HIRVONEN. *Advances in excimer laser surface processing of materials*. In: *Digest IEEE/Leos 1996 Summer Topical Meeting. Advanced Applications of Lasers in Materials and Processing [online]*. IEEE, 1996, s. 38-39 [cit. 2017-10-11]. DOI: 10.1109/LEOSST.1996.540669. ISBN 0-7803-3175-3. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/540669/>

[3] LAWRENCE, Jonathan, ed. *Advances in laser materials processing: technology, research and applications*. Oxford: Woodhead Publishing, 2010. Woodhead Publishing in mechanical engineering. ISBN 978-1-84569-474-6.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Pavel Kejzlar, Ph.D.

Datum zadání bakalářské práce: 13. října 2017

Termín odevzdání bakalářské práce: 14. května 2018

prof. Ing. Zdeněk Plíva, Ph.D.  
děkan



prof. Ing. Petr Louda, CSc.  
vedoucí katedry

V Liberci dne 13. října 2017

## Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé bakalářské práce a konzultantem.

Současně čestně prohlašuji, že tištěná verze práce se shoduje s elektronickou verzí, vloženou do IS STAG.

Datum:

Podpis:

## **Prohlášení**

Rád bych tímto poděkoval vedoucímu své bakalářské práce panu Ing. Pavlu Kejzlarovi, Ph.D. za cenné rady v průběhu celé bakalářské práce. Dále bych rád poděkoval odbornému konzultantovi panu Ing. Tomáši Pilvousekovi, Ph.D. za odbornou pomoc při přípravě a lepení vzorků a za cenné informace. V neposlední řadě bych rád poděkoval panu Ing. Martinu Stuchlíkovi za provedení termogravimetrické analýzy a panu Ing. Pavlu Doubkovi, Ph.D. za odborné rady při vyhodnocení výsledků tahové zkoušky.

Také bych rád poděkoval společnostem ŠKODA AUTO a.s. a Sigmaplast a.s. za poskytnutí materiálu a zapůjčení nástrojů.

## **Abstrakt**

Tato bakalářská práce se věnuje hodnocení vlivu laserového zpracování karosářských plechů na strukturu jejich povrchu a na pevnost jimi vytvořených lepených spojů. Byly připraveny vzorky karosářských plechů ošetřené různými intenzitami čistícího laseru. Z těchto plechů byly slepeny vzorky určené k tahové zkoušce dle normy ISO 11339:2010. Vliv laserového čištění na povrch byl zkoumán pomocí SEM a EDS analýzy povrchu. Byla prokázána čistící síla laseru, ale i poškození plechu, které způsobil. Kromě změn meze pevnosti byly sledovány i změny morfologie lomové plochy lepidla a typ jeho poruchy. Laserovým čištěním nebyla ovlivněna adheze lepidla k podkladovému materiálu.

## **Klíčová slova**

Laserové čištění, lepený spoj, karosářské plechy, koroze, automobilový průmysl, struktura

## **Abstract**

This bachelor thesis deals with the evaluation of the influence of laser processing of body panels on the structure of their surface and on the strength of the glued joints. Samples of body sheets treated with different intensities of the cleaning laser were prepared. Specimens for tensile testing according to ISO 11339: 2010 were tied from these sheets. The effect of laser cleaning on the surface was investigated using SEM and EDS surface analysis. The cleaning power of the laser has been proven, as well as the damage to the sheet that it caused. Apart from the changes in the strength limit, changes in the morphology of the glue surface and the type of its failure were observed. Laser The adhesion wasn't affected significantly by the laser cleaning.

## **Key words**

Laser cleaning, glued joint, bodysheets, corrosion, automotive, structure



## Obsah

Seznam použitých zkratk.....	- 10 -
1. Úvod.....	- 11 -
2. Teoretická část .....	- 12 -
2.1. Teorie lepení.....	- 12 -
2.1.1. Adheze.....	- 12 -
2.1.2. Koheze.....	- 13 -
2.1.3. Vysvětlení adhezních sil.....	- 14 -
2.1.4. Principy selhání lepeného spoje .....	- 17 -
2.1.5. Rozdělení lepidel.....	- 18 -
2.2. Teorie laseru.....	- 19 -
2.2.1. Světlo .....	- 19 -
2.2.2. Vnitřní struktura atomu.....	- 20 -
2.2.3. Spontánní emise .....	- 21 -
2.2.4. Absorpce záření.....	- 23 -
2.2.5. Stimulovaná emise .....	- 23 -
2.2.6. Populační inverze .....	- 24 -
2.2.7. Vlastnosti laseru.....	- 27 -
2.2.8. Stavba laseru .....	- 29 -
2.3. Metody čištění povrchu .....	- 30 -
3. Experimentální část.....	- 32 -
3.1. Použité vybavení.....	- 32 -
3.2. Příprava experimentu.....	- 33 -
3.3. Příprava vzorků.....	- 34 -
3.4. Úprava povrchu.....	- 35 -
3.5. Korozní zkouška.....	- 38 -
3.6. Lepení vzorků .....	- 38 -
3.7. Tahová zkouška.....	- 40 -
3.8. Vyhodnocení laserové úpravy .....	- 41 -
3.9. Vyhodnocení tahové zkoušky .....	- 42 -
3.10. Vyhodnocení termogravimetrické zkoušky.....	- 42 -
3.11. Vyhodnocení korozní zkoušky .....	- 43 -
4. Výsledky experimentu.....	- 44 -
4.1. Struktura povrchu po interakci s laserem .....	- 44 -
4.1.1. Analýza pomocí SEM .....	- 44 -

4.1.2.	EDS analýza.....	- 51 -
4.2.	Vliv laserování na pevnost lepených spojů .....	- 53 -
4.3.	Morfologie porušení lepených spojů.....	- 55 -
4.4.	Termogravimetrická zkouška.....	- 61 -
4.5.	Výsledky korozní zkoušky .....	- 62 -
5.	Diskuze .....	- 63 -
5.1.	Příprava vzorků.....	- 63 -
5.2.	Čištění povrchu.....	- 63 -
5.3.	Vliv laseru na povrch plechu .....	- 64 -
5.4.	Lepení plechů.....	- 65 -
5.5.	Vypékání vzorků .....	- 66 -
5.6.	Tahová zkouška.....	- 66 -
5.7.	Vliv laseru na pevnost lepeného spoje.....	- 66 -
5.8.	Korozní zkouška.....	- 68 -
6.	Závěr.....	- 69 -
	Seznam použitých zdrojů.....	- 71 -
	Seznam obrázků .....	- 73 -
	Seznam grafů .....	- 74 -
	Seznam tabulek.....	- 74 -
	Obsah CD .....	- 75 -

## Seznam použitých zkratk

EDS	energie-disperzní analýza
SEM	rastrovací elektronový mikroskop
RTG	rentgen, rentgenový
LASER	light amplification by stimulated emission of radiation
MASER	microwave amplification by stimulated emission of radiation
TGA	termogravimetrická analýza
ŠA	ŠKODA AUTO a.s.
MP	mez pevnosti
ISO	International Organization for Standardization
ks	kus
atom. %	atomární procenta
hm. %	hmotnostní procenta

# 1. Úvod

Již od dávných dob se lidé snažili spojovat různé materiály rozličnými způsoby. Jednoduché způsoby byly postupně nahrazovány způsoby složitějšími. Rozvoj v oblasti spojování materiálu umožňoval výrobu čím dál složitějších nástrojů. Jedním z nejdůležitějších způsobů spojování materiálů je lepení. Tato metoda spojování materiálů je lidstvu známa již více jak 10 000 let. Lepení, dříve řazené mezi doplňkové metody, je dnes natolik důležité, že jej lze označit za jednu z nejdůležitějších metod. Jeho význam neustále roste a dá se předpokládat, že s rozvojem chemického průmyslu bude růst i nadále.

V automobilovém průmyslu bylo svařování dlouhou dobu považováno za nejvhodnější způsob spojování materiálů i přes vznik těžko předvídatelných změn materiálu v místě sváru, které mohou způsobit pokles mechanických i korozních vlastností. V současnosti jsou lepidla natolik vyspělá, že lze nezanedbatelnou část pevných spojů lepit. Hlavní důvodem proč se přechází k lepení, je omezení tepelného namáhání spojovaných materiálů a možnost spojit materiály svařováním nespojitelné. Lepidla se tak stala významnou součástí výroby automobilů a v současnosti je u moderních aut lepeno přibližně 10 % všech spojů, přičemž jejich celková délka činí 70 m. K zajištění ideálních vlastností lepidla je však vhodné zbavit lepené povrchy nečistot. Moderní a rychle se rozvíjející metodou je čištění povrchu pomocí laserového paprsku.

Cílem bakalářské práce je zjistit vliv laserového paprsku na povrch několika běžně používaných karosářských plechů. Důraz je kladen na pozorování změn struktury a chemického složení povrchu způsobených procesem laserování. V druhé části práce je cílem zjistit vliv laserové úpravy povrchu na pevnost lepeného spoje. Důraz je kladen na pozorování rozdílů v morfologii lepidla a typu porušení spoje.

Práce se okrajově věnuje vlivu laserové úpravy na korozní vlastnosti plechu.

## 2. Teoretická část

V teoretické části se blíže seznámíme se základy týkajícími se spojování materiálu a laseru.

### 2.1. Teorie lepení

Proces lepení lze definovat jako vytváření spojení dvou materiálů (adherentů) prostřednictvím třetí látky (adheziva). Toto spojení je nerozebíratelné nebo částečně rozebíratelné. V průběhu lepení se vytvoří lepený spoj, který má v závislosti na tvaru povrchů lepených částí, množství lepidla, apod. různou plochu a tvar. Lepidlo v lepeném spoji zajišťuje přilnutí povrchů pevných předmětů a přenos mechanické síly, čímž dojde k vytvoření pevného spojení mezi nimi. Toto přilnutí si lze vysvětlit kombinací primárních vazebných sil (chemické vazby), sekundárních vazebných sil (Van der Waalsovy síly, vodíkový můstek) a elektrostatických sil.

Lepený spoj však nemusí plnit pouze funkci pevného spojení. S ohledem na umístění a požadavky se využívá různých lepidel v závislosti na jejich specifickém účelu. Dle jejich hlavní funkce, dělíme lepidla na vysokopevnostní (primární funkcí je vytvoření nedělitelného spoje s vysokou odolností vůči mechanickému namáhání), antivibrační (důraz je kladen na tlumení vibrací procházejících přes daný spoj), akustické (mají za úkol významně tlumit přenos zvukových vln ve slyšitelných frekvencích), těsnící (fungují jako výplň zabraňující nechtěnému průchodu látek přes daný spoj) a hybridní (plní dvě a více funkcí v lepeném spoji). [1, 2, 3, 4, 6, 7]

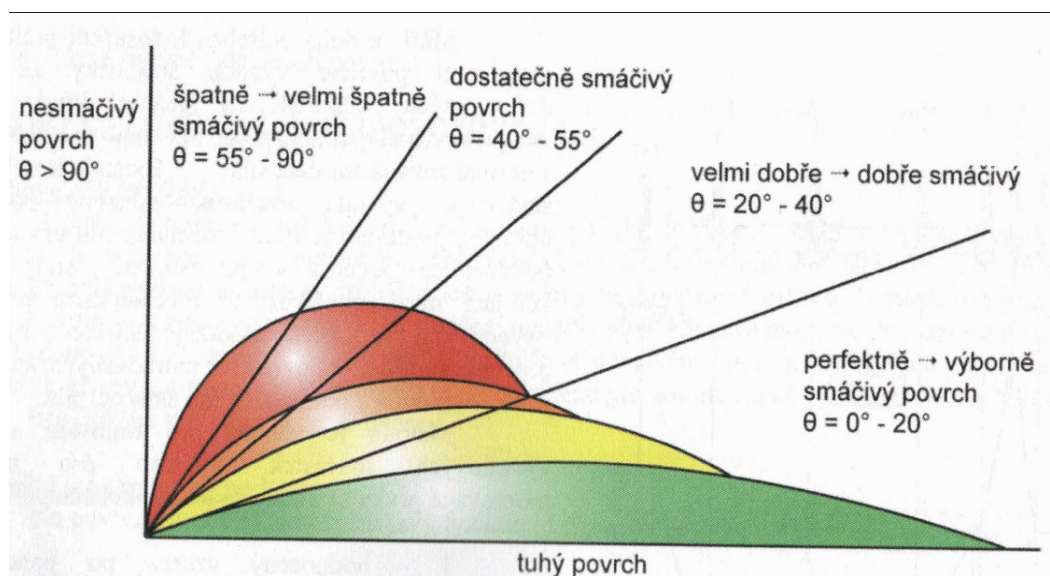
V teorii lepení se vychází ze dvou základních pojmů: adheze a koheze.

#### 2.1.1. Adheze

Adheze je definována jako schopnost lepidla vázat se na povrch lepeného materiálu. Jedná se o přitažlivé síly mezi molekulami lepidla a substrátu. Tyto síly s rostoucí vzdáleností klesají jako funkce  $r^{-7}$ , proto je důležité, aby vzdálenost molekul lepidla od molekul substrátu byla co nejmenší, tedy aby lepidlo dokonale přilnulo k povrchu, včetně všech dutin a záhybů.

Schopnost lepidla přilnout k povrchu substrátu označujeme jako smáčivost. Ideální stav nastává při dokonalé smáčivosti, kdy je povrchové napětí lepidla menší

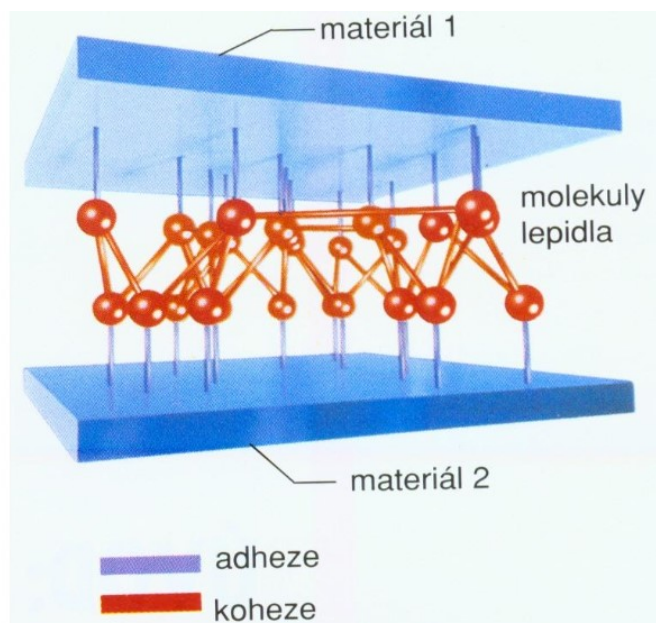
než kritické povrchové napětí substrátu a lepidlo se rovnoměrně rozprostře po celém povrchu substrátu. Smáčivost povrchu lepidlem je závislá na elevačním úhlu. Jedná se o úhel, který svírá kapka lepidla s povrchem substrátu (Obrázek 1). Čím menší je tento úhel, tím lépe je povrch daným lepidlem smáčen. Smáčivost závisí vždy na kombinaci kapaliny a povrchu. Dobře smáčivými označujeme ty kombinace lepidla a povrchu, jejichž elevační úhel je menší než  $40^\circ$ . [1, 2, 3, 4, 6, 9]



Obrázek 1: Schéma elevačního úhlu, Zdroj [5]

### 2.1.2. Koheze

Kohezi nazýváme vlastní soudržnost lepidla či materiálu (Obrázek 2). Je dána přitažlivými silami mezi molekulami materiálu. Při mechanickém namáhání může u materiálu docházet ke kohezni poruše, tj. narušení Van der Waalsových sil a mechanických vazeb propletených konců polymerních řetězců. Podobně jako například u řetězu dochází k porušení spoje vždy v nejslabším místě řetězce. Koheze je ovlivněna chemickým složením a u polymerů bývá ovlivněna primárními, sekundárními a terciálními strukturami. [1, 2, 3, 4, 6, 9]

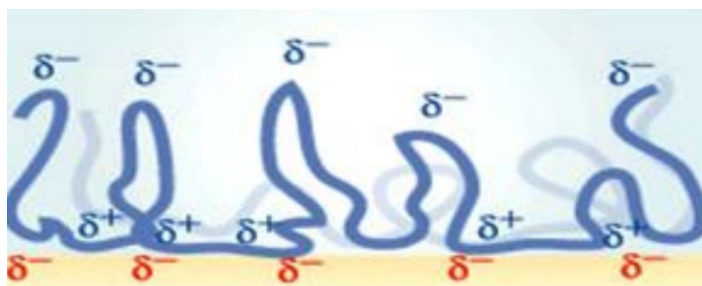


Obrázek 2: Schéma adheze a koheze, Zdroj: [1]

### 2.1.3. Vysvětlení adhezních sil

#### Elektrostatická teorie

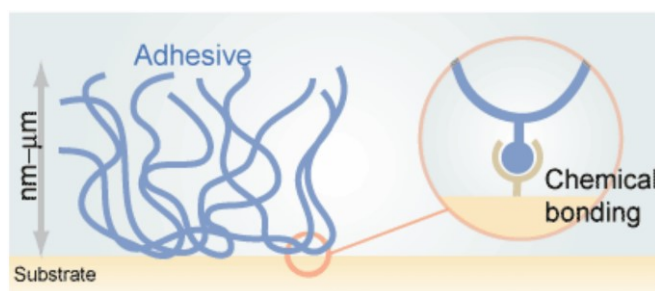
Teorie elektrostatických sil je založena na principu přitažlivosti opačných elektrických nábojů. Tato teorie pracuje s myšlenkou opačně nabitých desek jako např. u kondenzátoru. Na jedné straně rozhraní lepidlo-substrát se vytvoří vrstva kladně nabitých částic a na druhé záporně nabitých částic. (Obrázek 3) Při oddalování těchto opačně nabitých vrstev je třeba dodat energii rovnající se rozdílu potenciálů. Tato teorie je nedostačující, jelikož nedokáže plně objasnit vznik adheze mezi materiály s velmi podobným složením, u kterých by nemělo docházet k tvorbě této dvojvrstvy. [1, 2, 3, 4, 6, 9]



Obrázek 3: Schéma elektrické dvojvrstvy na rozhraní materiálů, Zdroj: [1]

## Chemická teorie

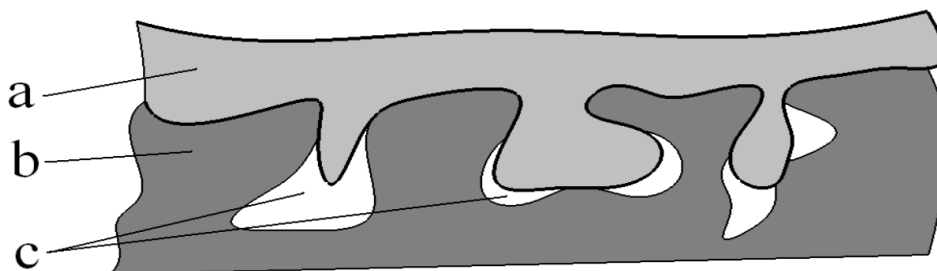
Teorie chemických vazeb staví na vzniku primární vazby (kovaletní či iontové) mezi lepidlem a substrátem. (Obrázek 4) Tvorba těchto vazeb závisí na reaktivnosti lepidla a substrátu. Podpořena může být vhodnou úpravou chemického složení povrchu, napomáhajícímu tvorbě těchto vazeb. Je-li pevnost takto utvořených vazeb větší než kohezní pevnost lepených materiálů či lepidla, bude se při selhání vždy jednat o kohezní poruchy. Velký význam na celkovou pevnost lepeného spoje bude mít tedy koheze lepidla a substrátu. [1, 2, 3, 4, 6, 9]



Obrázek 4: Schéma tvorby chemických vazeb na rozhraní materiálů, Zdroj: [1]

## Mechanická teorie

Mechanická teorie je založena na myšlence pronikání lepidla do nerovností, trhlin a kavit povrchu substrátu. Při následném vytvrdnutí lepidla dojde k uvěznění částí lepidla v těchto skulinách a spoj drží pohromadě mechanické síly. (Obrázek 5) rostoucím počtem povrchových nerovností úměrně roste pevnost lepeného spoje. Lze předpokládat, že s nižší viskositou lepidla se zvýší adheze, do chvíle kdy lepidlo bude již tak viskózní, že vteče do každého póru. Důležitým faktorem se zde stává koheze lepidla, která rovněž ovlivňuje pevnost spoje. Tuto teorii nelze uplatnit u povrchů, které jsou absolutně hladké a bez povrchových vad. [1, 2, 3, 4, 6, 9]



Obrázek 5: Schéma mechanický zámků. a - vrstva adheziva, b - povrch adherentu, c - lepidlem nezaplňené prostory, Zdroj: [10]



## Teorie tenké hraniční vrstvy

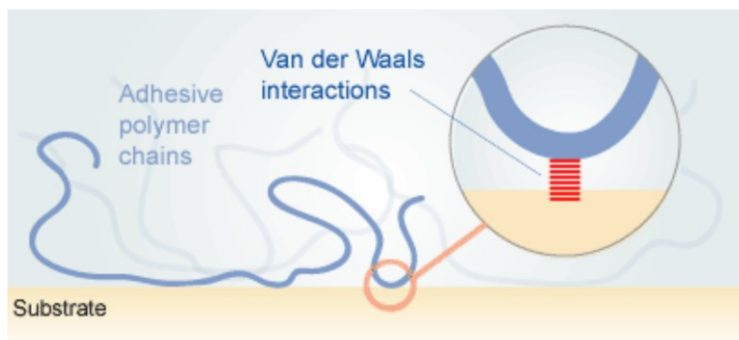
Teorie tenké hraniční vrstvy staví na přítomnosti látky s nízkou kohezí na rozhraní lepidla a substrátu. Na některých površích se mohou vyskytovat nečistoty, které při slepení oslabují tento spoj svojí nízkou kohezí. (Obrázek 6) Může se jednat o nečistoty např. vrstva oxidu kovu, olej, voda nebo i vzduch při špatné smáčivosti povrchu lepidlem. Tato vrstva se při namáhání díky své nízké kohezii roztrhne a vytváří dojem adhezní poruchy mezi lepidlem a lepeným povrchem, přestože se jedná o kohezní poruchu slabé hraniční vrstvy. [1, 2, 3, 4, 6, 9]



