

Česká zemědělská univerzita v Praze
Technická fakulta



**Vliv procesu stárnutí na pevnost
lepených spojů**

Diplomová práce

Vedoucí práce: prof. Ing. Miroslav Müller, Ph.D.

Autor práce: Bc. Matěj Humňal

© 2022 ČZU v Praze

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Bc. Matěj Humňal

Obchod a podnikání s technikou

Název práce

Vliv procesu stárnutí na pevnost lepených spojů

Název anglicky

Influence of aging process on adhesive bond strength

Cíle práce

Aplikace technologie lepení je limitována působením degradačního prostředí na lepený spoj. Kombinovaný vliv slunečního záření, změn teploty a vlhkosti atd. vede ke stárnutí materiálů a výrobků. Cílem diplomové práce bude studium vlivu degradačních aspektů na změnu mechanických vlastností lepených spojů. Experimentální program diplomové práce bude zaměřen na stanovení možných výrobních postupů tvorby lepeného spoje minimalizujících vliv procesu stárnutí lepených spojů, tj. jejich degradaci. Při řešení práce bude využíváno moderních zařízení, která jsou ve vybavení katedry

Metodika

Současný stav řešeného problému (literární rešerše).

Cíl práce a metody jejího zpracování.

Řešení podstaty dané problematiky.

Přínos a závěry práce.

Doporučený rozsah práce

cca 60 stran

Klíčová slova

Degradace, mechanické vlastnosti, technologie lepení, výzkum.

Doporučené zdroje informací

BRIŠ, P., KUBĚNA, J., ŠTRKAŇ, J.: Lepení v praxi. Praha: Grada Publishing, 2017.

BROCKMANN, W.: Adhesive bonding: materials, applications and technology. Weinheim: Wiley – VCH, 2009.

CAMPILHO, R. D. S. G.: Strength prediction of adhesively-bonded joints [online]. Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2017.

Časopis: International Journal of Adhesion and Adhesives, Composite structures, Research in Agricultural Engineering, International Journal of Solids and Structures, Journal of Materials Processing Technology, Strojírenská technologie, Manufacturing Technology atd.

DAVIES, G.: Materials for automobile bodies. Oxford: Butterworth – Heinemann, 2003.

EBNESAJJAD, S.: Adhesives technology handbook. Norwich: William Andrew, 2008.

MESSLER, R. W.: Joining of materials and structures from pragmatic process to enabling technology. Burlington: Elsevier, 2004.

MITTAL, K. L.: Contact angle, wettability and adhesion. Boston: Brill Academic Publisher, 2003.

PACKHAM, D. E.: Handbook of adhesion. Chichester: John Wiley and Sons, 2005.

PIZZI, A., MITTAL, K. L.: Handbook of adhesive technology. New York: Dekker, 2003.

Předběžný termín obhajoby

2021/2022 LS – TF

Vedoucí práce

prof. Ing. Miroslav Müller, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra materiálu a strojírenské technologie

Elektronicky schváleno dne 26. 1. 2021

prof. Ing. Miroslav Müller, Ph.D.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 10. 2. 2021

doc. Ing. Jiří Mašek, Ph.D.

Děkan

V Praze dne 16. 03. 2022

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma: Vliv procesu stárnutí na pevnost lepených spojů vypracoval samostatně a použil jen pramenů, které cituji a uvádím v seznamu použitých zdrojů.

Jsem si vědom, že odevzdáním diplomové práce souhlasím s jejím zveřejněním dle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů, ve znění pozdějších předpisů, a to i bez ohledu na výsledek její obhajoby.

Jsem si vědom, že diplomová práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitní databázi a bude veřejně přístupná k nahlédnutí.

Jsem si vědom, že na diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů, ve znění pozdějších předpisů, především ustanovení § 35 odst. 3 tohoto zákona, tj. o užití tohoto díla.

V Praze dne:

Podpis autora práce:

Bc. Matěj Humňal

Vliv procesu stárnutí na pevnost lepených spojů

Abstrakt

Předmětem této diplomové práce je problematika lepených spojů uhlíkové oceli a zkoumání vlivů stárnutí na jejich pevnost. V úvodní části je řešen současný stav problematiky lepení metodou literární rešerše, s důrazem na rozbor vybraných degradačních vlivů způsobujících stárnutí, a tím snížení pevnosti lepených spojů. Následuje uvedení do obsahu experimentální části diplomové práce, kde je definována metodika experimentu od přípravy vzorků po vyhodnocování výsledků měření. Interpretace výsledků experimentu v poslední části diplomové práce sestává ze studia vlivu degradačních aspektů na změnu mechanických vlastností, které obsahuje statistický rozbor hodnot měření pevnosti degradovaných lepených spojů, popis snímků vzorků z rastrovacího elektronového mikroskopu a ekonomické zhodnocení. V závěru diplomové práce jsou shrnuty nejvýznamnější poznatky a přínosy výzkumu.