Obrázek 6: Schéma tenké vrstvy vytvořené mezi adhezivem a adherentem, Zdroj: Autor

## Adsorpční teorie

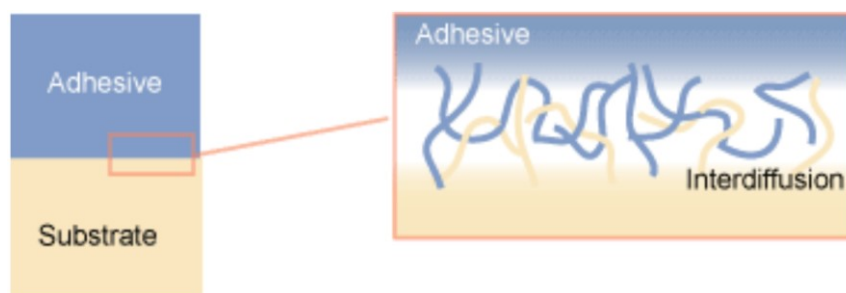
Adsorpční teorie vysvětluje adhezi jako meziatomární ne vazebnou interakci pomocí sekundárních vazeb (Van der Waalsových sil a vodíkových můstků). (Obrázek 7) Při kontaktu molekul substrátu s molekulami lepidla dojde k vytvoření sekundární vazby. Tvorba sekundární vazby je podmíněna přítomností polárních skupin u lepidla i substrátu. [1, 2, 3, 4, 6, 9, 20]



Obrázek 7: Schéma tvorby sekundárních vazeb na povrchu adherentu, Zdroj: [6]

## Difuzní teorie

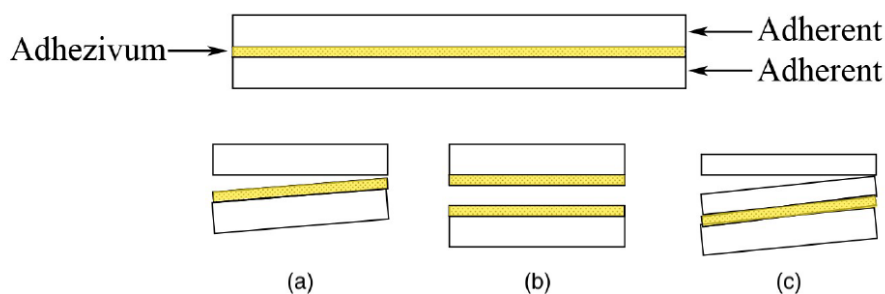
Tato teorie zakládá na myšlence difuze molekul lepidla mezi molekuly substrátu. (Obrázek 8) Tato teorie se nejvíce uplatní v případě, kdy lepidlo i substrát jsou oba polymery. Dlouhé makromolekuly polymerů se vzájemně zaplétají a tím zvyšují pevnost spoje. Pevnost spoje je závislá na teplotě, času a molekulové hmotnosti adheziva a adherentu. Tato teorie nevysvětluje adhezi u látek, které nedifundují. [1, 2, 3, 4, 6, 9, 21]



Obrázek 8: Schéma difuze molekul na rozhraní adheziva a adherentu, Zdroj: [1]

### 2.1.4. Principy selhání lepeného spoje

Jak bylo již vysvětleno v předchozí kapitole, lepený spoj může selhat několika způsoby. (Obrázek 9) Jedná se o poruchy adhezní, kohezní nebo kombinaci obou poruch najednou. Adhezní poruchou rozumíme takovou poruchu, při které dojde k porušení soudržnosti vazby lepidlo – substrát. Tato situace obvykle nastává v případech, kdy lepidlo špatně přilne k substrátu, nebo v případě, že se mezi lepidlo a substrát dostaly nečistoty, které vytvořily hraniční vrstvu. Pro adhezní poruchu je typické úplné odtržení lepidla od substrátu. Kohezní poruchou rozumíme poruchu, při které se vazba lepidlo–substrát zachovává a místo toho dojde k porušení vazby lepidlo – lepidlo nebo k poruše struktury samotného substrátu. V takovém případě má lepidlo lepší adherentní vlastnosti než jsou kohezní. [1, 2, 3, 4, 6, 9, 21]



Obrázek 9: Schéma typu poruch lepeného spoje. a - selhání adheze, b - selhání koheze adheziva, c - selhání koheze adherentu, Zdroj: [9]

### 2.1.5. Rozdělení lepidel

Lepidla lze dle svého původu a povahy dělit do několika kategorií. Existuje několik typů dělení, v následující kapitole jsou lepidla dělena na přírodní a syntetická. Přírodní lepidla lze dále rozdělit na organická a anorganická. Mezi přírodní organická lepidla lze zařadit například pryskyřici stromů, včelí vosk, přírodní kaučuk, sójový olej, kasein aj. Mezi anorganická přírodní lepidla řadíme parafín, asfalt, silikáty apod. Syntetická lepidla jsou povětšinou polymerního původu a lze je rozdělit na termoplastická, termosetová a elastomerní.

Termoplasty jsou polymerní látky, které jsou za normální teploty pevné a při překročení teploty skelného přechodu se stávají tvárnými. Po ochlazení na běžnou teplotu opět ztvrdnou a zachovávají si tvar, ve kterém zchladly. U termoplastů lze tento proces opakovat, nicméně s každým opakováním molekuly degradují. Pevnost termoplastů při běžných teplotách je dána propletením polymerních řetězců, které drží pospolu díky mezimolekulárním interakcím (Van der Waalsovy síly a vodíkové můstky). S rostoucí teplotou se volný prostor molekul těchto řetězců zvětšuje a polymer měkne. Výhodou termoplastických lepidel je možnost změny tvaru, či rozebrání spoje při zahřátí nad teplotu skelného přechodu.

Opakem termoplastů jsou termosety. Jedná se o polymerní látky, u kterých při zahřátí nad kritickou teplotu proběhne chemická reakce a polymer se zasítuje. Toto zasítování je trvalé, proto termosety nelze znovu roztavit a vytvarovat. Výhodou termosetových lepidel je jejich stálost vůči teple, záření a chemická odolnost.

Elastomery jsou polymerní látky s vysokou elasticitou. Jedná se o pevné látky, mezi jejichž největší přednosti patří schopnost měnit při zatížení tvar a následně se

při uvolnění napětí vrátit do původního tvaru. V dnešní době se lze již setkat nejen s termosetovými, ale i s termoplastickými elastomery, které kombinují výhody elastomerů a termoplastů. [1, 3, 4, 7, 9]

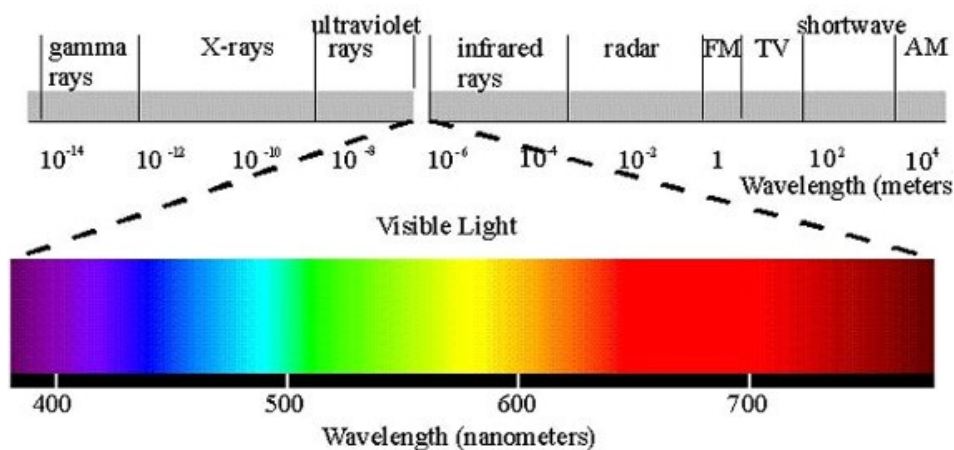
## **2.2. Teorie laseru**

LASER (zkratka anglického Light Amplification by Stimulated Emission of radiation) je zařízení zesilující, či vytvářející paprsky elektromagnetického záření pomocí stimulované emise fotonů z laserového média. Již v roce 1900 predikoval Max Planck vztah mezi frekvencí záření a jeho energií. Planck tvrdil, že záření může existovat pouze kvantované, tj. může nabývat pouze konkrétních hodnot, nazývaných kvanta. Albert Einstein tuto teorii v roce 1905 potvrdil při objevu fotoelektrického jevu. Einstein nazval tyto diskrétní kvantové částice fotony a otevřel dveře dalšímu výzkumu těchto částic. Již v roce 1917 Albert Einstein předpověděl možnost vzniku zařízení schopného stimulované emise, ale trvalo dalších 40 let, než Charles Hard Townes postavil zařízení zvané MASER (Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation). Rozdíl mezi maserem a laserem je ve vlnové délce (resp. frekvenci) emitovaného záření (zatímco laser vyzařuje elektromagnetické záření ve viditelném spektru, maser vyzařuje v mikrovlnách, což je záření s řádově menší energií). Od šedesátých let poté došlo k dalšímu rozvoji laserů a k jeho masivnímu uplatnění ve výzkumu, vojenství, průmyslu, spotřební elektronice i ve zdravotnictví. [12, 13, 14, 15, 16]

### **2.2.1. Světlo**

K vysvětlení principu fungování laseru je třeba porozumět vlastnostem světla a jeho interakcím s okolním světem. Elektromagnetické záření se chová z části jako vlnění a z části jako záření. Einstein zastával vysvětlení, že elektromagnetické záření je tvořeno částicemi (fotony) a proud těchto částic vytváří vlnění. Viditelné světlo je dle dnešního vysvětlení fyziky elektromagnetické záření o vlnových délkách v intervalu od 400 nm do 700 nm. (Obrázek 10) Tyto hodnoty nejsou zvoleny náhodně, nýbrž jedná se o záření se specifickou vlnovou délkou, kterou je lidské oko schopno detekovat.

Různé vlnové délky v tomto intervalu vnímáme jako různé barvy, červenou kolem 700 nm, zelenou kolem 500 nm a fialovou kolem 400 nm. Elektromagnetické záření s vlnovou délkou menší než 400 nm nazýváme ultrafialové záření (UV), záření od 400 nm do 700 nm nazýváme viditelné (VIS) a záření s vlnovou délkou větší než 700 nm nazýváme infračervené (IR). Přírodním zdrojem světla jsou například Slunce a oheň, do umělých se řadí např. žárovky, zářivky, LED diody apod. [8, 12, 13, 14]

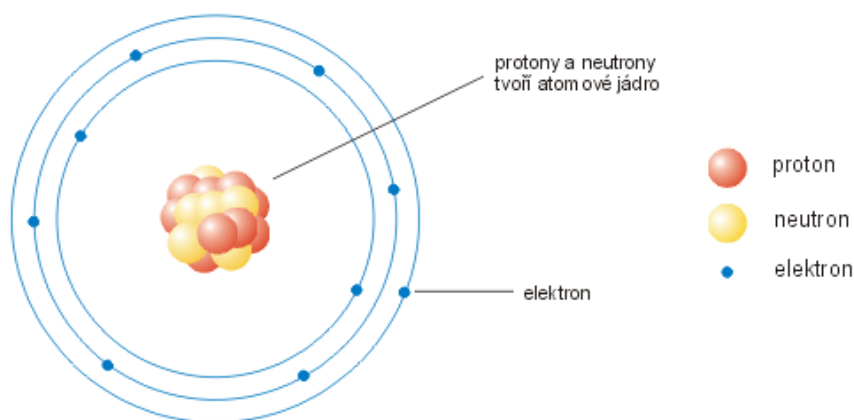


Obrázek 10: Spektrum EM záření. Viditelné spektrum je zvětšeno a jednotlivým vlnovým délkám je přiřazena příslušná barva, Zdroj: [8]

### 2.2.2. Vnitřní struktura atomu

Každý atom se skládá z jádra a elektronového obalu. (Obrázek 11) Jádro je složeno z protonů s kladným nábojem a neutronů bez náboje, které jsou drženy pospolu pomocí silné jaderné interakce. Velikost jader se pohybuje řádově okolo 10<sup>-15</sup> m. Okolí jádra je tvořeno elektronovým obalem, který jak název napovídá, je tvořen záporně nabitými elektrony. Tyto elektrony jsou k jádru vázány pomocí elektromagnetických sil. Celková velikost atomu se pohybuje řádově okolo 1 Å což odpovídá 10<sup>-10</sup> m. Elektrony jsou okolo atomu rozprostřeny v různě energeticky výhodných vrstvách. Čím blíže je elektron k jádru tím menší má energii. Jednotlivé stavy elektronů se popisují pomocí 4 hodnot; hlavním kvantovým číslem, vedlejším kvantovým číslem, magnetickým číslem a spinem. Jelikož se jakýkoli systém v přírodě vždy snaží dostat do stavu s nejmenší energií, budou mít elektrony tendenci být co nejbližší jádru. Dle kvantové teorie lze ovšem do jedné slupky vměstnat pouze omezený počet elektronů, tudíž po zaplnění

nejnižší energetické hladiny se další elektrony musí začít řadit do energeticky vyšší hladiny. [11, 12, 13, 14, 15]



Obrázek 11: Schéma atomu s 9 elektrony na 3 energetických hladinách, Zdroj: [11]

### 2.2.3. Spontánní emise

Jak bylo již nastíněno v předchozí kapitole, elektrony obsazují různé energetické hladiny. Pokud se elektron nachází v excitovaném stavu s energií  $E_2$  a na energeticky nižší hladině s energií  $E_1$  je volné místo, bude se elektron snažit svojí energii snížit a po určité době přeskočí z  $E_2$  na  $E_1$ . Při tomto přechodu dojde k uvolnění fotonu s energií odpovídající změně energie elektronu. (Obrázek 12a) Tento proces se nazývá spontánní emise.

Uvažujme případ, kdy elektron přechází z jedné hladiny na druhou. Zvolme si  $E_2$  energii excitovaného stavu a  $E_1$  energii základního stavu. U spontánní emise musí platit, že:

$$E_2 > E_1 \quad (1)$$

Při uskutečnění přechodu se uvolní energie  $\Delta E$  [J] dle rovnice:

$$\Delta E = E_2 - E_1 \quad (2)$$

Za zákona zachování energie platí, že se energie neztrácí a musí se tedy přeměnit na jinou formu energie, v tomto případě na foton. Platí, že:

$$\Delta E = E_{fotonu} \quad (3)$$

Energie fotonu je kvantovaná a platí pro ni vzorec:

$$E_{fotonu} = h \cdot f \quad (4)$$

Dosazením do rovnice (3) získáme vztah mezi energií přechodu elektronů a frekvencí záření:

$$\Delta E = h \cdot f \quad (5)$$

kde  $h$  ( $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$  J·s) je Planckova konstanta a  $f$  [Hz] je frekvence elektromagnetického záření.

Chceme-li místo frekvence používat vlnovou délku  $\lambda$  [nm] musíme použít vztah pro frekvenci, vlnovou délku a rychlost šíření:

$$c = f \cdot \lambda \quad (6)$$

$$f = \frac{c}{\lambda} \quad (7)$$

Kde  $c$  [ $c = 299\,792\,458$  m·s<sup>-1</sup>] je rychlost světla ve vakuu

Po dosazení do rovnice získáme:

$$\Delta E = \frac{h \cdot c}{\lambda} \quad (8)$$

Z předchozích rovnic jde vyčíst přímá úměra mezi energií přechodu a frekvencí vyzářeného fotonu (resp. nepřímá úměra mezi energií přechodu a vlnovou délkou vzniklého záření).[12, 13, 14, 15]

#### 2.2.4. Absorpce záření

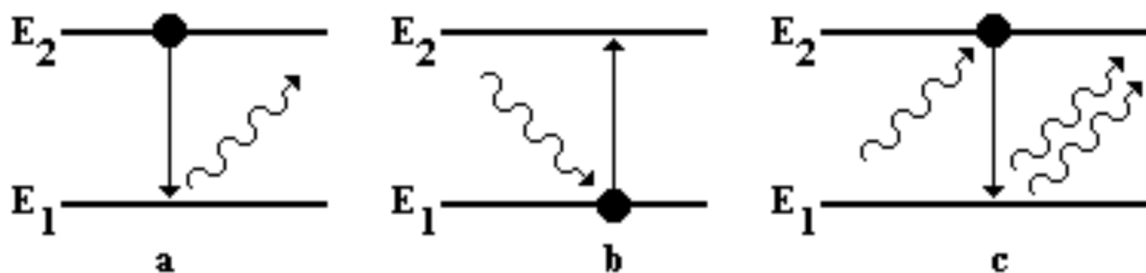
Předešlá kapitola popisuje principy vyzařování fotonů při energetických přechodech elektronů směrem k nejnižší energii. Proces snižování energie elektronů a vyzáření fotonů ovšem funguje i obráceně. Je-li atom vystaven záření, které obsahuje fotony s energií odpovídající nějakému energetickému přechodu, dochází k opačnému jevu tzv. absorpci záření. (Obrázek 12b) Při tomto ději je foton o specifické energii (tj. specifické vlnové délce) pohlcen a elektron excitován na vyšší energetickou hladinu. energii potřebnou k excitaci elektronu ovšem nemusí dodávat pouze fotony, nýbrž může být dodána pomocí tepla či elektrického výboje. Po excitaci se elektron pohybuje na vyšší energetické hladině a po určitém časovém úseku opět přechází do základního stavu. [12, 13, 14, 15]

#### 2.2.5. Stimulovaná emise

V předchozích kapitolách byla popsána absorpce fotonů při excitaci elektronů a spontánní emise fotonů při jejich navrácení do základní hladiny. Tyto procesy jsou náhodné a pro účely laseru se proto využívá procesu zvaného stimulovaná emise. Jedná se o v přírodě se nevyskytující proces, kdy jsou excitované elektrony vystaveny elektromagnetickému záření. Při stimulované emisi jsou excitované elektrony nuceny (stimulovány) příchozími fotony přejít na nižší energetickou hladinu. (Obrázek 12c) Podmínkou je, aby stimulující foton měl vlnovou délku odpovídající energii přechodu stimulovaného elektronu. Excitovaný elektron je při dopadu stimulujícího fotonu nucen vrátit se do základního stavu. Při přechodu elektronu z excitovaného do základního stavu dojde k vyzáření fotonu se stejnou fází a vektorem rychlosti, jako měl stimulující foton. V porovnání se spontánní emisí probíhá proces stimulované emise mnohem rychleji. Výhodou stimulované emise je, že všechny emitované fotony mají stejnou energii, stejnou vlnovou délku, jsou ve fázi a vektor rychlosti míří jedním směrem. Počet emitovaných fotonů ( $N$ ) je závislý na počtu excitovaných elektronů ( $N_e$ ) a počtu počátečních fotonů ( $N_o$ ) dle rovnice: [12, 13, 14, 15]

$$N = N_e + N_o \quad (9)$$





Obrázek 12: a - spontánní emise, b - absorpce záření, c - stimulovaná emise, Zdroj: [12]

### 2.2.6. Populační inverze

Jedním z přírodních zákonů je snaha čehokoli získat co nejmenší energii. Ukázkovým příkladem je například stok vody do místa s nejnižší potenciální energií. Méně názorným příkladem může být chemická vazba, která je méně energeticky náročná, než dva atomy existující sami o sobě. Tento rozdíl energií je také důvodem, proč lze většinu plynů najít v dvouatomových molekulách ( $H_2$ ,  $O_2$ ,  $N_2$ ). Stejně tak i elektrony v atomu se snaží mít co nejmenší energii, proto jich lze většinu najít v nejnižších energetických hladinách. Obecně lze říci, že za normálního stavu je počet elektronů ( $N_1$ ) v nižším energetickém stavu ( $E_1$ ) vyšší, než počet elektronů ( $N_2$ ) ve vyšším energetickém stavu ( $E_2$ ). Platí, že:

$$N_1 > N_2 \quad (10)$$

Se vzrůstající teplotou roste energie atomů a tím pádem také zastoupení elektronů na vyšší hladině, ale toto zastoupení nikdy nepřekračuje zastoupení na nižší hladině. Lze napsat, že:

$$N_1 \geq N_2 \quad (11)$$

Aby bylo možné mít větší populaci elektronů v  $E_2$  než v  $E_1$ , je třeba mít tři a více energetických hladin. Počítejme tedy systém s  $N$  elektrony a třemi hladinami energií. Součet elektronů na jednotlivých hladinách musí být roven celkovému počtu elektronů.

Hladina  $E_1$  má nejmenší energii, hladina  $E_2$  má energii větší než hladina  $E_1$ , ale menší než  $E_3$ , a hladina  $E_3$  má energii nejvyšší. Platí tedy:

$$N = N_1 + N_2 + N_3 \quad (12)$$

$$E_1 < E_2 < E_3 \quad (13)$$

Abychom získali populační inverzi, je třeba mít v prvním excitovaném stavu ( $E_2$ ) více elektronů než v základním stavu ( $E_1$ ). Chceme tedy aby:

$$N_1 < N_2 \quad (14)$$

Jak bylo již zmíněno dříve, za normálních podmínek jsou vyšší energetické hladiny méně zaplněné než ty nižší. To znamená, že:

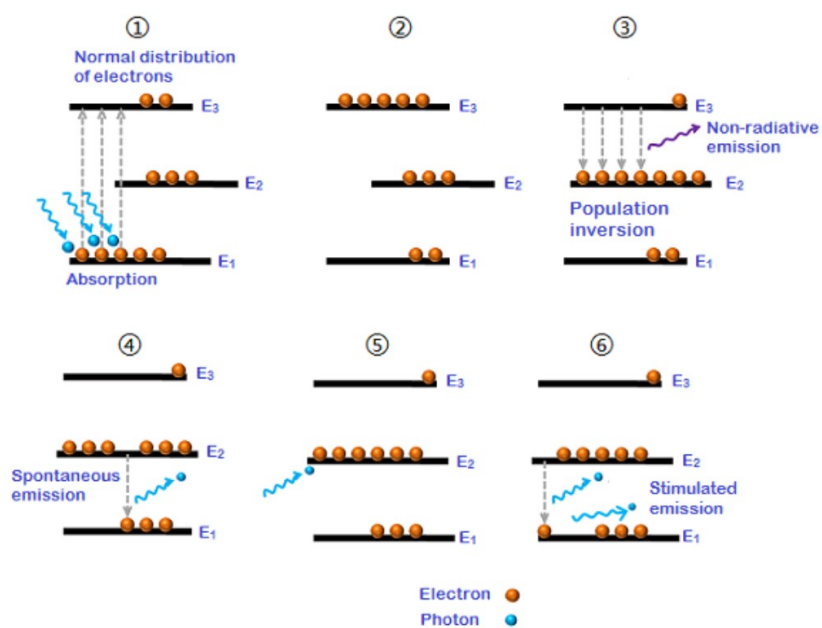
$$N_1 > N_2 > N_3 \quad (15)$$

K dosažení populační inverze se využívá excitace elektronů ze základního stavu ( $E_1$ ) na druhý excitovaný stav ( $E_3$ ). V prvním kroku je potřeba dodat energii do systému, aby elektrony byly schopny přeskočit na vyšší hladinu. První možností je ozáření elektronů fotony s vlnovou délkou odpovídající energii přechodu potřebného k přechodu. Při optické stimulaci jsou fotony pohlceny a elektrony přeskočí ze základní ( $E_1$ ) na druhou excitační hladinu ( $E_3$ ). Druhou možností dodání energie je elektrický výboj, kdy dochází ke srážce elektronu nesoucího elektrický náboj s elektronem atomu a část kinetické energie pohybujícího se elektronu je využita na excitaci elektronu atomu ze základního stavu ( $E_1$ ) na druhý excitovaný ( $E_3$ ). Dalším způsobem, jak dodat energii je pomocí tepla. Poslední možností excitace elektronů je chemická reakce. V druhém kroku většina těchto excitovaných elektronů spadne z druhého excitovaného stavu ( $E_3$ ) na první excitovaný stav ( $E_2$ ). Přechod z druhé  $E_3$  na  $E_2$  je doprovázen uvolněním energie ve formě jiné než fotonu (např. tepla). V prvním excitovaném stavu ( $E_2$ ) jsou elektrony schopny zůstat déle, jelikož platí, že čím vyšší energetická hladina, tím kratší je doba, po kterou jsou elektrony schopny vydržet na dané hladině. Díky

rozdílům v čase, po který se elektrony na dané hladině udrží, se excitované elektrony začínou hromadit na druhé energetické hladině ( $E_2$ ) a vzniká tak situace kdy:

$$N_2 > N_1 > N_3 \quad (16)$$

Tento stav se nazývá populační inverze. Následně dojde ke spontánní emisi jednoho fotonu při přechodu elektronu z prvního excitovaného stavu ( $E_2$ ) do základního ( $E_1$ ). Tento foton následně reaguje s excitovanými elektrony v  $E_2$  a iniciuje stimulovanou emisi dalších fotonů. Výsledkem je uvolnění velkého množství fotonů se stejnou fází, energií a vektorem rychlosti. Pro zjednodušení zde byl popsán pouze tříúrovňový laser, v praxi se však využívá čtyřúrovňových i pětiúrovňových. Výhodou více úrovní je vyšší účinnost a stabilita laseru. [12, 13, 14, 15]

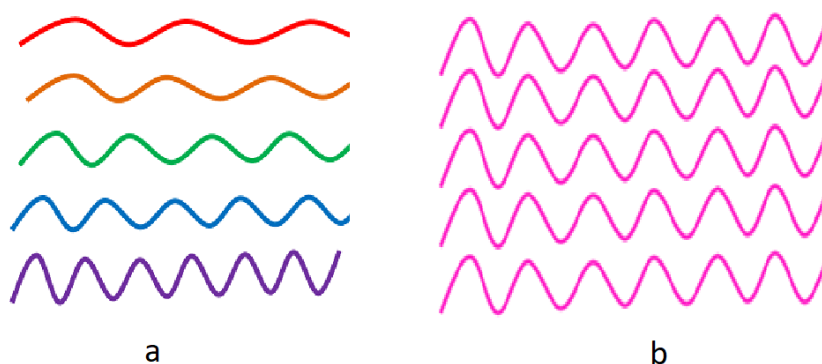


Obrázek 13: Schéma procesu stimulované emise v systému se 3 energetickými hladinami, Zdroj: [13]

## 2.2.7. Vlastnosti laseru

Laserem produkované světlo má kvůli svému umělému původu několik rozdílných vlastností oproti přírodnímu světlu ze Slunce.

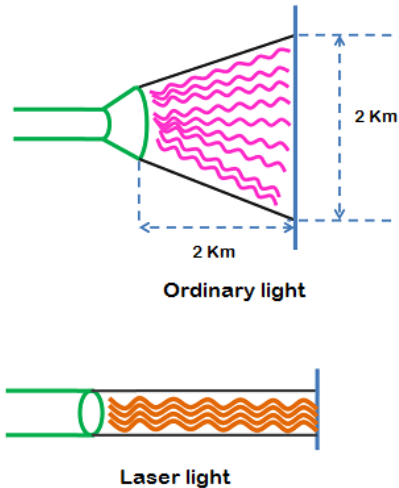
Přírodní světlo je nekoherentní (Obrázek 14a), zatímco laser produkuje světlo koherentní. (Obrázek 14b) V přírodních zdrojích světlo vzniká spontánní emisí, která se děje v průběhu času nahodile, navíc vzniklé světlo obsahuje mnoho vlnových délek, proto je nemožné, aby vlny byly ve fázi. Takovému světlu říkáme nekoherentní. V laseru na druhou stranu je díky stimulované emisi světlo ve fázi. První speciální vlastností laseru je tedy koherence vyzařovaného světla.



Obrázek 14: a - nekoherentní záření, b - koherentní záření, Zdroj: [13]

Druhou speciální vlastností laseru je monochromatické světlo. V přírodě se běžně světlo vyskytuje jako spektrum různých vlnových délek, světlo se skládá z několika barev (vlnových délek). Laser na druhou stranu produkuje světlo pouze s jednou vlnovou délkou. Specifická vlnová délka produkovaného světla je často jedním z nejdůležitějších parametrů daného laseru.

Jak již bylo popsáno v kapitole o stimulované emisi, fotony míří stejným směrem. Díky tomu světlo z laseru je možné udržet fokusované i na velké vzdálenosti. Pokud bychom měli například standartní žárovku (dnes nazývanou tepelný zdroj), světlo by se od vlákna (místa emise fotonů) šířilo v kuželu. Na druhou stranu světlo z laseru si udrží tvar válce a rozptyl do stran je minimální. (Obrázek 15) Fokusovatelnost je třetí výhodou laserů.



Obrázek 15: Nahoře rozptyl světla z běžných zdrojů, dole rozptyl laserového paprsku, Zdroj: [13]

Uvažujme rozptyl do stran natolik malý, že ho lze považovat za nulový. Známe vzorec pro výpočet intenzity světla:

$$I = \frac{P}{S} \quad (17)$$

kde  $I$  [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ] je intenzita světla,  $P$  [W] světelný výkon zdroje a  $S$  [ $\text{m}^2$ ] plocha ozářená laserem.

Plocha, ozářená laserem tvoří kruh. Známe-li jeho poloměr, můžeme vypočítat plochu pomocí vzorce pro výpočet plochy kruhu:

$$S = \pi \cdot r^2 \quad (18)$$

kde  $r$  [m] je poloměr kruhu.

Dosazením do rovnice (17) získáme vztah pro závislost intenzity na poloměru ozářeného kruhu.

$$I = \frac{P}{\pi \cdot r^2} \quad (19)$$

Z rovnice (19) je vidět nepřímá závislost intenzity paprsku na druhé mocnině poloměru ozářené plochy. Budou-li mít dva zdroje světla stejný výkon, přičemž první zdroj bude osvětlovat kruh s třikrát větším poloměrem, než druhý, bude intenzita paprsku prvního zdroje 9× menší. Obdobně tomu je i u laserů. Vysoká intenzita záření je proto čtvrtou výhodou laseru. [12, 13, 14, 15]

### **2.2.8. Stavba laseru**

Laser je komplikované zařízení, které se skládá ze tří základních komponent. Přestože tyto komponenty fungují na stejném principu, výsledné vlastnosti laseru jsou ovlivněny různým chemickým složením, kvalitou zpracování komponent a v neposlední řadě také vnitřním uspořádáním laseru s ohledem na jeho předpokládané využití.

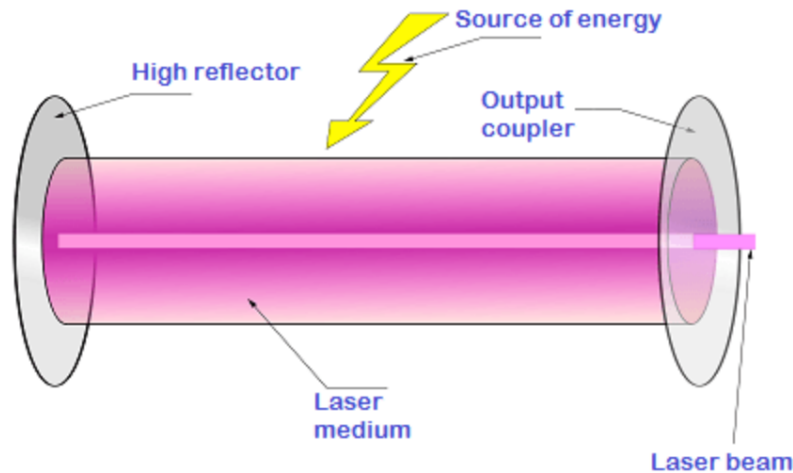
První důležitou součástí laseru je zdroj energie. Jedná se o součástku, jejímž účelem je vyvolávat populační inverzi elektronů. Zdroje se liší v závislosti na výkonu laseru, vlnové délce záření a na typu laserového média. energii lze dodávat ve formě elektrických výbojů, světla (fotonů) jiného laseru, tepla, atomárních srážek nebo chemické reakce.

Další klíčovou součástí laseru je laserové médium. Jedná se o materiál, který je schopen excitovat své elektrony na několik energetických hladin, a poté pomocí populační inverze produkovat světlo. Laserové médium je klíčová součástka určující vlastnosti (vlnovou délku) a kvalitu produkovaného světla. Laserové médium může být pevné (Nd: YAG), kapalné (Dye), plynné (CO<sub>2</sub>) i polovodičové (Si).

Třetí komponentou nezbytnou k sestavení laseru je optický rezonátor. Jedná se o soustavu dvou paralelních zrcadel. Jedno zrcadlo je reflexní, druhé je polopropustné. Vlastnosti těchto zrcadel určuje jejich tvar a povrchová úprava, která definuje úroveň propustnosti fotonů. Část fotonů projde přes polopropustné zrcadlo a opustí laser ve formě světelného paprsku.

Shrňme celý proces tvorby světla v laseru. (Obrázek 16) Pomocí zdroje energie jsou excitovány elektrony atomů laserového média na vyšší energetické hladiny. Elektrony přecházejí na energeticky nižší hladiny a dochází k populační inverzi, při které jsou vyzářeny fotony o specifické energii (vlnové délce). Fotony následně kmitají v optickém rezonátoru, dokud neprojdou přes polopropustné zrcadlo a nevyzáří se

z laseru ve formě paprsku světla. Tento paprsek je monochromatický, koherentní, fokusovaný a s vysokou intenzitou. [12, 14, 15, 22]



Obrázek 16: Schéma vnitřních komponent laseru, Zdroj: [13]

### 2.3. Metody čištění povrchu

Cíl při výrobě jakéhokoli zboží je vyrábět co nejkvalitněji co nejefektivněji. Aby to bylo možné, je třeba se starat o stav nástrojů a používat kvalitní suroviny. Za tímto účelem je často nutné očistit povrch některých materiálů. Nejčastější procedurou je odstranění nečistot z povrchu před dalším zpracováním (například odstranění korozní vrstvy před svařováním nebo vyčištění povrchu před lepením). V průmyslu se běžně používá několika málo metod.

Mezi nejjednodušší metody čištění patří mechanické čištění za pomoci abraziv. Jedná se o metodu, při které je povrch ošetřovaného materiálu obrušován abrazivem, přičemž dochází k odstraňování vrchní vrstvy materiálu. Výhodou této metody je její jednoduchost. Nevýhodou je potřeba dodávat abrazivo, postupné ubývání čištěného materiálu a vznikající odpad, který navíc může např. ve formě prachových částic škodit zdraví.

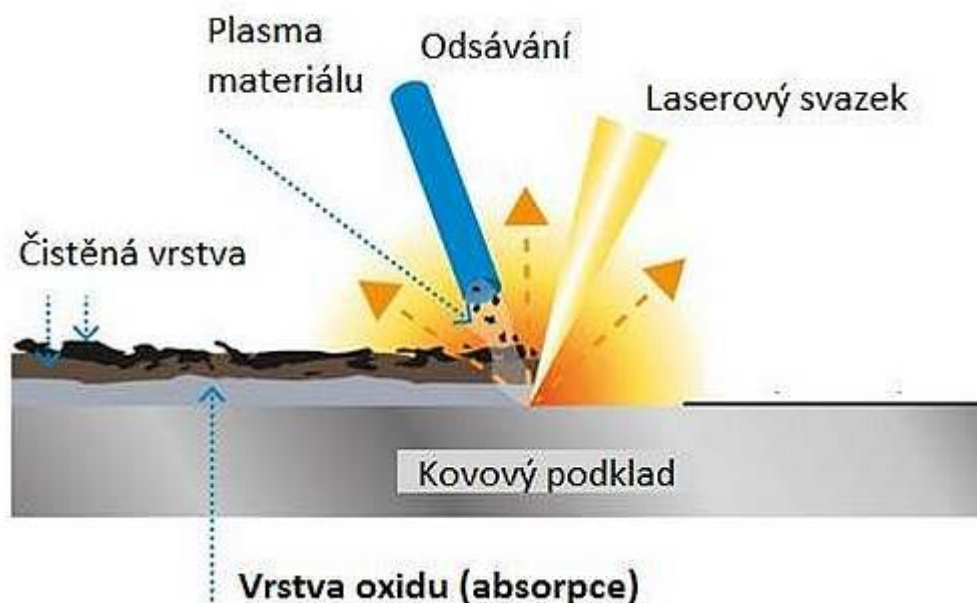
Druhou nejčastější metodou je chemické čištění. Při něm je povrch čištěného materiálu naleptáván. Výhodou této metody je možnost zbavit se nečistot, které by

mechanicky odstranit nešly. Nevýhodou je nutnost dodávat chemikálie, vznik chemického odpadu a chemické změny povrchu materiálu.

Další důležitou metodou je čištění pomocí ultrazvuku. Metoda je založena na interakci ultrazvukových vln s povrchem materiálu, při které dojde k uvolnění nečistot z povrchu. Výhodou je vysoká účinnost a levný provoz bez potřeby dodávání dalších surovin. Nevýhodou bývají omezené rozměry čistících van.

Zajímavou metodou je čištění pomocí suchého ledu. Jedná se v zásadě o mechanické čištění, při kterém je abrazivem suchý led. Výhodou této metody je, že suchý led se po očištění povrchu odpaří a nezůstává jako odpad. Nevýhody jsou nutnost doplňovat suchý led a cenová náročnost.

Poslední metodou je čištění pomocí laseru. Tato metoda se v posledních letech začala rychle rozšiřovat. Princip této metody spočívá ve fokusaci intenzivního laserového paprsku na plochu povrchu. Laser v daném místě způsobí náhlé zvýšení teploty, které u nečistot vyvolá změnu skupenství. (Obrázek 17) Díky přesně definované hloubce působení laser ovlivňuje materiál pouze při povrchu a vnitřní struktura materiálu zůstává nepoškozena. Důvodem, proč se tato metoda rychle stala oblíbenou, je její jednoduchost, šetrnost, všestrannost, snadná údržba a cena. [3, 14, 15, 17, 18, 19, 22]



Obrázek 17: Schéma působení laserového paprsku na povrch materiálu, Zdroj: [17]



### 3. Experimentální část

Experimentální část práce se zabývá postupy používanými v průběhu práce.

#### 3.1. Použité vybavení

Jako vzorky, na kterých byla prováděna laserová úprava povrchu, byly použity plechy z Tabulky 1

Zkratka	Popis	Norma	Tloušťka
EG + Ph	Elektrolyticky nanesený zinek s vrstvou fosfátu	EN 10152	0,7 mm
HDG	Žárově nanesený povlak zinku	EN 10346	0,7 mm
ZM	Žárově nanesený povlak zinek-hořčík	EN 10346	0,7 mm

Tabulka 1: Přehled použitých plechů

K nařezání plechů byla použita interní řezačka společnosti ŠKODA AUTO a.s. Ohnutí plechů bylo provedeno na interní ruční ohýbačce ve společnosti ŠA.

Laserová úprava povrchu byla provedena ve firmě Sigmaplast a.s. za pomoci čistícího laseru společnosti LASCAM systems s.r.o., konkrétně modelu CL 300 s maximálním výkonem paprsku 310 W. Jedná se o CO<sub>2</sub> laser 4. kategorie s infračerveným paprskem vlnové délky 1064 nm. Laserový paprsek má dle výrobce účinek na povrch až do hloubky 62 nm.

Ke slepení vzorku byla použita lepidla z Tabulky 2.

Název	Výrobce	Chemické složení
Betaguard RB 214 BV	Dow Automotive	Syntetický kaučuk
SikaPower 492 G	Sika	Epoxidová pryskyřice

Tabulka 2: Přehled použitých lepidel

Použité mazivo bylo ANTICORIT PL 3802-39 S společnosti Fuchs. Jedná se o běžně používané mazivo v procesu tváření ve společnosti ŠA

Tahová zkouška proběhla v laboratoři KST FS TUL na stroji TIRAtest 2300 řízeným pomocí PC. Výsledky byly zpracovány v programu LabNET.

K analýze změn struktury povrchu byl použit rastrovací elektronový mikroskop Ultra Plus společnosti Zeiss se softwarem SmartSEM. EDS analýza povrchu byla

prováděna na detektoru charakteristického RTG záření Oxford X-Max20. Výsledky EDS analýzy byly zpracovány v SW AZtec.

Struktura lepeného spoje byla zkoumána na digitálním optickém mikroskopu Leica DVM6, obrazová data byla zpracována v softwaru LasX. Makroskopické fotky byly pořízeny fotoaparátem telefonu s 20MPix senzorem Sony s poměrem 1 / 2,4 “ a čočkou Carl Zeiss s maximální clonou F/1.9.

Termogravimetrická analýza proběhla na přístroji TGA Q500 společnosti TA Instruments na Oddělení nanomateriálů v přírodních vědách CxI TUL.

### 3.2. Příprava experimentu

Byl zvolen optimální počet vzorků pro tahovou zkoušku zahrnující každou kombinaci typu plechu, povrchové úpravy a použitého lepidla. Počty byly vybrány jako kompromis mezi statistikou a časovou náročností.

Povrchové úpravy byly s ohledem na možnosti laseru zvoleny dle Tabulky 3.

<b>Laser min</b>	Otřený plech ozářený nejnižší intenzitou laseru
<b>Laser med</b>	Otřený plech ozářený střední intenzitou laseru
<b>Laser max</b>	Otřený plech ozářený nejvyšší intenzitou laseru
<b>Otřeno</b>	Povrch plechu očištěný hadrem, bez laserové úpravy
<b>Zamaštěno</b>	Plech bez laserové úpravy se stanoveným množstvím maziva

Tabulka 3: Přehled použitých povrchových úprav

Pro každé lepidlo byl zvolen následující počet vzorků k tahové zkoušce

	<b>EG + Ph</b>	<b>HDG</b>	<b>ZM</b>
<b>Laser min</b>	5	5	5
<b>Laser med</b>	5	5	5
<b>Laser max</b>	5	5	5
<b>Otřeno</b>	3	3	3
<b>Zamaštěno</b>	3	3	3

Tabulka 4: Přehled počtu vzorků pro dané kombinace plechu a povrchové úpravy

Bylo rozhodnuto vytvořit od každého typu plechu 100 ks určených k tahové zkoušce a 12 ks určených ke korozní zkoušce. Rozměry vzorků pro tahovou zkoušku byly stanoveny na 150 × 25 mm a pro korozní zkoušku na 200 × 100 mm.

### **3.3. Příprava vzorků**

Příprava vzorků probíhala kompletně ve výrobním závodě společnosti ŠKODA AUTO a.s. v Mladé Boleslavi. Jednotlivé pláty plechu byly nařezány na obdélníky o délce 150 mm a šířce 25 mm. Obdélníků s těmito rozměry bylo vyrobeno více než 100 ks od každého typu plechu. Dále byly vytvořeny obdélníky o délce 200 mm a šířce 100 mm. Těchto obdélníků bylo vyrobeno přesně 12 kusů od každého typu plechu.

Plech o rozměru 150 × 25 mm byly v nejdelším rozměru označeny v jedné třetině, tedy 50 mm od kraje. V následujícím kroku byly ohnuty podél osy kolmé k tomuto rozměru do pravého úhlu. Výsledný plech měl tvar písmena L a byl ohybem rozdělen na dva úseky s rozměry 50 × 25 mm a 100 × 25 mm.

Plech s rozměry 200 × 100 mm byly ve vrchní části provrtány, aby mohly být pověšeny. (Obrázek 18) Plechy byly zabaleny a převezeny do Liberce k dalšímu zpracování.