Klíčová slova

Degradace, mechanické vlastnosti, technologie lepení, výzkum.

Influence of aging process on adhesive bond strength

Summary

The subject of this diploma thesis is the issue of adhesive bonds of carbon steel and the study of the effects of aging on their strength. By the method of literature research, the introductory part deals with the current state of gluing, with emphasis on the analysis of selected degradation effects causing aging and thus reducing the strength of adhesive bonds. This is followed by an introduction to the content of the experimental part of the diploma thesis, where the methodology of the experiment is defined, from sample preparation to evaluation of measurement results. The results interpretation of the experiment in the diploma thesis last part consists of the study of the degradation aspect's influence on the mechanical property change, which contains a statistical analysis of strength measurements of degraded adhesive bonds, description of electron microscope images and economical evaluation. The conclusion of the diploma thesis summarizes the most important findings and benefits of research.

Key words:

Degradation, mechanical properties, gluing technology, research.

Obsah

1	Úvod.....	1
2	Cíle a metodika práce	2
3	Teoretická východiska	3
3.1	Definice a dělení lepení.....	3
3.1.1	Rozdělení dle fyzické podstaty	5
3.1.2	Rozdělení dle chemické struktury	5
3.1.3	Rozdělení dle počtu složek	6
3.2	Výhody a nevýhody lepeného spoje	8
3.3	Konstrukce lepených spojů	8
3.4	Úprava povrchu adherendu	9
3.4.1	Fyzikální procesy	10
3.4.2	Chemické procesy	11
3.5	Tuhá fáze lepeného spoje	11
3.6	Degradační vlivy	13
3.6.1	Degradace adheziva před lepením	13
3.6.2	Degradace působením teploty	13
3.6.3	Degradace působením vlhkosti	14
3.6.4	Degradace kontaminanty	15
3.6.5	Působení okolních přírodních vlivů na lepený spoj	16
3.7	Zkoušky lepených spojů	17
3.7.1	Nedestruktivní zkoušky lepených spojů	17
3.7.2	Destruktivní zkoušky pevnosti	18
3.8	Použití lepidel v praxi	22
3.8.1	Automobilový průmysl	22
3.8.2	Letectví a kosmická technika	24
3.8.3	Stavební průmysl	24
4	Metodika laboratorního experimentu.....	25
5	Interpretace výsledků destruktivní zkoušky pevnosti lepených spojů	39

5.1	Pevnost zkoumaných lepidel.....	39
5.1.1	Změna pevnosti transparentního epoxidového lepidla	39
5.1.2	Změna pevnosti epoxidového lepidla s obsahem oceli	41
5.1.3	Změna pevnosti epoxidového lepidla s obsahem hliníku.....	43
5.1.4	Porovnání hodnot pevnosti lepidel	45
5.2	Deformace zkoumaných lepidel.....	47
5.2.1	Změna deformace transparentního epoxidového lepidla	47
5.2.2	Změna deformace epoxidového lepidla s obsahem oceli	48
5.2.3	Změna deformace epoxidového lepidla s obsahem hliníku	49
5.2.4	Porovnání hodnot deformace lepidel	50
6	Interpretace výsledků zkoumání mikroskopem	51
7	Doplňující informace o odchylkách experimentu	57
8	Ekonomické zhodnocení	57
9	Závěr a přínos práce.....	58
10	Citované zdroje	60
	Seznam obrázků.....	64
	Seznam grafů	66
	Seznam tabulek.....	66
	Seznam rovnic.....	66
	Seznam příloh	67
	Přílohy diplomové práce	1