Obrázek 18: HDG plech připravený k laserování, Zdroj: Autor

### 3.4. Úprava povrchu

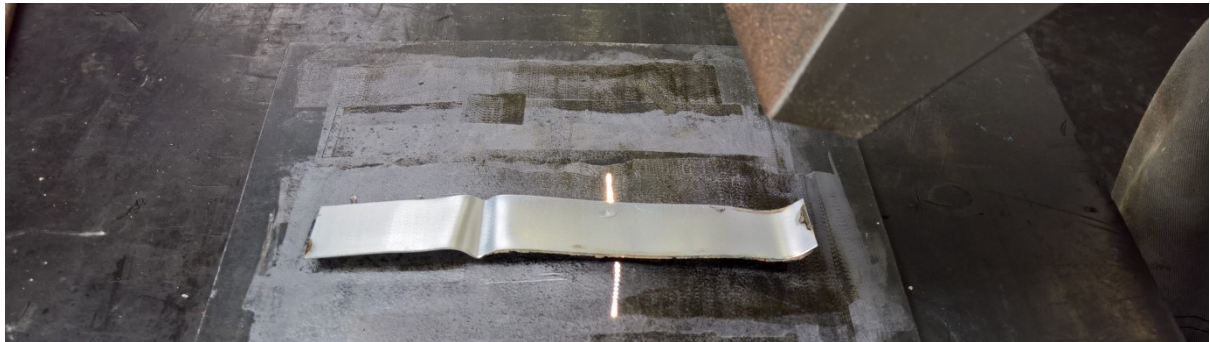
Dalším krokem bylo čištění povrchu plechů pomocí laseru. Laserování proběhlo ve firmě Sigmaplast a.s. na laseru firmy LASCAM systems s.r.o. Použit byl model laseru CL 300 s maximálním výkonem 310 W. (Obrázek 19)



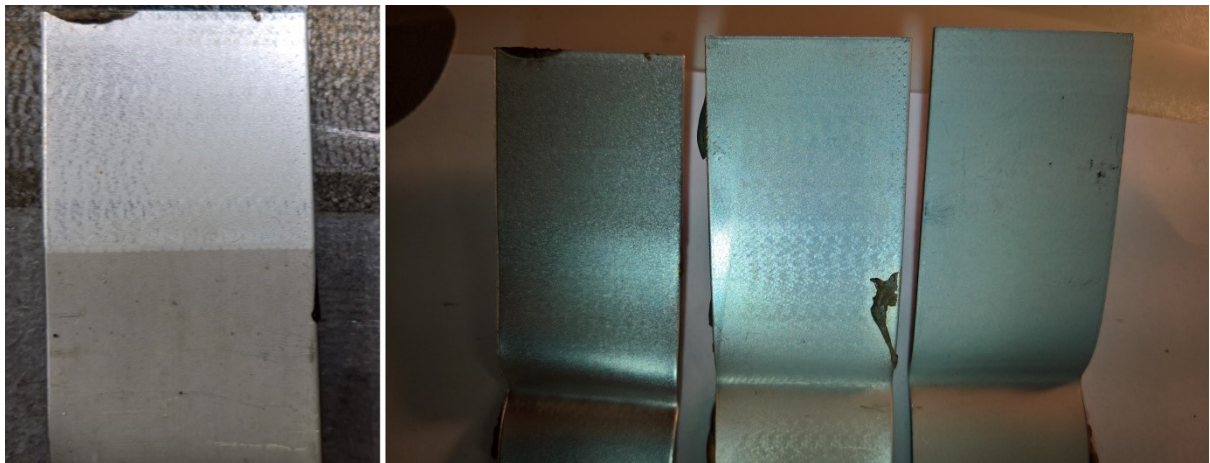
Obrázek 19: Čistící laser CL 300 od společnosti LASCAM systems s.r.o. Vlevo laser samotný, vpravo procesní hlava laseru, ochranné brýle a stlačený vzduch, Zdroj: Autor

Nejprve byly laserovány plechy určené k tahové zkoušce. (Obrázek 20) Intenzita laserového paprsku byla nastavena manuálně pomocí regulátoru. Nejnižší intenzita byla zvolena pro nastavení Min, nejvyšší intenzita pro nastavení Max a střední intenzita pro půlku rozsahu regulátoru. Od každého typu plechu bylo ošetřeno 24 ks každou ze tří

stanovených intenzit laseru. (Obrázek 21) Při procesu čištění byla plocha určená k lepení (100 × 25 mm) 2× ozářena laserovým paprskem.



Obrázek 20: Proces laserování, Zdroj: Autor



Obrázek 21: Vlevo porovnání očištěného a neočištěného povrchu, vpravo porovnání intenzit laseru na povrch plechu EG + Ph (směrem doprava intenzita klesá), Zdroj: Autor

Zároveň s plechy určenými k tahové zkoušce byly ošetřeny i plechy určené ke korozní zkoušce. (Obrázek 22) Byl použit stejný laser, stejné intenzity laseru i stejné postupy laserování. Z důvodu časové náročnosti byly očištěny pouze jednostranně. Od každého typu plechu bylo provedeno jedno čištění po každou intenzitu laseru.



**Obrázek 22: Očištěný plech určený ke korozní zkoušce, ve třetině plechu lze vidět hranici očištěného povrchu, Zdroj: Autor**

Na několik pokusných plechů bylo ručně naneseo velké množství maziva ANTICORIT PL 3802-39 S a vzorky byly vystaveny laserovému paprsku. (Obrázek 23) Test byl proveden u 9 vzorků, 3 od každého typu plechu.



**Obrázek 23: Zamaštěné plechy po očištění, lesk povrchu plechu značí zbytky maziva, Zdroj: Autor**

Po provedení laserové úpravy povrchu byla mezi každé dva kusy vložena savá ochrana zabraňující přenosu zbytkového oleje a dalších nečistot na laserem vyčištěný povrch. Po zabalení byly plechy okamžitě převezeny do závodu ŠKODA AUTO a.s. v Mladé Boleslavi.

### **3.5. Korozní zkouška**

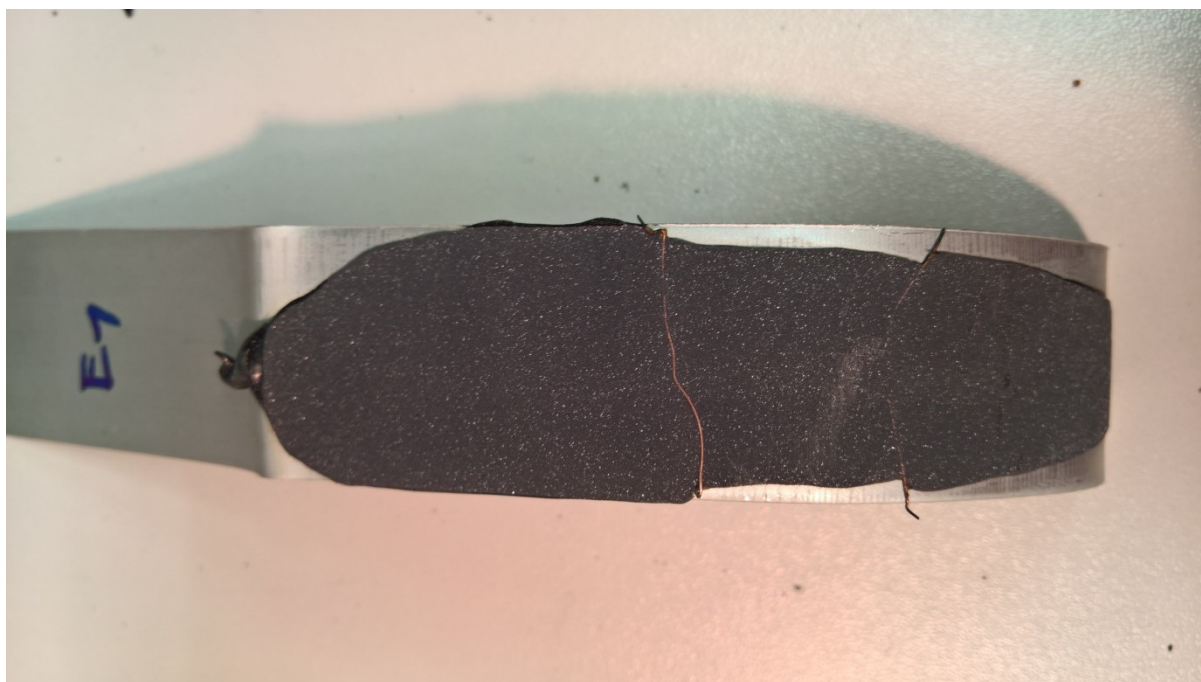
Plechý určené ke korozní zkoušce byly nasazeny na ocelové háky a pověšeny u vstupních vrat do výrobní haly ŠA. Rychlé střídání teplot a vlhkosti simulovalo podmínky, kterým mohou plechy během skladování čelit. Plechy byly v tomto prostředí ponechány následující měsíc. Po dvou týdnech proběhla kontrola vzorků, zda nejeví známky koroze. Po dalších dvou týdnech, tedy měsíc od počátku zkoušky, byly plechy převezeny do laboratoře KMT FS TUL k analýze. Jelikož vzorky nejevily známky koroze, byly ponechány v prostředí laboratoře další měsíc a poté opět analyzovány.

### **3.6. Lepení vzorků**

Bezprostředně po převozu byly vzorky v mladoboleslavském závodu ŠA připraveny k lepení. Lepeny byly vždy dva vzorky se stejným typem plechu a laserové úpravy. Od každé kombinace bylo slepeno 12 ks kaučukovým lepidlem a 12 ks epoxidovým lepidlem. Ze zbylých neupravených plechů bylo s každým lepidlem slepeno 6 vzorků. Následně bylo na 12 ks od každého typu plechu nanášeno definované množství maziva, jednalo se o vrstvu s plošnou hmotností 4–5 g·m<sup>-2</sup>. Tyto vzorky byly slepeny po 6 kusech pro každé lepidlo.

Lepidla byla na vzorky nanášena z tuby ručně pomocí pistole. Výsledné množství lepidla vkládaného mezi plechy bylo ovlivněno lidským faktorem. Lepidlo bylo nanášeno podél osy kratší strany a následně pomocí tlaku rozprostřeno po povrchu. Za účelem udržení rovnoměrné tloušťky vrstvy lepidla bylo použito dvou měděných drátků o průměru 200 μm vložených mezi lepené plechy. Drátky byly vkládány kolmo na delší rozměr plechu. (Obrázek 24)

Za účelem vytvrzení lepidla byly vzorky vloženy na 20 minut do pece s teplotou 200 °C. Po vyndání z pece byly vzorky ponechány ke zchladnutí na vzduchu s pokojovou teplotou.



Obrázek 24: Umístění měděných drátků v lepidle, Zdroj: Autor

Slepené vzorky byly vypékány 20 minut v peci s teplotou 180–200 °C. Po vyndání z pece vzorky chladly na vzduchu s pokojovou teplotou. (Obrázek 25) Po vychladnutí byly zabaleny a převezeny do laboratoře KST FS TUL k tahové zkoušce.

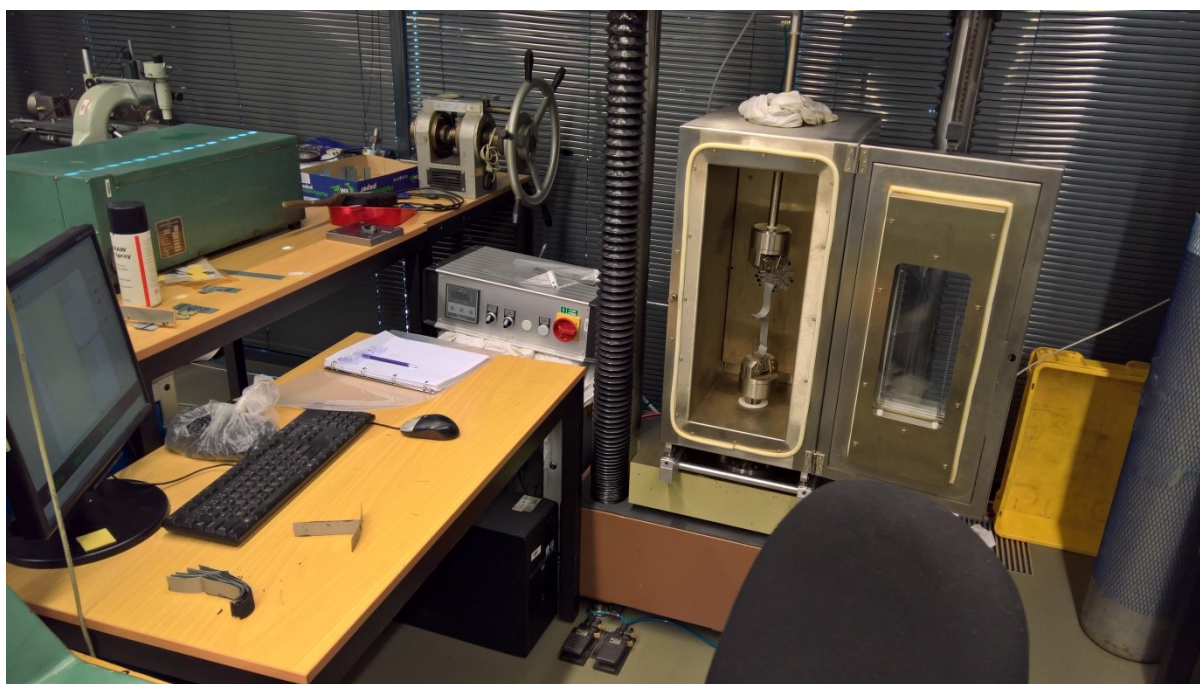


Obrázek 25: sety slepených vzorků po vychladnutí, Zdroj: Autor



### 3.7. Tahová zkouška

Před samotnou tahovou zkouškou bylo třeba odstranit přebytky lepidla z okrajů plechů. Tyto přebytky by způsobovaly zkreslení hodnot a znehodnotily by číselné hodnoty získané z tahové zkoušky. Lepidlo bylo za pomoci nože odříznuto tak, aby lepidlo bylo pouze mezi plechy, kde má být, a nepřesahovalo mimo ně. Plechy byly seřazeny dle jejich kombinace parametrů a z daných šestic byl jeden vzorek odebrán a zbylých pět slepených vzorků bylo roztrženo na trhačce dle upravené normy ISO 11339:2010. Trhání bylo prováděno při laboratorní teplotě, rychlost trhání byla nastavena na  $100 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ . (Obrázek 26) Následně byly plechy podrobeny tahové zkoušce a hodnoty zaneseny do školní databáze. Poté byly hodnoty pětic se stejnou kombinací parametrů pomocí programu LabNET sjednoceny a vypočítány hodnoty meze pevnosti a chyby měření. Z programu LabNET byly vyexportovány jednotlivé protokoly s hodnotami a grafy.



Obrázek 26: Zařízení TIRAtest 2300 s obslužným PC. Na zařízení právě probíhá tahová zkouška jednoho ze vzorků, Zdroj: Autor

### 3.8. Vyhodnocení laserové úpravy

Pro hodnocení vlivu laseru na povrch plechu bylo zvoleno celkem 8 vzorků dle Tabulky 5.

	<b>EG + Ph</b>	<b>HDG</b>	<b>ZM</b>
<b>Laser min</b>	ANO	NE	NE
<b>Laser med</b>	ANO	NE	NE
<b>Laser max</b>	ANO	ANO	ANO
<b>Otřeno</b>	ANO	ANO	ANO
<b>Zamaštěno</b>	NE	NE	NE

Tabulka 5: vzorky, které byly zkoumány pomocí SEM a EDS

U vzorků byla zkoumána struktura povrchu pomocí SEM Zeiss Ultra Plus. (Obrázek 27) Následně byla pomocí EDS Oxford X-Max provedena lokální chemická analýza povrchu.

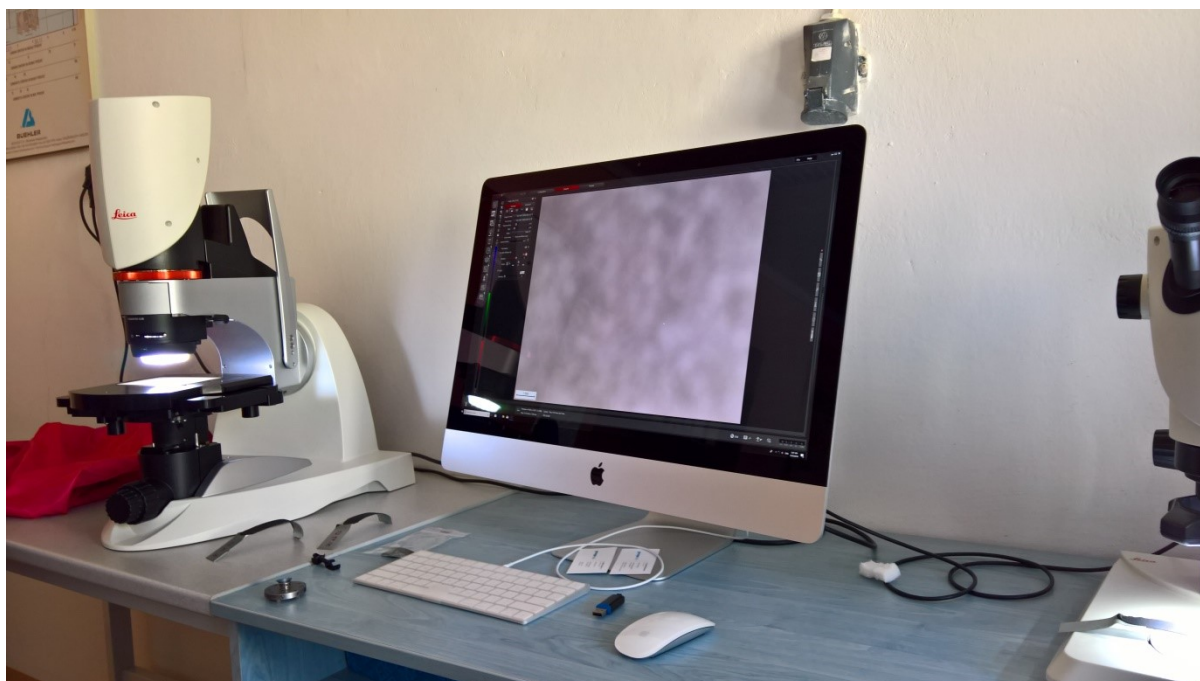


Obrázek 27: SEM Zeiss Ultra Plus s EDS modulem Oxford X-Max, Zdroj: Autor

### 3.9. Vyhodnocení tahové zkoušky

Vzorky byly podrobeny tahové zkoušce na stroji TIRAtest 2300 na KST FS TUL dle normy ISO 11339:2010. Jednalo se o zkoušku meze pevnosti v odlupu. Výsledky byly zpracovány v programu LabNET. Data pro každou kombinaci typu plechu, lepidla a povrchové úpravy byly zpracovány do 1 protokolu obsahujícího Jednotlivé meze pevnosti pro každou jednotlivou tahovou zkoušku, průměrnou hodnotu meze pevnosti a směrodatnou odchylku měření.

Po skončení tahové zkoušky byla struktura lepidla jednotlivých plechů zkoumána makroskopicky pomocí oka a mikroskopicky pomocí digitálního optického mikroskopu Leica DVM6 na KMT FS TUL se zpracováním optických dat v softwaru LasX. (Obrázek 28)



Obrázek 28: Optický mikroskop Leica DVM6 s oblužným PC, Zdroj: Autor

### 3.10. Vyhodnocení termogravimetrické zkoušky

Ke zjištění vlivu zvyšování teploty na mazivo ANTICORIT PL 3802-39 S byl použit termogravimetrický analyzátor TGA Q500 společnosti TA Instruments. Měření probíhalo v EGA pícce s použitím platinové pánvičky o objemu 100  $\mu\text{l}$ , v atmosféře syntetického vzduchu s průtokem 60  $\text{ml}\cdot\text{min}^{-1}$ . Teplotní rozsah byl nastaven od laboratorní teploty do 700  $^{\circ}\text{C}$  s rychlostí ohřevu 10  $^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ .

### **3.11. Vyhodnocení korozní zkoušky**

Povrch plechů byl dva týdny od provedení laserové úpravy vyfocen pomocí fotoaparátu mobilního telefonu Microsoft Lumia 950. Druhé focení povrchu proběhlo dva týdny po prvním. Při analýze vzorků bylo rozhodnuto o prodloužení trvání zkoušky o další měsíc. Třetí focení plechů proběhlo měsíc po druhém, tudíž dva měsíce po provedení laserové úpravy povrchu.

## **4. Výsledky experimentu**

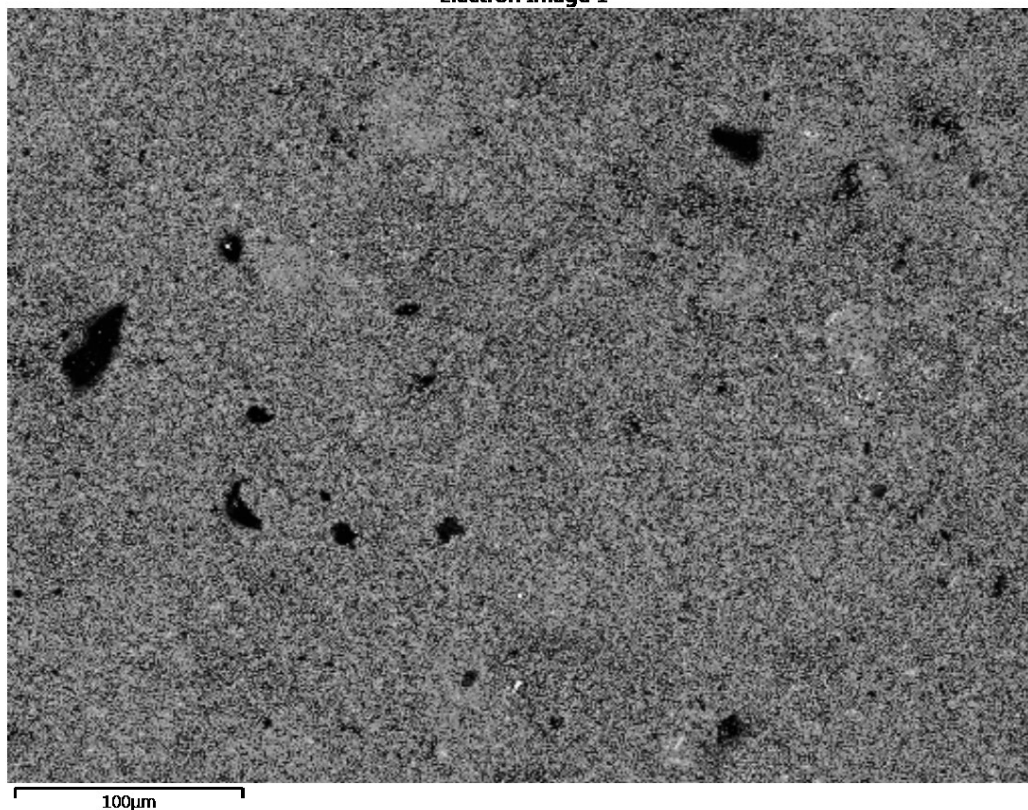
### **4.1. Struktura povrchu po interakci s laserem**

#### **4.1.1. Analýza pomocí SEM**

SEM je přístroj umožňující zobrazování předmětů v mikroskopickém měřítku, při kterém lze dosahovat zvětšení až 1 000 000×, lze tedy zobrazit předměty už od velikosti 1 nm. Princip metody spočívá v ozáření vzorků elektrony urychlenými vysokým napětím, které interagují s povrchem materiálu a ten emituje mimo jiné sekundární a zpětně odražené elektrony. Detekce zpětně odražených elektronů umožňuje pozorování chemického kontrastu, detekce sekundárních elektronů umožňuje pozorování topografického kontrastu. Z chemického kontrastu nelze vyčíst chemické složení materiálu, pouze je umožněno zobrazit změnu průměrné atomové hmotnosti v zobrazované oblasti. Topografický kontrast umožňuje zobrazit strukturu povrchu.

Aby byly chemické změny na povrchu dobře viditelné byly snímky pořízeny v chemickém kontrastu. Během výměny vzorků nedocházelo ke změnám nastavení mikroskopu, proto je možné snímky různých vzorků porovnávat mezi sebou.

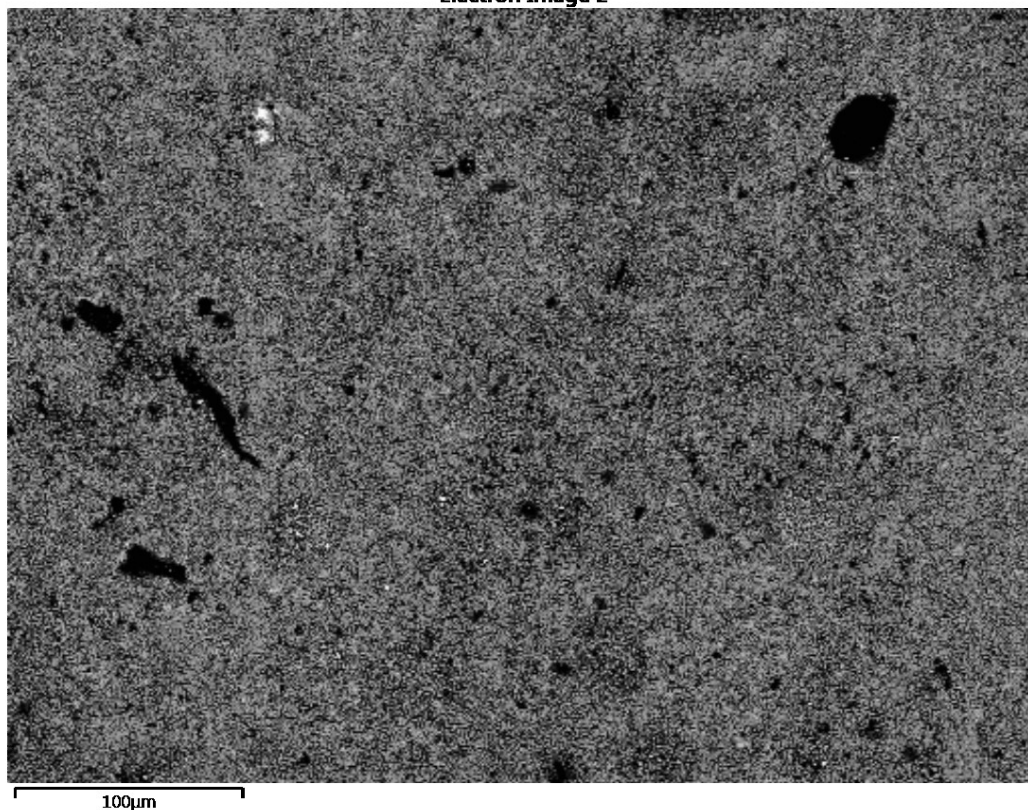
Electron Image 1



Obrázek 29: Snímek ze SEM. Jedná se o otřený plech EG + Ph, zvětšeno 250×, Zdroj: Autor

Na Obrázku 29 je zobrazen plech EG + Ph s otřeným povrchem. Povrch plechu nebyl upraven, fosfátová vrstva (šedě), sloužící při tváření plechů jako ochrana, je neporušena v celé zobrazované oblasti. Na obrázku jsou černě vyznačeny oblasti s výskytem nečistot. S ohledem na přípravu plechu se pravděpodobně jedná o zbylé mazivo. Jelikož se jedná o vzorek, který ošetřen, bude vliv laseru na ostatní EG + Ph plechy porovnán s tímto vzorkem.

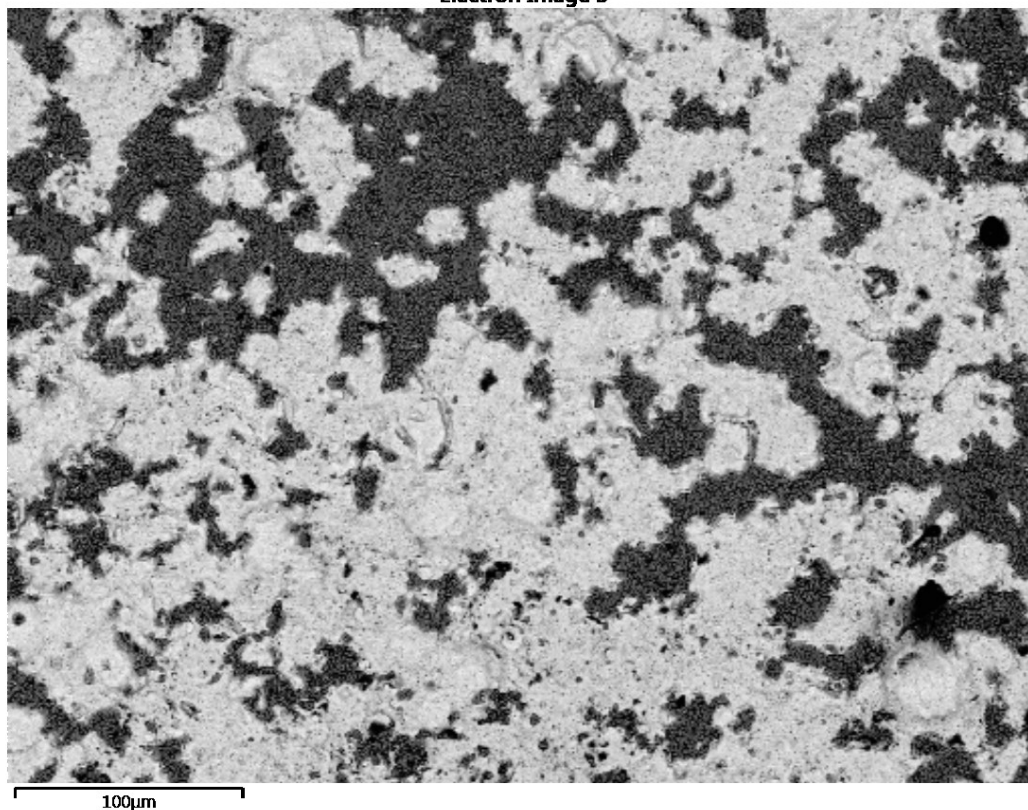
Electron Image 2



Obrázek 30: Snímek ze SEM. Na obrázku je plech EG + Ph očištěný nejnižší intenzitou laseru, zvětšeno 250×,  
Zdroj: Autor

Na Obrázku 30 je zobrazen plech EG + Ph s povrchem ošetřeným nejnižší intenzitou laseru. Černé oblasti značí nečistoty jsou stále přítomné s podobnou četností jako u neošetřeného povrchu.. Fosfátová vrstva zůstala beze změny.

Electron Image 3

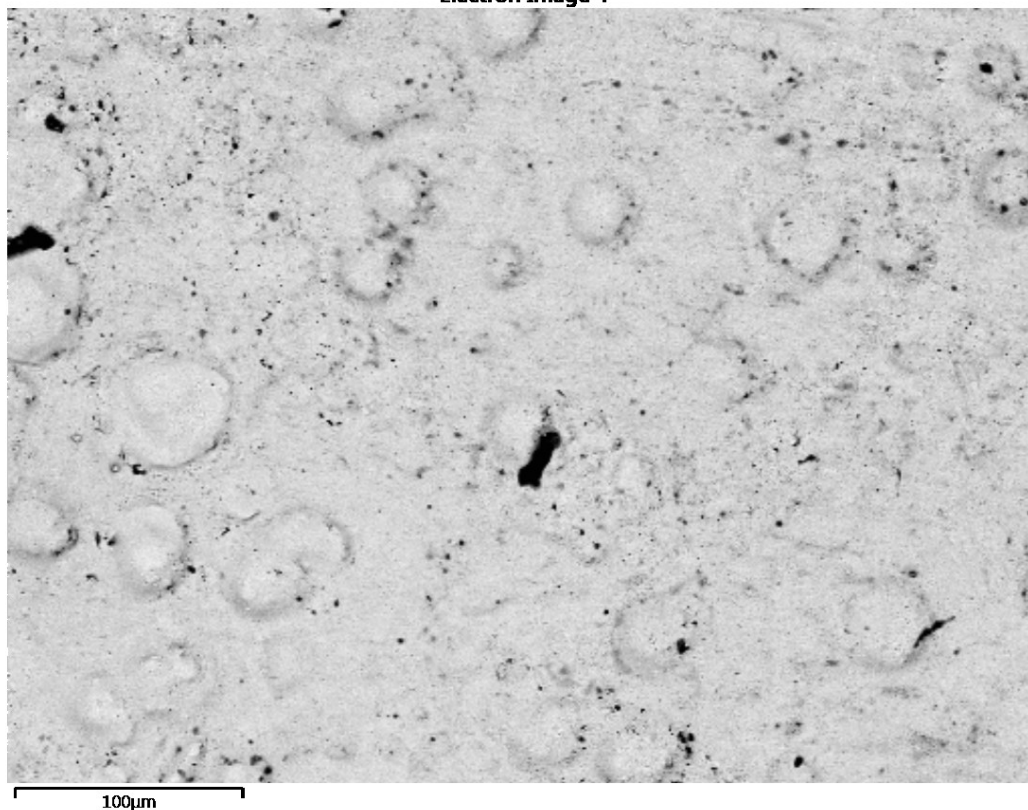


Obrázek 31: Snímek ze SEM. Na obrázku je plech EG + Ph očištěný střední intenzitou laseru, zvětšeno 250×, Zdroj: Autor

Na Obrázku 31 je zobrazen plech EG + Ph ošetřený střední intenzitou paprsku. Na rozdíl od nejnižší intenzity, kdy vliv laseru byl těžko pozorovatelný, je zde patrné odpaření značné části fosfátové vrstvy. Tmavě šedá barva značí místa, kde zůstala vrstva fosfátu. Světle šedá barva značí místa, na kterých došlo ke kompletnímu odpaření fosfátové vrstvy až na vrstvu zinku. Výskyt organických nečistot se výrazně snížil, nejednalo se však o nulové hodnoty. Svědčí o tom výskyt černých skvrn v pravém dolním a pravém horním rohu. Jelikož je vrstva fosfátu v dalších fázích zpracování plechu nepotřebná, její částečné odstranění nevadí, je však nutné počítat s možnými změnami adheze lepidla. Čištění EG + Ph plechů pomocí střední intenzity paprsku lze označit za efektivní, má však vliv na povrchovou vrstvu.

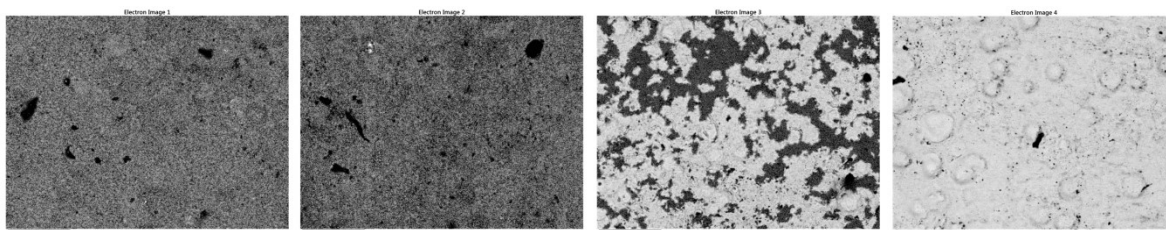


Electron Image 4



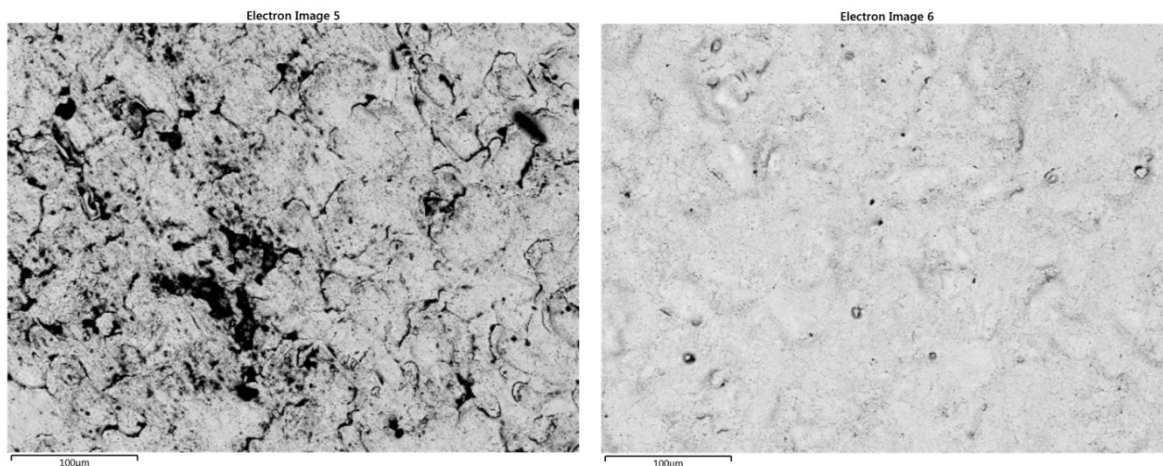
Obrázek 32: Snímek ze SEM. Na obrázku je plech EG + Ph očištěný nejvyšší intenzitou laseru, zvětšeno 250×, Zdroj: Autor

Na Obrázku 32 je zobrazen plech EG + Ph ošetřený nejvyšší intenzitou paprsku. Paprsek byl při čištění natolik silný, že odstranil celou vrstvu fosfátu a dostal se až na vrstvu zinku, přesto povrch stále obsahuje drobné zbytky nečistot (černě). Výskyt nečistot je obdobný jako u čištění střední intenzitou paprsku. Vysoká intenzita laseru prokazatelně ovlivňuje strukturu povrchu.



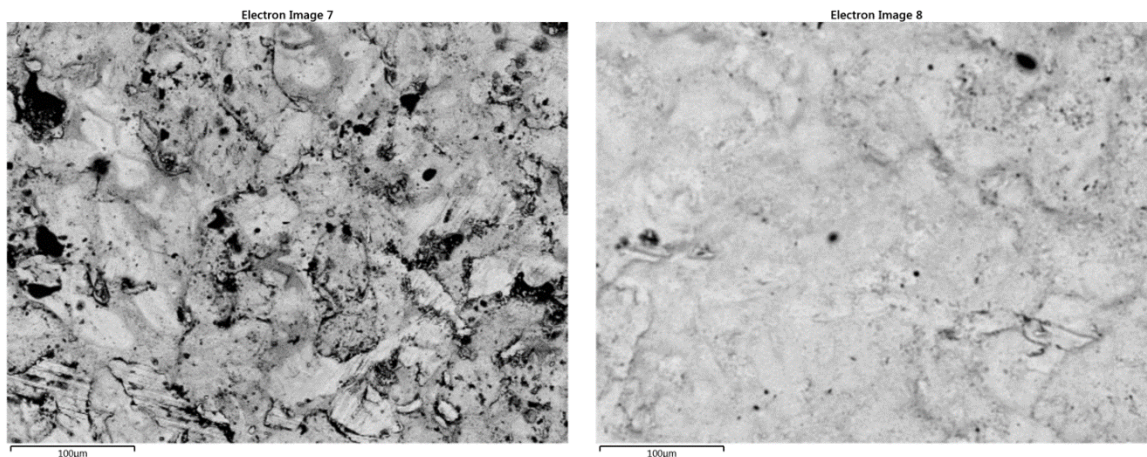
Obrázek 33: Porovnání všech čtyř úprav povrchu EG + Ph plechů; Zdroj: Autor

Při porovnání všech 4 vzorků plechu EG + Ph (Obrázek 33) lze vidět závislost vzrůstajícího poškození fosfátové vrstvy (indikované šedou barvou) a poklesu výskytu organických nečistot (indikovaných černou barvou) se zvyšující intenzitou laseru. Konkrétní úbytky organických nečistot zjištěné EDS analýzou jsou popsány dále v textu.



**Obrázek 34: Porovnání SEM snímků HDG plechů. Vlevo otřený, vpravo očištěný nejvyšší intenzitou laseru, zvětšeno 250×, Zdroj: Autor**

Na Obrázku 34 lze vidět porovnání povrchů plechu HDG. Vlevo je plech bez povrchové úpravy, vpravo byl povrch ošetřen nejvyšší intenzitou laseru. Při srovnání povrchu plechu bez a s laserovou úpravou lze spatřit výrazný úbytek výskytu nečistot (černě). Laser z povrchu odstranil téměř všechny nečistoty, které se na něm před čištěním vyskytovaly. Struktura povrchu byla vlivem laseru vyhlazena. Lze tvrdit, že laserová úprava povrch plechu výborně čistí a zároveň materiál výrazně nepoškozuje.

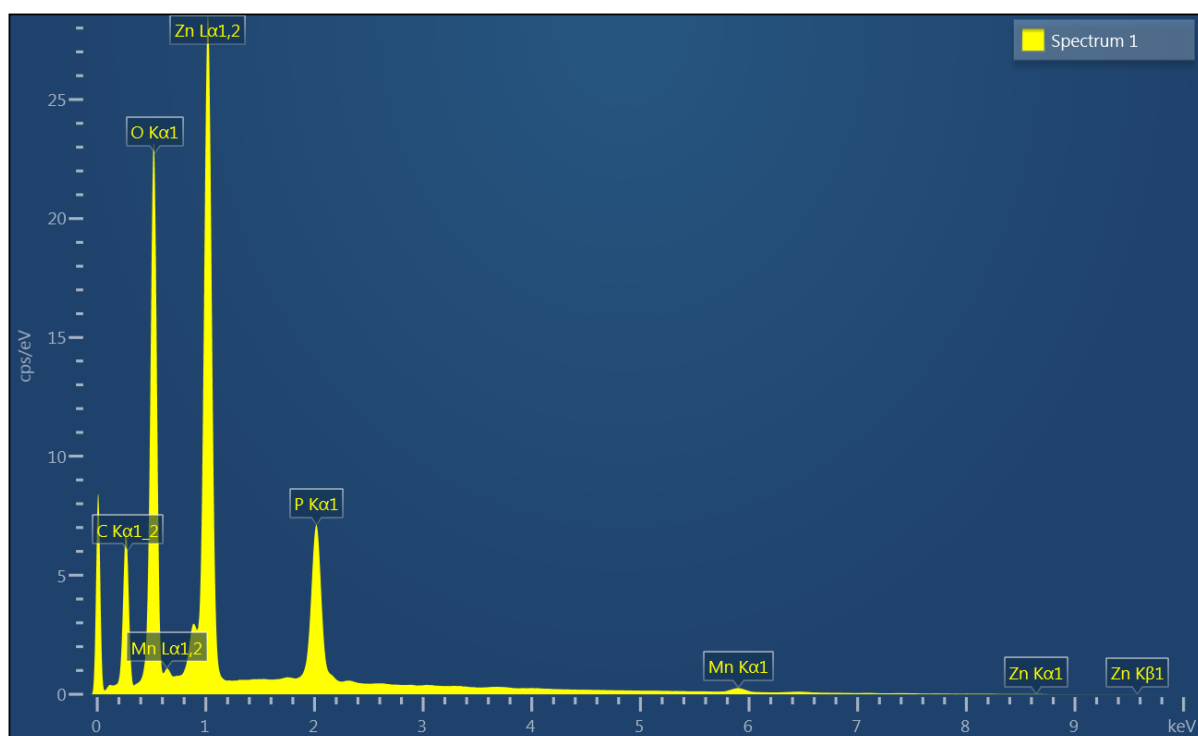


**Obrázek 35: Porovnání SEM snímků ZM plechů. Vlevo otřený, vpravo očištěný nejvyšší intenzitou laseru, zvětšeno 250×, Zdroj: Autor**

Na obrázku 35 lze porovnat změnu povrchu plechu ZM při očištění laserem s nejvyšší intenzitou paprsku. Vlevo je povrch bez úpravy, vpravo po laserové úpravě. Neupravený povrch vykazuje vysokou úroveň znečištění organickými zbytky (černě), pravděpodobně se jedná o zbylé mazivo. Ošetřením povrchu laserem byla většina organický zbytků odstraněna. Struktura povrchu byla vlivem laseru vyhlazena. Lze říci, že nejvyšší intenzita laseru odstranila z povrchu většinu nečistot, aniž by při tom povrch poškodila.