1 Úvod

Technologie lepení prochází neustálým vývojem a jedná se o velice prestižní a průlomovou technologii spojování materiálů. V porovnání s konvenčními metodami spojování materiálu má mnoho důležitých výhod, díky kterým je stále více využívána v průmyslovém odvětví. Historie lepení sahá až do pravěku, v hrobech této doby byly nalezeny džbány a nádoby s lepidly a lepivými pryskyřicemi, lepené čepele oštěpů a čepele lepené k rukojetím. Počátkem 16. století započalo hojnější používání lepidel, kdy se v nábytku anglického původu používalo lepení živočišným klijem. Epoxidové pryskyřice se ve větším měřítku začaly vyrábět až od roku 1940, většina z nich byla následně využívána k výrobě epoxidových lepidel. Hlavními výrobci tohoto typu lepidel byly zejména: USA (Shell, Epon), SSSR (epoxydová lepidla ED-5, ED-6), švýcarská firma Ciba, NDR (Leuna-Werke, firma Epilox). Právě lepidla na bázi epoxidových pryskyřic byla vybrána pro experimentální část této diplomové práce.

V teoretické části diplomové práce je pomocí literární rešerše popsána problematika lepených spojů od jeho definice a dělení lepidel, přes jejich výhody a nevýhody, konstrukci spojů, úpravu povrchu adherendů před lepením, až po popis samotných degradačních vlivů způsobujících stárnutí lepidel a zkoušky pevnosti lepených spojů. Teoretická část diplomové práce pokládá základ pro praktickou část práce.

Praktická část diplomové práce je rozdělena na dvě hlavní části – metodiku laboratorního experimentu a na samotnou interpretaci výsledků výzkumu:

Metodika výzkumu detailně popisuje tvorbu vzorků pro zkoumání degradačních vlivů, včetně popisu všech použitých strojů, a jsou zde definovány degradační podmínky, jakým jsou vzorky vystaveny. V poslední části metodiky experimentu jsou popsány použité způsoby zkoumání lepených spojů.

Samotná interpretace výsledků experimentu sestává rovněž ze dvou částí. Nejdříve jsou vyhodnoceny výsledky měření destruktivní zkoušky pevnosti ve smyku takovým namáháním a následně jsou popsány snímky struktury lepených spojů pořízené rastrovacím elektronovým mikroskopem. Součástí je rovněž ekonomické zhodnocení experimentu.

2 Cíle a metodika práce

Cíl práce

Aplikace technologie lepení je limitována působením degradačního prostředí na lepený spoj. Kombinovaný vliv slunečního záření, změn teploty a vlhkosti atd. vede ke stárnutí materiálů a výrobků. Cílem diplomové práce bude studium vlivu degradačních aspektů na změnu mechanických vlastností lepených spojů. Experimentální program diplomové práce bude zaměřen na stanovení možných výrobních postupů tvorby lepeného spoje minimalizujících vliv procesu stárnutí lepených spojů, tj. jejich degradaci. Při řešení práce bude využíváno moderních zařízení, která jsou ve vybavení katedry.

Metodika práce

Současný stav řešeného problému (literární rešerše)

Cíl práce a metody jejího zpracování

Řešení podstaty dané problematiky

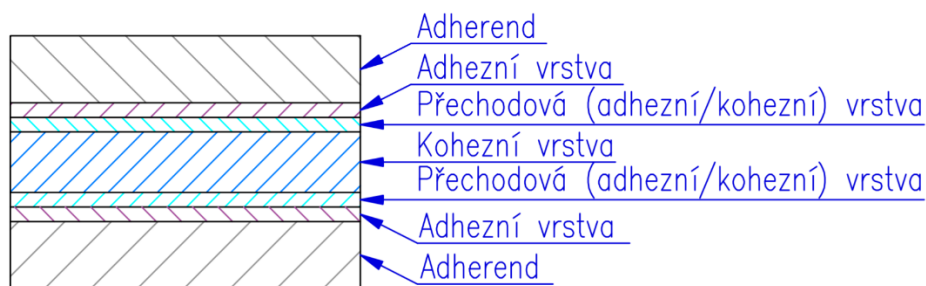
Přínos a závěry práce

3 Teoretická východiska

V této kapitole je popsán současný stav řešené problematiky, od definice technologie lepení a dělení lepidel, přes strukturu lepeného spoje, až po popis degradačních vlivů a normovaných zkoušek pevnosti lepených spojů.