### 4.1.2. EDS analýza

EDS je metoda využívající emise specifického RTG záření při přechodu elektronů v atomu. Princip spočívá v ozáření atomů povrchu elektrony urychlenými vysokým napětím, které excitují elektron z vnitřní slupky atomu. Vzniklé místo na nízké energetické hladině je brzy zaplněno elektronem z vyšší energetické hladiny a při tom dojde k emisi typického RTG záření. Analýzou RTG záření je možné určit konkrétní prvky vyskytující se do určité hloubky povrchové vrstvy. (Obrázek 36) Výška peaku odpovídá množství prvku. Pomocí EDS je možné určit lokální chemické složení povrchové vrstvy. Výhodou EDS je rychlé určení chemického složení povrchu.



Obrázek 36: Ukázka výsledků EDS analýzy povrchu, Zdroj: Autor

EDS umožňuje zobrazit zastoupení jednotlivých prvků v atomárních nebo v hmotnostních procentech. V této práci byly použity procenta hmotnostní.

Výsledky EDS analýz jednotlivých plechů byly pro větší přehlednost zaneseny do Tabulky 6:

Značka prvku	Zastoupení prvku ve zkoumané oblasti [hm. %]							
	E0	E1	E2	E3	H0	H3	Z0	Z3
C	19,3	20,4	7,7	9,4	28,5	4,0	14,5	4,6
O	27,8	27,9	6,9	1,9	3,9	0,8	4,9	1,5
Zn	37,8	35,9	80,6	87,5	65	94,4	70,5	90,6
P	10,8	10,5	2,8	0,3	0	0	0	0
Al	0	0	0	0	1,7	0,8	3,5	1,4
Mg	0	0	0	0	0,1	0	3,8	1,9
Fe	0	0	0,8	0,9	0	0	0	0
Cl	0	0,3	0	0	0,2	0	0	0
K	0	0,3	0	0	0	0	0	0
S	0	0,3	0	0	0,4	0	0,7	0
Si	0	0	0	0	0,2	0	0	0
Cu	0	0	0	0	0	0	2,1	0

Tabulka 6: Přehled výsledků EDS analýz všech vzorků

Povrch plechu EG + Ph otřený hadrem vykazuje téměř 20 hm. % uhlíku na povrchu. Zastoupení zinku činilo pod 40 hm. %. Fosfor byl na povrchu zastoupen více než 10 hm. %. Obsah kyslíku činil přes 25 hm. %.

Po provedení laserové úpravy povrchu EG + Ph plechů nejnižší intenzitou paprsku lze pozorovat téměř totožné hodnoty jako u nemodifikovaného povrchu. Rozdíly hodnot byly < 2 hm. %. Vzorek obsahoval navíc stopové množství Cl, K, a S.

Úprava povrchu EG + Ph plechu střední intenzitou laseru již vykazuje výrazné změny v zastoupení prvků. Patrný je pokles uhlíku z 19,3 hm. % na 7,7 hm. %. Zároveň je vidět pokles zastoupení P, O a Mn na přibližně čtvrtinu původních hodnot. Zastoupení zinku zinek vzrostlo z necelých 40 hm. % na více než 80 hm. %. Na povrchu bylo také nalezeno Fe v množství téměř 1 hm. %.

Při použití nejvyšší intenzity laseru na EG + Ph plech vidíme podobné zastoupení C jako u střední intenzity. Zastoupení kyslíku kleslo z více jak 25 hm. % na necelá 2 hm. %. Obsah fosforu klesl z více jak 10 hm. % pouhých 0,3 hm. %. Podobně jako u střední intenzity bylo objeveno Fe v množství pod 1 hm. %.

Laserem nečištěný HDG plech vykazuje přibližně 30 hm. % C a 65 hm. % Zn. Obsah kyslíku byl kolem 4 hm. %. Hliníku bylo naměřeno 1,7 hm. %. Prvky Mg, Dl, S, Si byly zastoupeny v množství pod 0,5 hm. %.

Plech HDG očištěný nejvyšší intenzitou laseru vykazuje pokles C na pouhá 4 hm. %. Jedná o pokles na sedminu původní hodnoty. Obsah Al se snížil na poloviční hodnotu, tj. 0,8 hm. %. Podíl Zn se zvedl na 95 hm. %.

Vzorek laserem neочиštěného ZM plechu obsahoval necelých 15 hm. % uhlíku a 5 hm. % kyslíku. Na povrchu bylo naměřeno 70 hm. % Zn. Prvky Al a Mg jsou zastoupeny necelými 4 hm. %. Síra dosahovala 1 hm. % a Cu téměř 2 hm. %.

ZM plech po laserování nejvyšší intenzitou paprsku obsahoval pouze necelých 5 hm. % uhlíku a 1,5 hm. % kyslíku. Obsah uhlíku po laserování klesl na třetinu původní hodnoty. Obsah Mg a Al klesl na přibližně poloviční hodnoty. Obsah Zn po laserování byl přes 90 hm. %.

## 4.2. Vliv laserování na pevnost lepených spojů

Princip zkoušky meze pevnosti v odlupu spočívá v roztahování čelistí, ve kterých jsou vzorky uchyceny. V průběhu zkoušky se čelisti rozevírají rovnoměrnou rychlostí a je měřena síla potřebná k porušení lepidla a ohnutí plechu se stanovenou šířkou. Data jsou zpracována výpočetním softwarem LabNET. Při výpočtu meze pevnosti byla použita pouze data z rozsahu 20-80 % délky plechu, krajních 20 % nebylo započítáno.

Naměřené hodnoty pevností byly zaneseny do Tabulek 7 a 8 pro snadné porovnání.

BetaGuard RB 214			
	EG+Ph	HDG	ZM
Laser 1	3,33 ± 0,12 MPa	4,57 ± 0,26 MPa	3,78 ± 0,21 MPa
Laser 2	3,53 ± 0,22 MPa	4,60 ± 0,24 MPa	3,70 ± 0,10 MPa
Laser 3	3,88 ± 0,17 MPa	4,78 ± 0,28 MPa	3,74 ± 0,12 MPa
Otřeno	3,40 ± 0,16 MPa	4,52 ± 0,70 MPa	3,85 ± 0,54 MPa
Zamaštěno	3,41 ± 0,39 MPa	4,52 ± 0,22 MPa	4,02 ± 0,2 MPa

Tabulka 7: Přehled výsledků tahové zkoušky pro kaučukové lepidlo

V tabulce 7 jsou uvedeny hodnoty meze pevnosti pro použité lepidlo na bázi syntetického kaučuku. Jelikož jsou hodnoty ovlivněny ohybovou pevností plechu, nelze porovnávat hodnoty mezi různými typy plechu, ale je nutné porovnávat pouze vliv úpravy povrchu v rámci daného typu plechu.

Plechý Eg + Ph bez povrchové úpravy jevíly stejnou hodnotu meze pevnosti 3,4 MPa nehdě na množství maziva. Povrch upravený nejnižší intenzitou vykazoal mírný pokles meze pevnosti o 0,07 MPa. Důvod poklesu je diskutován v další kapitole. Plechy očištěné střední intenzitou laseru vykazojí mírný nárůst meze pevnosti o 0,12 MPa. Vzorky čištěné nevyšší intenzitou laseru vykazojí nevyšší hodnoty meze pevnosti, nárůst činil téměř 0,5 MPa.

U plechů HDG se hodnoty otřených a zamaštěných plechů shodoaly. Při použití nejnižší intenzity laseru se mez pevnosti o 0,5 MPa. Střední intenzita laseru vykazoje pouze drobné zvýšení o 0,1 MPa. Nevyšší intenzita čistícího paprsku způsobila nárůst meze pevnosti o 0,25 MPa.

Plechý ZM s přesně daným množstvím maziva vykazoaly hodnoty okolo 4 MPa. Otřené plechy měly mez pevnosti nižší o 0,15 MPa. Úprava povrchu pomocí laseru s nejnižší intenzitou vůči dodatečněmu zamaštěnému 0,2 MPa. Střední intenzita laserování vykazoala nejnižší hodnoty pevnosti s poklesem 0,3 MPa. Laser s nevyšší intenzitou měl mez pevnosti mezi nejnižší a střední intenzitou s poklesem vůči zamaštěnému plechu 0,25 MPa.

<b>Sikapower 492G</b>			
	<b>EG+Ph</b>	<b>HDG</b>	<b>ZM</b>
<b>Laser 1</b>	7,78 ± 0,68 MPa	9,71 ± 0,26 MPa	8,52 ± 0,24 MPa
<b>Laser 2</b>	7,95 ± 0,40 MPa	9,52 ± 0,62 MPa	8,62 ± 0,20 MPa
<b>Laser 3</b>	6,96 ± 0,32 MPa	9,73 ± 0,45 MPa	8,88 ± 0,15 MPa
<b>Otřeno</b>	7,03 ± 0,55 MPa	9,42 ± 0,60 MPa	9,24 ± 0,17 MPa
<b>Zamaštěno</b>	6,98 ± 0,61 MPa	9,80 ± 0,82 MPa	8,47 ± 0,35 MPa

Tabulka 8: Přehled výsledků tahové zkoušky pro epoxidové lepidlo

V tabulce 8 jsou uvedeny hodnoty meze pevnosti pro lepidlo na bázi epoxidové pryskyřice. Stejně jako u tabulky 7 jsou hodnoty ovlivněny tvrdostí plechu, proto je nutné porovnávat pouze vliv úpravy povrchu v rámci daného typu plechu.

Plech EG + Ph vykazovaly hodnoty meze pevnosti kolem 7 MPa. Při očištění povrchu laserem s nejnižší intenzitou došlo k nárůstu 0,75 MPa. Střední intenzita laseru způsobila nárůst meze pevnosti o 0,9 MPa. Vzorky ošetřené nejvyšší intenzitou laseru vykazovaly hodnoty shodné s neupraveným povrchem. Důvod je diskutován v další kapitole.

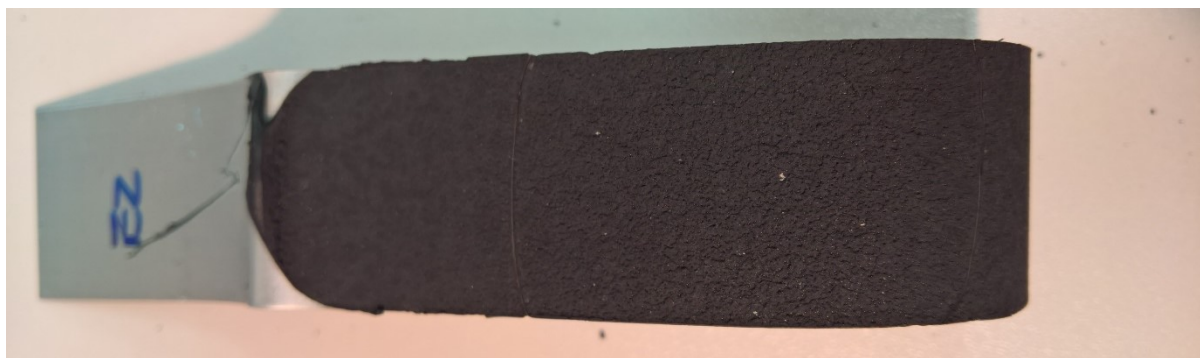
Mez pevnosti plechů HDG se stanovenou vrstvou maziva činila 9,8 MPa. Vzorky s otřeným povrchem vykazovaly snížení meze pevnosti o 0,4 MPa. Úprava nejnižší intenzitou laseru vykazovala mez pevnosti o 0,1 MPa. Plechy se střední intenzitou paprsku měly mez pevnosti sníženou o 0,3 MPa. Vzorky očištěné nejvyšší intenzitou laseru vykazovaly oproti zamaštěnému stavu mez pevnosti nižší i 0,7 MPa.

Záměrně zamaštěný plech ZM měl mez pevnosti 8,5 MPa. Plechy sotřeným, ale laserem neošetřeným povrchem vykazovaly mez pevnosti o 0,75 MPa vyšší. Při použití nejnižší intenzity laseru hodnota meze pevnosti stoupla o 0,05 MPa. Úprava střední intenzitou vykazovala nárůst o 0,15 MPa. Nejvyšší intenzita laseru způsobila nárůst o 0,4 MPa.

### 4.3. Morfologie porušení lepených spojů

Po skončení tahové zkoušky byl u vzorků analyzován typ poruchy a struktura lepeného spoje.

Makroskopická analýza typu poruchy lepeného spoje prokázala, že se u všech vzorků se jednalo o kohezní poruchu lepidla. (Obrázek 37)

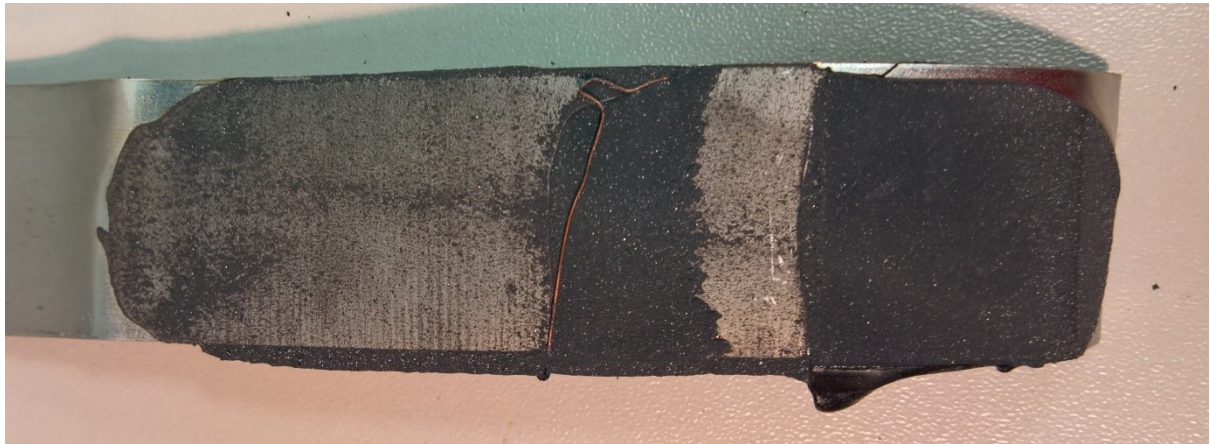


Obrázek 37: Ukázková kohezní porucha lepeného spoje, Zdroj: Autor

U některých vzorků slepených lepidlem na bázi epoxidové pryskyřice došlo k poruše spoje, při které se lepidlo odtrhlo těsně nad povrchem adherentu.



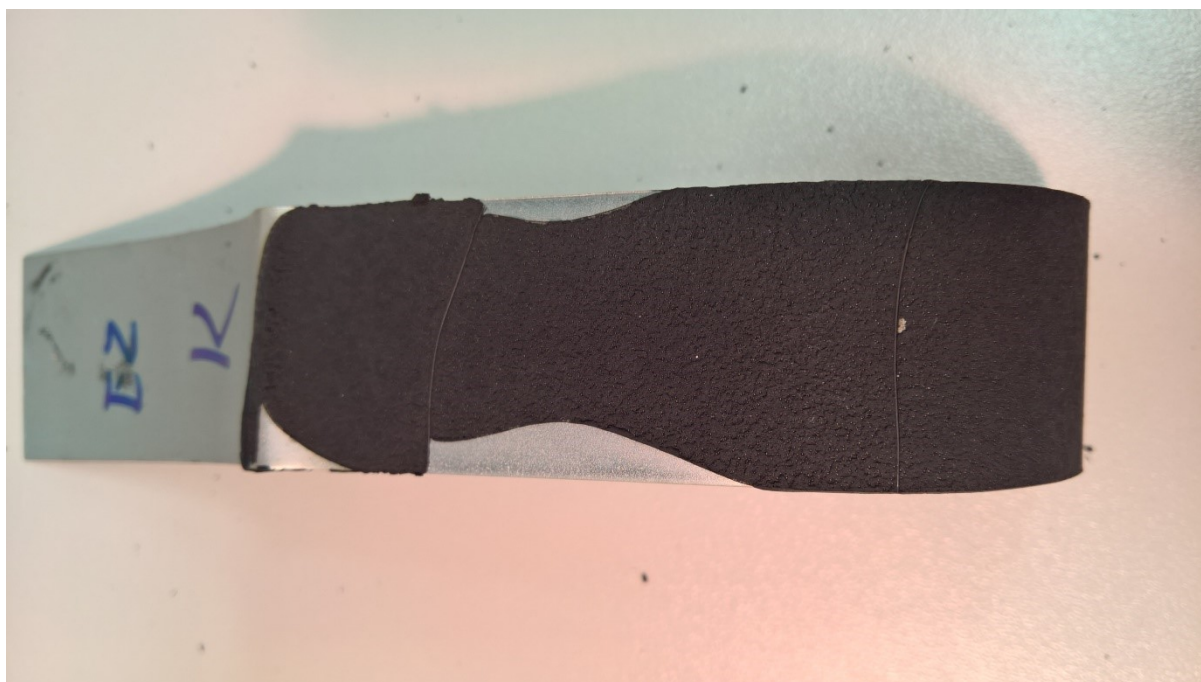
(Obrázek 38) Přesto se nejednalo o poruchu adheze, jelikož na povrchu adherentu zůstala residua lepidla.



**Obrázek 38: Ukázka kohezní poruchy epoxidového lepidla nad povrchem plechu, Zdroj: Autor**

Tento typ poruchy se vyskytoval u tří vzorků EG + Ph očištěných nejvyšší intenzitou laseru a u 1 vzorku EG + Ph bez laserové úpravy se stanovenou vrstvou maziva.

U některých vzorků (obrázek 39) nebylo naneseno dostatečné množství lepidla, což způsobilo, že se lepidlo nerozprostřelo po celé ploše plechu, což mělo vliv na výsledky tahové zkoušky.



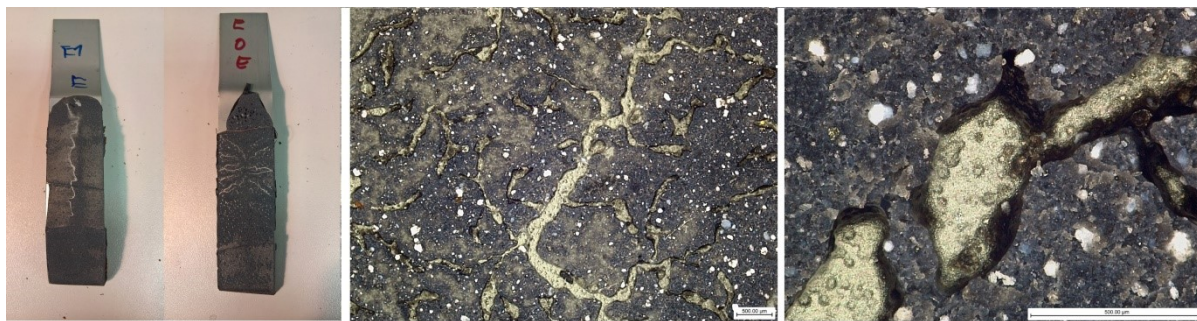
Obrázek 39: Příklad nanesení nedostatečného množství lepidla. Světlé úseky plechu značí plochu, která nebyla ve styku s lepidlem, Zdroj: Autor

Počty jednotlivých vzorků s nedostatečným množstvím lepidla jsou uvedeny v Tabulce 9.

	BetaGuard RB 214			Sikapower 492G		
	EG + Ph	HDG	ZM	EG + Ph	HDG	ZM
Laser min	1	0	0	1	1	0
Laser med	1	0	0	0	0	0
Laser max	0	0	0	0	0	0
Otřeno	0	0	0	0	1	0
Zamaštěno	0	0	0	0	0	0

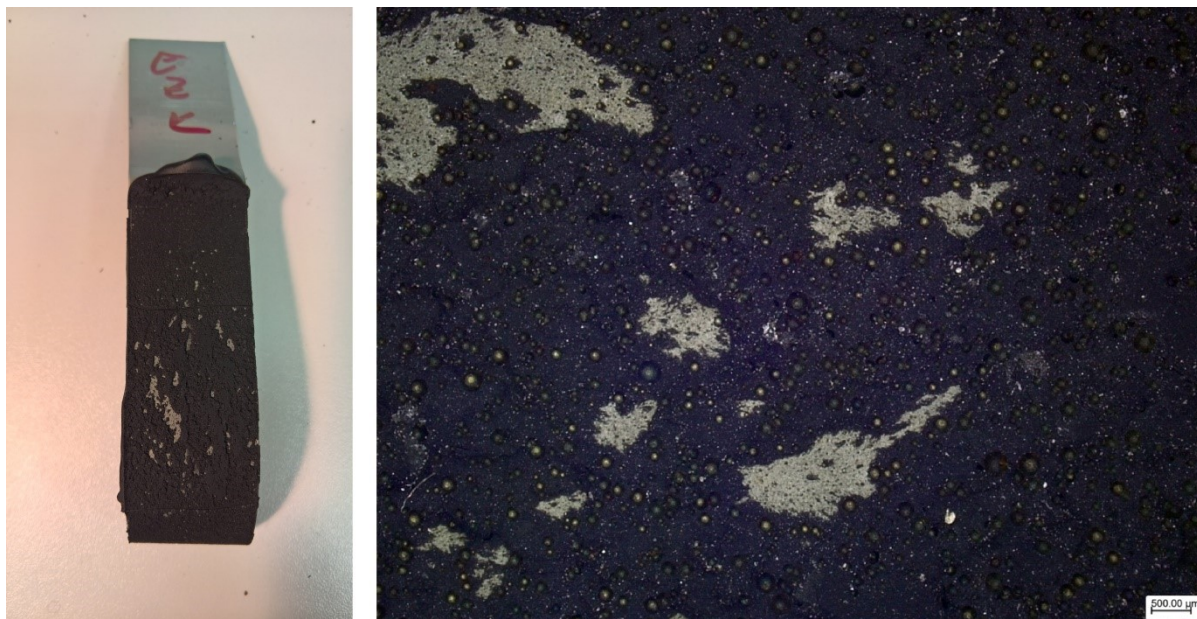
Tabulka 9: Přehled počtu vzorků s nedostatečným množstvím lepidla

Na plechu EG + Ph byly u jednoho vzorku s povrchem ošetřeným nejnižší intenzitou laseru a jednoho s neotřeným povrchem ve struktuře epoxidového lepidla nalezeny útvary připomínající řeky. (obrázek 40)

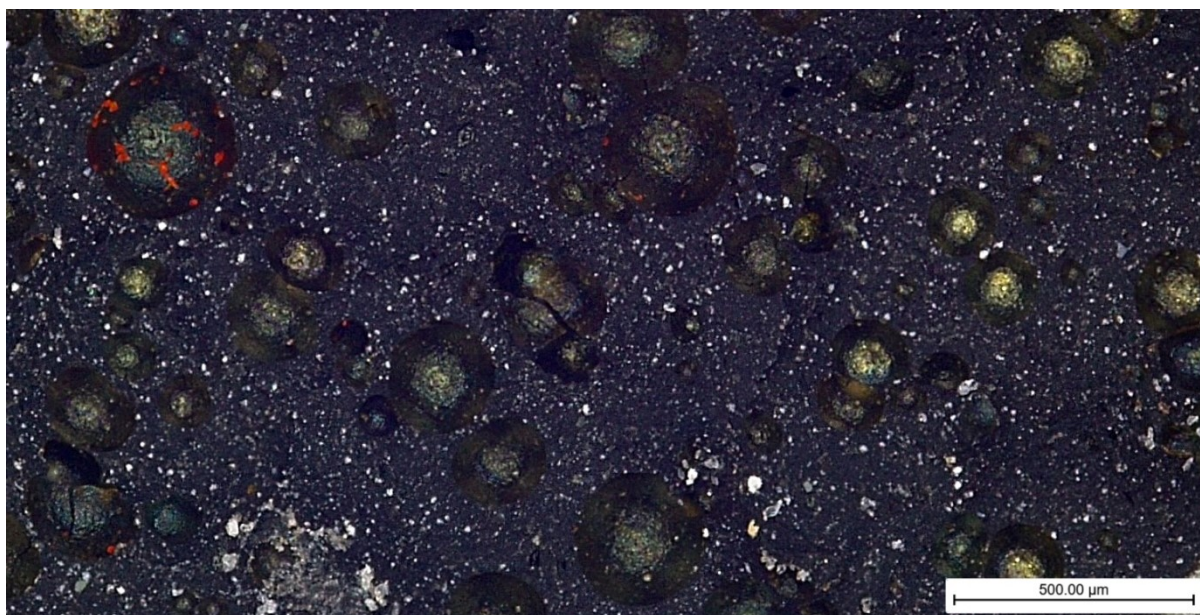


**Obrázek 40: Vlevo makroskopický snímek struktury lepidla vykazujícího praskliny ve tvaru řeky, uprostřed detail praskliny zvětšeno 50x, vpravo detail praskliny zvětšeno 250x, Zdroj: Autor**

U vzorků s lepidlem na bázi syntetického kaučuku byla pozorována místa, v kterých se odtrhly poměrně velké celky lepidla. (obrázek 41) Tato porucha se vyskytovala pouze u všech plechů s přidaným množstvím maziva.



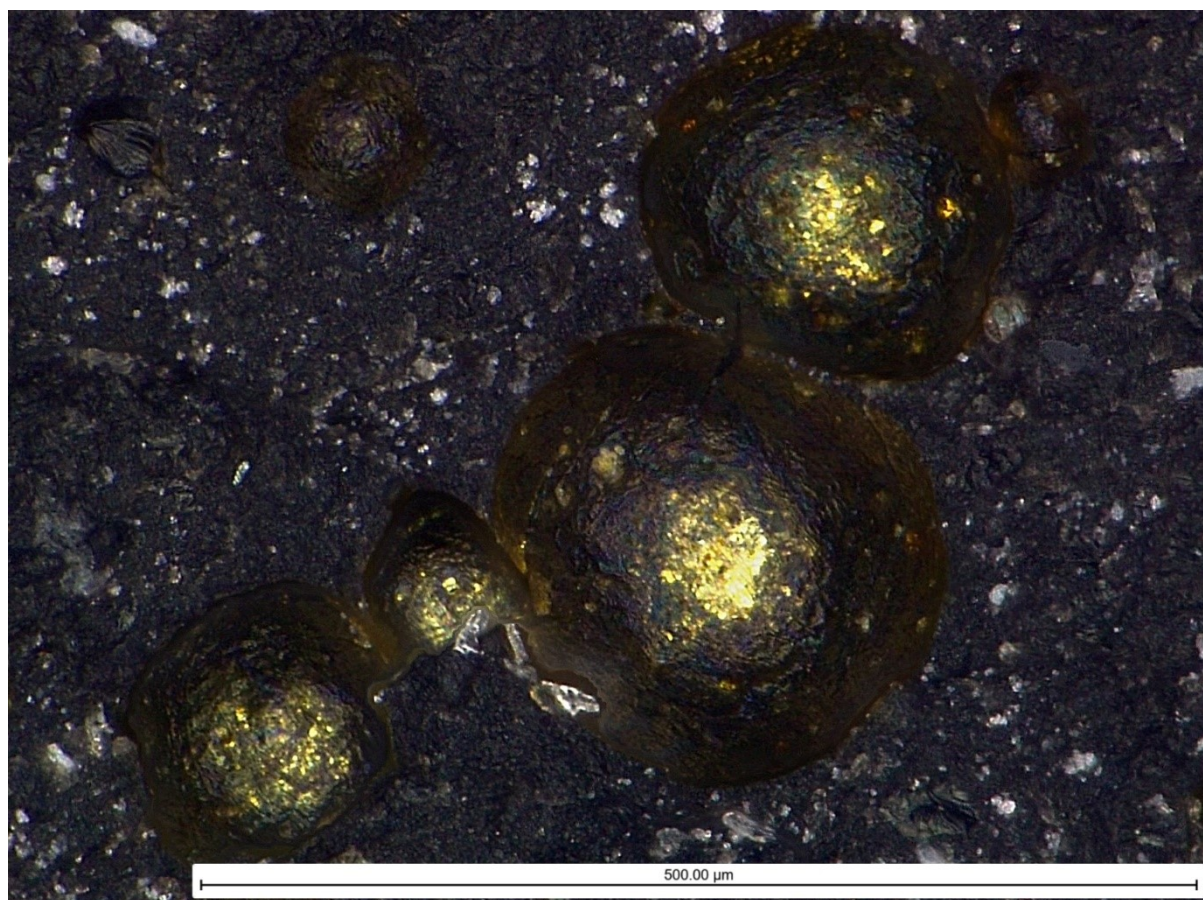
**Obrázek 41: Vlevo makroskopický snímek plechu s poruchou kaučukového lepidla, vpravo detail poruchy zvětšeno 250x, Zdroj: autor**



**Obrázek 42: Detail struktury kaučukového lepidla. Na obrázku jsou dobře vidět bubliny vznikající při vypékání, zvětšeno 250×, Zdroj: Autor**

U lepidla na bázi syntetického kaučuku byly ve struktuře nalezeny bubliny s průměrem od 70 do 350  $\mu\text{m}$ . (Obrázek 42) Nejvíce bublin s největšími průměry bylo nalezeno na vzorcích s přidaným množstvím maziva. Otřené plechy vykazovaly oproti zamaštěným menší výskyt bublin. Se zvyšující se intenzitou laseru klesal počet i průměr bublin v lepidle, ani u nejvyšší intenzity laseru však plně nevymizely.

Při osvětlení bílým světlem se povrch většiny těchto bublin leskl zlatavou barvou. (Obrázek 43) Stejnou barvu, jakou vykazuje vnitřek bublin, má i použité mazivo.



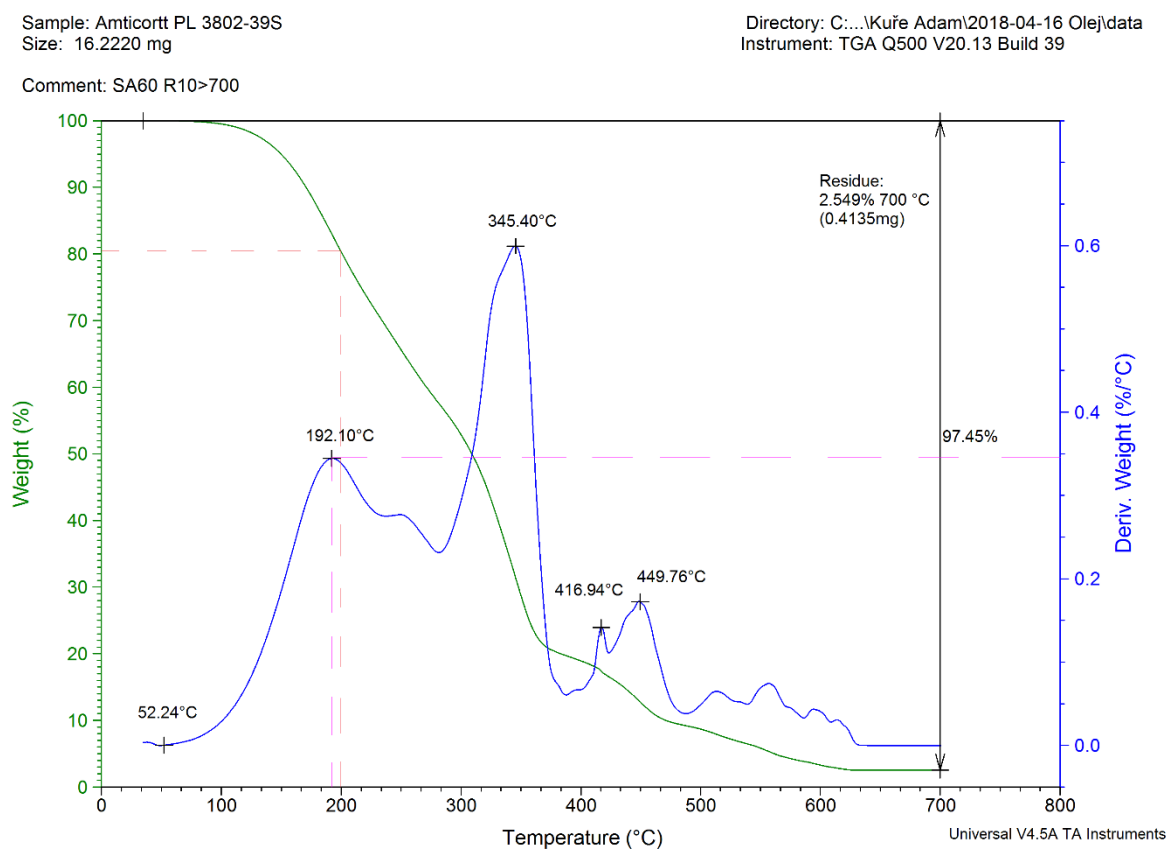
Obrázek 43: Detail povrchu vniklých bublin. Zlatavá barva indikuje zbytek mastnoty, zvětšeno 500×, Zdroj: Autor

## 4.4. Termogravimetrická zkouška

Princip metody spočívá v rovnoměrném zahřívání zkoumaného vzorku a sledování úbytku váhy v průběhu času. V závislosti na typu zkoumaného vzorku a prostředí, ve kterém je běžně používán, se volí mezi inertní atmosférou a syntetickým vzduchem.

V souvislosti s výskytem bublin v lomových plochách lepidel (především u záměrně zamaštěných vzorků) byly provedena TGA analýza použitého oleja za účelem zjištění, co se s olejem děje v průběhu tepelného vytvrzování lepeného spoje (ohřev na teplotu 180–200 °C).

Použité mazivo ANTICORIT PL 3802-39 S bylo v množství 16,2 mg zahříváno z pokojové teploty rychlostí 10 °C·min<sup>-1</sup> až do maximální teploty 700 °C. Měření probíhalo v atmosféře syntetického vzduchu s průtokem vzduchu 60 ml·min<sup>-1</sup>. Výsledkem TGA zkoušky byl Graf 1.



Graf 1: Výsledky termogravimetrické analýzy. Zeleně je značen procentuální úbytek hmotnosti v závislosti na teplotě, modře je značena první derivaci značící rychlost úbytku při ohřátí o 1 °C, Zdroj: Autor

Z grafu 1 lze vyčíst, že celkový úbytek hmotnosti při ohřevu do 700 °C činil 97,45 %, zbylých 2,55 % tvořilo neodpařitelné reziduum. Od teploty přibližně 630 °C výše již neprobíhalo žádné další vypařování, jednalo se tedy pouze o ohřev residua. Při zahřívání vzorku na teplotu 200 °C, při které jsou lepidla vytvrzována, činil úbytek hmotnosti téměř 20 %. Těchto 20 % hmotnosti se při vytvrzování lepidla přemění z kapalného skupenství na plynné a vytvoří v lepidle bubliny.

Z první derivace lze vidět, že do teploty přibližně 100 °C je rychlost vypařování minimální, poté začne prudce stoupat. První peak v okolí teploty 190 °C značí rozsah teplot, v kterém se při vytvrzování lepidla nejrychleji odpařuje mazivo. Rychlost vypařování při 192,1 °C činí 3,3 %·min<sup>-1</sup>. V celém spektru teplot dochází k největšímu vypařování při teplotách okolo 350 °C.

#### 4.5. Výsledky korozní zkoušky

Plechý byly v průběhu dvou měsíců vystaveny vzdušné vlhkosti a změnám teplot. Po celou dobu byly monitorovány, zda nejeví známky koroze. Po dvou měsících byly povrchy plechů analyzovány makroskopicky. (Obrázek 44)



Obrázek 44: Povrchy plechu HDG po dvou měsících od laserového čištění. Znamky koroze nebyly k nalezení, Zdroj: Autor

Ani jeden ze zkoumaných 12 vzorků nejevil známky koroze.

## 5. Diskuze

Tato bakalářská práce se zabývá vlivem laserového paprsku na strukturu a složení povrchu karosářských plechů a vlivem čistoty povrchu na pevnost lepeného spoje.

### 5.1. Příprava vzorků

Pro zkoumání vlivu byly vybrány tři běžně používané typy karosářských plechů. Plechy byly nařezány na vzorky o rozměrech 150 × 25 mm určené pro tahovou zkoušku a 200 × 100 mm určené pro korozní zkoušku. Standardem pro tahovou zkoušku ISO 11339:2010 jsou plechy o rozměru 250 × 25 mm s ohybem ve vzdálenosti 50 mm od kraje nebo 200 × 25 s ohybem 100 mm od okraje. Rozdílná délka vzorků nebyla vzhledem ke zkoumané problematice významná. Důležité bylo, aby byla zachována šířka plechu 25 mm.

### 5.2. Čištění povrchu

Intenzity laserového paprsku použitého během čištění plechů byly zvoleny v závislosti na možnostech laseru. Použity byly dvě krajní (minimální a maximální) a třetí odpovídající střední hodnotě rozsahu. Ozáření povrchu bylo prováděno manuálně. Během procesu laserování bylo nutné udržovat procesní hlavu laseru ve fokusační vzdálenosti, aby nedocházelo k rozostření paprsků. Nedodržení této vzdálenosti může vést ke snížení účinnosti čistícího účinku. Při případné implementaci do technologického procesu by však toto bylo řízeno automaticky.

Vliv laseru na vzorky, na jejichž povrchu byla tenká či minimální vrstva maziva byl prokazatelný již při pohledu okem (obrázek 22). Při laserování intenzivně zamaštěných vzorků nebyl čistící účinek znatelný. Omezení účinnosti může být způsobeno rozostřením světelných paprsků na rozhraní vzduchu a maziva. Druhou možností může být pohlcení části záření mazivem, tudíž nedochází ke koncentrování zářivého výkonu na malé ploše povrchu plechu, ale k rovnoměrnému ohřevu vrstvy maziva nad ním. Výzkum interakce laserových paprsků s vrstvou maziva by mohl objasnit, k jakým procesům zde dochází.



Pokud by byl laser používán k čištění plechů před lepením, je nutné, aby byly laserované plechy před očištěním zbaveny alespoň části maziva zbylém po předchozích výrobních procesech.

### 5.3. Vliv laseru na povrch plechu

Organické sloučeniny jsou složeny z řetězců uhlovodíků, tudíž obsahují velké množství uhlíku a hlavním indikátorem odstranění nečistot bývá pokles obsahu C. Drobné rozdíly v obsahu C mohou být způsobeny rozdílnými počátečními vrstvami maziva. Zastoupení uhlíku ovšem plně neobjasňuje proces ozáření povrchu laserovým paprskem, proto nelze opomenout ani ostatní prvky.

U EG + Ph plechů bez povrchové úpravy vidíme zastoupení uhlíku kolem 20 hm. %. Fosfátová skupina  $PO_3$  na povrchu plechu je patrná ze zastoupení P a C v poměru přibližně 3:2 (O:P). Dalším významně zastoupeným prvkem je Zn tvořící téměř 40 hm. %. Jedná se o podklad, na který je nanášena fosfátová vrstva. Zastoupení 40 hm. % může být způsobeno tloušťkou fosfátové vrstvy, která se na některých místech nemusí vyskytovat, nebo může být natolik tenká, že elektrony EDS analýzy přes ni projdou až na vrstvu zinku pod fosfátem.

Po provedení laserové úpravy povrchu EG + Ph plechů nejnižší intenzitou paprsku lze pozorovat téměř totožné hodnoty jako u nemodifikovaného povrchu. Drobné změny hodnot < 2 hm. % lze považovat za zanedbatelné, nelze proto mluvit o vyčištění povrchu. Výskyt prvků Cl, K a S byl pravděpodobně způsoben kontaminací plechu při přípravě vzorku. Jejich zastoupení 0,3 hm. % lze však zanedbat.

Úprava povrchu EG + Ph plechu střední intenzitou laseru již vykazuje výrazné změny v zastoupení prvků. Patrný je pokles organických sloučenin z 19,3 hm. % na 7,7 hm. %. Zároveň je vidět pokles zastoupení P, O a Mn na přibližně čtvrtinu původních hodnot. To odpovídá odpaření části fosfátové vrstvy. S tím souvisí i zvýšení podílu Zn z necelých 40 hm. % na více než 80 hm. %. Zastoupení Fe téměř 1 hm. % značí pravděpodobně odpaření části ochranné Zn vrstvy a obnažení podkladové oceli.

Při použití nejvyšší intenzity laseru na EG + Ph plech vidíme podobné zastoupení C jako u střední intenzity. Z toho lze usoudit, že zlepšení čistícího efektu mezi maximální a střední intenzitou je neznatelné. Vyšší intenzita laseru však vede k výrazně většímu ovlivnění povrchu materiálu. To je vidět na poklesu P, O a Mn souvisejícím s odpařením

fosfátové vrstvy. Stejně jako u střední intenzity je zde výskyt cca 1 % Fe, značící odpaření/ztenčení Zn vrstvy.

Porovnáme-li střední a maximální intenzitu, zjistíme, že střední intenzita vykazuje obdobné čistící účinky a zároveň je o třetinu šetrnější k vrstvě fosfátu. Stejný závěr lze vyvodit i z analýzy povrchu pomocí SEM

Laserem nečištěný HDG plech vykazuje přibližně 30 hm. % C z organických nečistot a 65 hm. % Zn z povrchové úpravy plechu. Hliník, kterého bylo naměřeno 1,7 hm. %, i ostatní prvky lze vysvětlit jako nečistoty povrchu.

Plech HDG očištěný nejvyšší intenzitou laseru vykazuje pokles C na pouhých 4 hm. %. Jedná o pokles na sedminu původní hodnoty. Obsah Al se snížil na poloviční hodnotu, tj. 0,8 hm. %. Podíl Zn se zvedl na 95 hm. %, což znamená, že povrch je téměř čistý zinek. Čištění laserem s nejvyšší intenzitou lze u tohoto typu plechu považovat za velmi účinné.

Vzorek laserem neočištěného ZM plechu obsahoval necelých 15 hm. % uhlíku a 5 hm. % kyslíku. Složení povrchové vrstvy ZM plechů vysvětluje 70 hm. % Zn. Méně než 4 hm. % Al a Mg jsou způsobeny přítomností těchto prvků v povrchové úpravě plechu. Necelé 1 hm. % síry a více jak 2 hm. % Cu jsou pravděpodobně kontaminanty.

ZM plech po laserování nejvyšší intenzitou paprsku obsahoval pouze necelých 5 hm. % uhlíku, 1,5 hm. % kyslíku. Obsah nečistot po laserování klesl na třetinu původní hodnoty. Obsah Mg a Al klesl na přibližně poloviční hodnoty. Obsah Zn po laserování byl přes 90 hm. %. Čištění laserem s nejvyšší intenzitou lze u tohoto typu plechu považovat za velmi účinné.

## **5.4. Lepení plechů**

V další fázi práce byly vzorky lepeny. Zvolená lepidla jsou běžně používána při výrobě karoserií. Pro účely práce byla lepidla na vzorky nanášena ručně pomocí pistole. To se ukázalo být problémem, jelikož na některé vzorky nebylo nanášeno dostatečné množství lepidla a při stlačení plechů nedošlo k rozprostření lepidla po celé ploše plechu. Nižší plocha lepeného spoje snížila hodnotu meze pevnosti při tahové zkoušce. Autor doporučuje použít lepidla raději více, než je na daný spoj třeba, a přebytek lepidla po vytvrzení odstranit.

## **5.5. Vypékání vzorků**

Po slepení byly vzorky 20 minut vypékány v peci s teplotou 200 °C. Jedná se o stejné podmínky, jaké jsou používány při výrobě karoserie. Po vyjmutí z pece byly vzorky ponechány na vzduchu s pokojovou teplotou, aby zchladly.

TGA (graf 1) ukázala, že během vypékání lepidla na 200 °C dochází ke značnému vypařování maziva (ztráta téměř 20 hm. %), které u kaučukového lepidla způsobuje tvorbu bublin (obrázek 43), které mohou negativně ovlivnit kohezi lepidla. U epoxidových lepidel může dojít ke koncentraci plynů a tvorbě poruch ve tvaru říček (obrázek 40) nebo poruchy popsané na (obrázku 38). Oba typy poruch negativně ovlivňují mez pevnosti (MP) lepidla.

## **5.6. Tahová zkouška**

Dále byly vytvrzené plechy zbaveny přebytečného lepidla a podrobeny tahové zkoušce dle normy ISO 11339:2010. Výsledky tahové zkoušky byly vyhodnoceny s ohledem na informace získané rozborem morfologie lomových ploch lepidel a pomocí SEM a EDS analýz.

U všech zkoumaných vzorků došlo ke kohezní poruše lepidla. To značí, že použitá lepidla jsou vyvinuta tak, aby dobře adherovala i na znečištěných površích. Aby bylo možné zjistit vliv úpravy povrchu na adhezi, bylo by třeba zopakovat experiment s využitím vysokopevnostních lepidel (s vysokou kohezí).

## **5.7. Vliv laseru na pevnost lepeného spoje**

Vliv úpravy povrchu na pevnost lepeného spoje byl vyhodnocen na základě hodnot MP z tabulky 7 a tabulky 8. Bylo přihlédnuto k morfologii poruch. Za základní hodnotu MP, se kterou jsou porovnávány ostatní, bereme MP plechu bez laserové úpravy.

## **Kaučuková lepidla**

Prvně byly vyhodnoceny vzorky slepené kaučukovým lepidlem. Hodnota MP u plechů EG + Ph ošetřených nejnižší a střední intenzitou laseru je nižší z důvodu nedostatečného množství lepidla. SEM a EDS ukázaly minimální rozdíl v čistotě mezi nejnižší intenzitou laseru a neupraveným povrchem, čemuž odpovídají i hodnoty meze pevnosti. Nízká hodnota MP pravděpodobně byla způsobena nedostatečným množstvím adheziva. Hodnota MP plechů EG + Ph s rostoucí intenzitou laseru mírně rostla.

U plechu HDG lze pozorovat nárůst MP u laserem ošetřených plechů. Nárůst je pravděpodobně způsoben nižším výskytem bublin vznikajících při vytvrzování lepidla.

Plech ZM mají nejvyšší mez pevnosti u neupraveného povrchu s přidanou vrstvou maziva. MP otřených plechů klesla o 4 %. U laserovaných plechů činil pokles MP 6-8 %. Nejedná-li se o chyby měření, znamená to, že buď má přítomnost maziva na pevnost spoje pozitivní vliv, nebo laserová úprava negativní. Další zkoumání této kombinace lepidla a povrchové úpravy by mohlo přinést zajímavé poznatky vedoucí k vysvětlení poklesu MP u laserovaných vzorků.

## **Epoxidová lepidla**

Výsledky tahové zkoušky vzorků lepených epoxidovým lepidlem se podobaly výsledkům zkoušky kaučukového lepidla.

U EG + Ph plechů vidíme u neolaserovaných povrchů srovnatelné hodnoty. Povrchy ošetřené nejnižší a střední intenzitou laseru jeví nárůst MP téměř o 1 MPa. Vysvětlení nízkých hodnot MP pro povrchy neupravené a nejvyšší intenzitu laseru nalezneme ve struktuře lepidla. U zamaštěných plechů nastala ve dvou případech situace, kdy došlo k porušení koheze těsně nad povrchem plechu (obrázek 38).

Pokles MP u HDG plechů otřených a očištěných střední intenzitou laseru byl pravděpodobně způsoben nedostatečným množstvím lepidla. S přihlédnutím k tomuto faktu lze tvrdit, že mez pevnosti nebyla ovlivněna povrchovou úpravou.

U ZM plechů lze pozorovat se vzrůstající intenzitou laseru mírné zlepšení MP. Znatelně nejvyšší MP však jevíly otřené plechy.

## **5.8. Korozní zkouška**

Korozní zkouška probíhala po dobu dvou měsíců. Vzorky byly vystaveny náročnějším podmínkám, než v jakých jsou plechy uvnitř továrny ŠA běžně skladovány. Nepřítomnost korozní vrstvy dokazuje, že pokud by mezi jednotlivými výrobními procesy bylo nutné skladovat očištěné plechy ve výrobní hale, nehrozí v důsledku laserového ošetření povrchu zvýšené riziko korozního napadení uskladněného materiálu.

## 6. Závěr

Cílem bakalářské práce bylo zkoumat vliv laserového paprsku na povrch karosářských plechů a na změnu struktury lepeného spoje. Vliv laseru byl zkoumán na třech plechách a dvou typech lepidla běžně používaných při výrobě karoserie.

Plech byly ošetřeny 5 různými povrchovými úpravami. Plech s velkým množstvím maziva na povrchu simuloval stav při opuštění procesu tváření. Otřené plechy byly zbaveny maziva, zároveň však nebyly laserovány, proto poskytovaly dobrou představu o povrchu plechů při opuštění procesu tváření. Laserové čištění bylo provedeno na otřených plechách třemi intenzitami laseru.

Nejnižší intenzita laseru nejevila téměř žádné účinky čištění. Úroveň výskytu nečistot byla porovnatelná s otřeným povrchem. Struktura povrchu zůstala rovněž nezměněna.

Maximální intenzita laseru naopak jevila výborné čistící účinky. Odstraněna byla většina nečistot. Čistící účinek zasahuje i povrch vrstvy; u plechu EG + Ph způsobil kompletní odstranění fosfátové vrstvy až na vrstvu zinku.

Střední intenzita laseru nabízela kompromis mezi výše zmíněnými účinky. Čištění bylo dostatečně efektivní a zároveň znatelně méně ovlivňovalo povrch.

V další části práce byl testován vliv povrchové úpravy na pevnost a morfologii lepeného spoje.

U kaučukového lepidla docházelo během tepleného vytvrzování k vypaření zbytkového maziva a tvorbě bublin. U epoxidového lepidla se bubliny netvořily.

Plech byly následně podrobeny tahové zkoušce dle ISO 11339:2010. Takto získané hodnoty mezi pevnosti byly mezi sebou porovnány a následně doplněny o rozbor morfologie jednotlivých spojů.

Z výsledků typu poruch vyplynulo, že při výrobě lepidel je počítáno s jeho aplikací na znečištěné povrchy, jelikož ve všech případech byla adheze vyšší než kohezní pevnost lepidla.

Výsledky kombinace plechů EG + Ph a HDG s kaučukovým lepidlem laserově čištěných střední či vyšší intenzitou přináší mírný nárůst meze pevnosti. Kombinace ZM plechu s kaučukovým lepidlem vykazovala pokles meze pevnosti způsobený laserovým čištěním.

Výsledky kombinace ZM plechu s epoxidovým lepidlem vykazují pokles MP po laserovém očištění. Hodnoty MP plechu HDG slepeného epoxidovým lepidlem zůstaly povrchovou úpravou nezměněny. EDG plech s epoxidovým lepidlem vykazoval při nízké a střední intenzitě laseru znatelný nárůst MP. U nejvyšší intenzity byla mez pevnosti srovnatelná s neolaserovaným povrchem.

Korozní zkoušky neprokázaly žádný významný negativní vliv laserového čištění na korozní odolnost.

V této bakalářské práci byl objasněn vliv laserového čištění na strukturu povrchové vrstvy a specifikován čistící účinek jednotlivých intenzit laseru. Dále byla prozkoumána možnost zvýšení pevnosti spoje. Případnou implementaci laserového čištění lepených povrchů do technologie je nutno chápat jako komplexní problematiku a je nutno zohlednit další faktory, jako například typ použitého lepidla či povrchovou úpravu.

Výsledky EDS analýzy jednotlivých vzorků dobře korespondují s analýzou pomocí SEM.

## Seznam použitých zdrojů

- [1] DOUBEK, Pavel, Michaela KOLNEROVÁ, TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI a STROJNÍ FAKULTA, 2014. *Základy technologie lepení karosářských výlisků*. Liberec: Technická univerzita. ISBN 978-80-7494-170-2.
- [2] *ADHESIVES, GLUES AND SEALANTS* [online]. [cit. 2018-05-14]. Dostupné z: <http://www.adhesiveandglue.com/adhesive-introduction.html>
- [3] *Lepení materiálů* [online]. RNDr. Libor Mrňa, Ph.D., 2016 [cit. 2018-05-14]. Dostupné z: [http://www.uobabylon.edu.iq/eprints/publication\\_3\\_4711\\_164.pdf](http://www.uobabylon.edu.iq/eprints/publication_3_4711_164.pdf)
- [4] PIZZI, A. a K. L. MITTAL, ed. *Handbook of adhesive technology*. 2nd ed., and expanded. New York: M. Dekker, 2003. ISBN 978-0-8247-0986-0
- [5] *COPTTEL - Elektrotechnika: Pájecí slitiny* [online]. Ing. František Stoklasa, 2010 [cit. 2018-05-14]. Dostupné z: <https://coptkm.cz/portal/?action=2&doc=6096>
- [6] *The Physics of Adhesives* [online]. 2017 [cit. 2018-05-14]. Dostupné z: [http://ffden-2.phys.uaf.edu/webproj/212\\_spring\\_2014/Connor\\_Mattson/connor\\_mattson/physics.html](http://ffden-2.phys.uaf.edu/webproj/212_spring_2014/Connor_Mattson/connor_mattson/physics.html)
- [7] *Adhesive* [online]. Encyclopædia Britannica (UK) Ltd.: Encyclopædia Britannica, ©2018 [cit. 2018-05-14]. Dostupné z: <https://www.britannica.com/technology/adhesive#ref625395>
- [8] *Light Spectrum and Plant Growth* [online]. Los Angeles: CA lightworks, 2016 [cit. 2018-05-14]. Dostupné z: <https://californialightworks.com/light-spectrum-and-plant-growth/>
- [9] MALÝ, Vojtěch. *Optimalizace pevnosti a hodnocení lepených spojů v automobilovém průmyslu*. Liberec, 2017. Diplomová práce. Technická univerzita v Liberci. Vedoucí práce Ing. Pavel Kejzlar, Ph.D.
- [10] BEDNAŘÍK, Martin, Bc. *Lepení polymerů*. Zlín, 2011. Diplomová práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Vedoucí práce Ing. David Maňas, Ph.D.
- [11] *Učebnice chemie pro 8. ročník ZŠ: Stavba atomu* [online]. [cit. 2018-05-14]. Dostupné z: <http://www.zschemie.euweb.cz/atomy/atom3.html>
- [12] *Encyklopedie fyziky: » Emise a absorpce světla* [online]. ©2006-2018 [cit. 2018-05-14]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/776-emise-a-absorpce-svetla>
- [13] *Physics and Radio-Electronics: LASER* [online]. ©2013-2015 [cit. 2018-05-14]. Dostupné z: <http://www.physics-and-radio-electronics.com/physics/laser/laserintroduction.html>



- [14] THOMAS, Gary a Richard ISAACS, 2011. Basic principles of lasers. *Anaesthesia & Intensive Care Medicine* [online]. **12**(12), 574–577. ISSN 14720299. Dostupné z: doi:[10.1016/j.mpaic.2011.09.013](https://doi.org/10.1016/j.mpaic.2011.09.013)
- [15] *Laser* [online]. Encyclopædia Britannica (UK) Ltd.: Encyclopædia Britannica ©2018 [cit. 2018-05-14]. Dostupné z: <https://www.britannica.com/technology/laser#ref88870>
- [16] *A History of the Laser: A Trip Through the Light Fantastic* [online]. MELINDA ROSE, 2010 [cit. 2018-05-14]. Dostupné z: [https://www.photonics.com/a42279/A\\_History\\_of\\_the\\_Laser\\_A\\_Trip\\_Through\\_the\\_Light](https://www.photonics.com/a42279/A_History_of_the_Laser_A_Trip_Through_the_Light)
- [17] *Nový nástroj pro čištění v průmyslu* [online]. Praha, 2015 [cit. 2018-05-14]. Dostupné z: <http://www.lascam.cz/novy-nastroj-pro-cistení-v-prumyslu-laser/>
- [18] PERRIÈRE, J, Eric MILLON a E FOGARASSY, 2006. *Recent advances in laser processing of materials* [online]. Amsterdam: Elsevier [vid. 2018-05-13]. ISBN 978-0-08-045971-4. Dostupné z: <http://site.ebrary.com/id/10138167>
- [19] LIEBERMAN (AUTH.), Alvin, 1992. *Contamination Control and Cleanrooms: Problems, Engineering Solutions, and Applications* [online]. 1. vyd. B.m.: Springer US [vid. 2018-05-12]. ISBN 978-1-4684-6514-3. Dostupné z: <http://gen.lib.rus.ec/book/index.php?md5=9b2a7ca1c1939dac208ed310eef88eb4>
- [20] BIKERMAN, Jacob J. CAUSES OF POOR ADHESION: WEAK BOUNDARY LAYERS. *Industrial & Engineering Chemistry* [online]. 1967, **59**(9), 40–44. ISSN 0019-7866, 1541-5724. Dostupné z: doi:10.1021/ie51403a010
- [21] .KONIECZKO, M.B. a De Montfort UNIVERSITY. *Fundamental Study of Adhesion Problems Involving Polyethylene and Other Polymers* [online]. B.m.: De Montfort University, 1979. Dostupné z: <https://books.google.cz/books?id=cyGknQAACAAJ>
- [22] CIDADE, Mariana Kuhl, Felipe Luis PALOMBINI, Lauren da Cunha DUARTE a Sidnei PACIORNIK, 2018. Investigation of the thermal microstructural effects of CO 2 laser engraving on agate via X-ray microtomography. *Optics & Laser Technology* [online]. **104**, 56–64. ISSN 00303992. Dostupné z: doi:[10.1016/j.optlastec.2018.02.002](https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2018.02.002)
- [21] KONIECZKO, M.B. a De Montfort UNIVERSITY. *Fundamental Study of Adhesion Problems Involving Polyethylene and Other Polymers* [online]. B.m.: De Montfort University, 1979. Dostupné z: <https://books.google.cz/books?id=cyGknQAACAAJ>

## Seznam obrázků

Obrázek 1: Schéma elevačního úhlu, Zdroj [5] .....	- 13 -
Obrázek 2: Schéma adheze a koheze, Zdroj: [1].....	- 14 -
Obrázek 3: Schéma elektrické dvojvrstvy na rozhraní materiálů, Zdroj: [1].....	- 14 -
Obrázek 4: Schéma tvorby chemických vazeb na rozhraní materiálů, Zdroj: [1] .....	- 15 -
Obrázek 5: Schéma mechanický zámků. a - vrstva adheziva, b – povrch adherentu, c – lepidlem nezaplňené prostory, Zdroj: [10] .....	- 15 -
Obrázek 6: Schéma tenké vrstvy vytvořené mezi adhezivem a adherentem, Zdroj: Autor	- 16 -
Obrázek 7: Schéma tvorby sekundárních vazeb na povrchu adherentu, Zdroj: [6].....	- 16 -
Obrázek 8: Schéma difuze molekul na rozhraní adheziva a adherentu, Zdroj: [1].....	- 17 -
Obrázek 9: Schéma typu poruch lepeného spoje. a - selhání adheze, b - selhání koheze adheziva, c - selhání koheze adherentu, Zdroj: [9] .....	- 18 -
Obrázek 10: Spektrum EM záření. Viditelné spektrum je zvětšeno a jednotlivým vlnovým délkám je přiřazena příslušná barva, Zdroj: [8] .....	- 20 -
Obrázek 11: Schéma atomu s 9 elektrony na 3 energetických hladinách, Zdroj: [11] -	21 -
Obrázek 12: a - spontánní emise, b - absorpce záření, c - stimulovaná emise, Zdroj: [12] -	24 -
Obrázek 13: Schéma procesu stimulované emise v systému se 3 energetickými hladinami, Zdroj: [13].....	- 26 -
Obrázek 14: a - nekoherentní záření, b - koherentní záření, Zdroj: [13] .....	- 27 -
Obrázek 15: Nahoře rozptyl světla z běžných zdrojů, dole rozptyl laserového paprsku, Zdroj: [13] .....	- 28 -
Obrázek 16: Schéma vnitřních komponent laseru, Zdroj: [13] .....	- 30 -
Obrázek 17: Schéma působení laserového paprsku na povrch materiálu, Zdroj: [17]-	31 -
Obrázek 18: HDG plech připravený k laserování, Zdroj: Autor .....	- 35 -
Obrázek 19: Čistící laser CL 300 od společnosti LASCAM systems s.r.o. Vlevo laser samotný, vpravo procesní hlava laseru, ochranné brýle a stlačený vzduch, Zdroj: Autor .	- 35 -
Obrázek 20: Proces laserování, Zdroj: Autor .....	- 36 -
Obrázek 21: Vlevo porovnání očištěného a neočištěného povrchu, vpravo porovnání intenzit laseru na povrch plechu EG + Ph (směrem doprava intenzita klesá), Zdroj: Autor .....	- 36 -
Obrázek 22: Očištěný plech určený ke korozní zkoušce, ve třetině plechu lze vidět hranici očištěného povrchu, Zdroj: Autor.....	- 37 -
Obrázek 23: Zamaštěné plechy po očištění, lesk povrchu plechu značí zbytky maziva, Zdroj: Autor .....	- 37 -
Obrázek 24: Umístěný měděných drátků v lepidle, Zdroj: Autor.....	- 39 -
Obrázek 25: sety slepených vzorků po vychladnutí, Zdroj: Autor .....	- 39 -
Obrázek 26: Zařízení TIRatest 2300 s obslužným PC. Na zařízení právě probíhá tahová zkouška jednoho ze vzorků, Zdroj: Autor .....	- 40 -
Obrázek 27: SEM Zeiss Ultra Plus s EDS modulem Oxford X-Max, Zdroj: Autor .....	- 41 -
Obrázek 28: Optický mikroskop Leica DVM6 s oblužným PC, Zdroj: Autor .....	- 42 -
Obrázek 29: Snímek ze SEM. Jedná se o otřený plech EG + Ph, zvětšeno 250×, Zdroj: Autor .....	- 45 -
Obrázek 30: Snímek ze SEM. Na obrázku je plech EG + Ph očištěný nejnižší intenzitou laseru, zvětšeno 250×, Zdroj: Autor.....	- 46 -

Obrázek 31: Snímek ze SEM. Na obrázku je plech EG + Ph očištěný střední intenzitou laseru, zvětšeno 250×, Zdroj: Autor.....	- 47 -
Obrázek 32: Snímek ze SEM. Na obrázku je plech EG + Ph očištěný nejvyšší intenzitou laseru, zvětšeno 250×, Zdroj: Autor.....	- 48 -
Obrázek 33: Porovnání všech čtyř úprav povrchu EG + Ph plechů; Zdroj: Autor.....	- 48 -
Obrázek 34: Porovnání SEM snímků HDG plechů. Vlevo otřený, vpravo očištěný nejvyšší intenzitou laseru, zvětšeno 250×, Zdroj: Autor.....	- 49 -
Obrázek 35: Porovnání SEM snímků ZM plechů. Vlevo otřený, vpravo očištěný nejvyšší intenzitou laseru, zvětšeno 250×, Zdroj: Autor.....	- 50 -
Obrázek 36: Ukázka výsledků EDS analýzy povrchu, Zdroj: Autor.....	- 51 -
Obrázek 37: Ukázková kohezní porucha lepeného spoje, Zdroj: Autor.....	- 55 -
Obrázek 38: Ukázka kohezní poruchy epoxidového lepidla nad povrchem plechu, Zdroj: Autor.....	- 56 -
Obrázek 39: Příklad nanesení nedostatečného množství lepidla. Světlé úseky plechu značí plochu, která nebyla ve styku s lepidlem, Zdroj: Autor.....	- 57 -
Obrázek 40: Vlevo makroskopický snímek struktury lepidla vykazujícího praskliny ve tvaru řeky, uprostřed detail praskliny zvětšeno 50x, vpravo detail praskliny zvětšeno 250×, Zdroj: Autor.....	- 58 -
Obrázek 41: Vlevo makroskopický snímek plechu s poruchou kaučukového lepidla, vpravo detail poruchy zvětšeno 250×, Zdroj: autor.....	- 58 -
Obrázek 42: Detail struktury kaučukového lepidla. Na obrázku jsou dobře vidět bubliny vznikající při vypékání, zvětšeno 250×, Zdroj: Autor.....	- 59 -
Obrázek 43: Detail povrchu vniklých bublin. Zlatavá barva indikuje zbytek mastnoty, zvětšeno 500×, Zdroj: Autor.....	- 60 -
Obrázek 44: Povrchy plechu HDG po dvou měsících od laserového čištění. Znamky koroze nebyly k nalezení, Zdroj:Autor.....	- 62 -

## Seznam grafů

Graf 1: Výsledky termogravimetrické analýzy. Zeleně je značen procentuální úbytek hmotnosti v závislosti na teplotě, modře je značena první derivací značící rychlost úbytku při ohřátí o 1 °C, Zdroj: Autor.....	- 61 -
---	--------

## Seznam tabulek

Tabulka 1: Přehled použitých plechů.....	- 32 -
Tabulka 2: Přehled použitých lepidel.....	- 32 -
Tabulka 3: Přehled použitých povrchových úprav.....	- 33 -
Tabulka 4: Přehled počtu vzorků pro dané kombinace plechu a povrchové úpravy ..	- 34 -
Tabulka 5: vzorky, které byly zkoumány pomocí SEM a EDS.....	- 41 -
Tabulka 6: Přehled výsledků EDS analýz všech vzorků.....	- 52 -
Tabulka 7: Přehled výsledků tahové zkoušky pro kaučukové lepidlo.....	- 53 -
Tabulka 8: Přehled výsledků tahové zkoušky pro epoxidové lepidlo.....	- 54 -
Tabulka 9: Přehled počtu vzorků s nedostatečným množstvím lepidla.....	- 57 -

## Obsah CD

- Text bakalářské práce
  - BP\_KuřeAdam\_Final.docx
  - BP\_KuřeAdam\_Final.pdf