3.1 Definice a dělení lepení

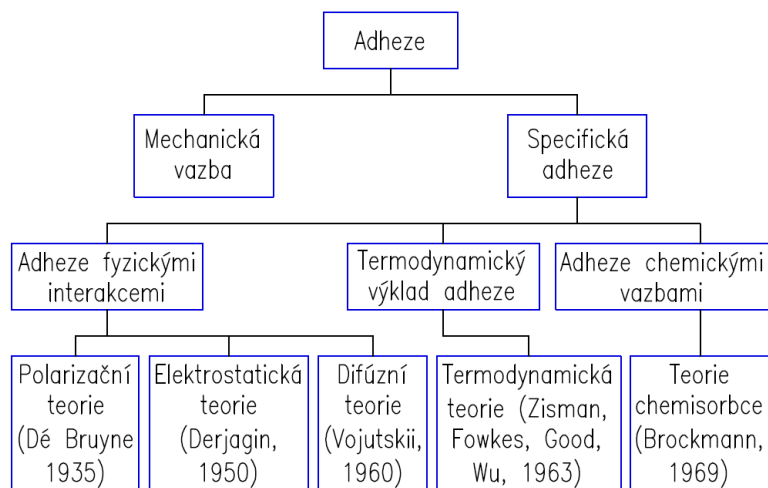
Jeden z nejdůležitějších hmotných jevů v přírodě a technologii je pojem **adheze**. Při makroskopickém pohledu je adheze vnímána jako dvourozměrná přilnavost dvou stejných, podobných nebo různých materiálů k sobě, proto je to právě ten nejvýznamnější pojem v teorii lepení. Příkladem mohou být historické i moderní stavby, které drží pohromadě právě adheze mezi maltou a cihlami, automobilová pneumatika bude fungovat pouze tehdy, pokud bude gumu, tkaninu a ocelové dráty držet adheze pohromadě, nebo například papír vyrobený z lepených vláken. **Koheze** neboli soudržnost je vlastní pevnost lepidla a je reprezentována souhrnem všech přitažlivých sil, které navzájem poutají částice lepidla. Schéma řezu lepeným spojem je znázorněna na Obrázku 1. [1]



Obrázek 1 - Schéma struktury lepeného spoje, [2], vlastní zpracování

Přilnavost neboli adheze se dá rozdělit do dvou kategorií – mechanická a specifická adheze (Obrázek 2). Mechanická adheze vzniká u lepení takových materiálů, kdy tekuté lepidlo proniká do pórů a drsností povrchu, a je proto hlavní složkou například u lepení dřeva. U lepení kovů má však jen nepatrný význam a mluvíme tak o specifické adhezi, kde je spojení způsobeno mezimolekulárním napětím, které vzniká na hranici mezi kovem a lepidlem. Podmínkou je zde dobrá smáčivost lepidla na povrch kovu. Na následujícím obrázku je specifická adheze dále rozdělena. [1] [3]

Lepení je technologický proces tvorby trvalého nerozebíratelného spojení dvou součástí. „Za lepidlo lze podle normy ČSN EN 923 + A1 považovat látku schopnou spojovat materiály slepením povrchů (adhezí) s tím, že lepený spoj disponuje potřebnou vnitřní pevností (kohezí).“ [4]

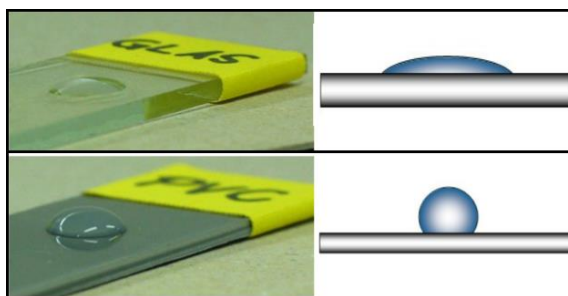


Obrázek 2 - Klasické teorie dělení adheze, [1], vlastní zpracování

Subjekt, který vytvoří pevné mezifázové spojení dvou různých ploch lepených adherendů, je nazýván lepený spoj. Právě jedna nebo obě plochy spojovaných materiálu musí být schopny okamžitě nebo za určitou dobu vytvořit pevné mezipovrchové spojení. Lepidlo tedy musí splňovat podmínky – pokrýt plochu adherendu (lepeného materiálu), vytvořit mezifázové spojení plochy lepidivé vrstvy lepidla a lepeným adherendem a nakonec vytvořit tuhou fázi. [4]

Smáčivost lepidla

Smáčivost lepidla je jedna z jeho základních vlastností a je pevně spjatá s teorií adheze. Jedná se o schopnost lepidla ulpět na povrchu adherendu a šířit se po něm. Faktorem dobré smáčivosti povrchu je fyzikálně–chemická vlastnost, polarita. Polarita zapříčiňuje vznik povrchové energie, jejíž veličinou je povrchové napětí. Smáčivost je následně určena porovnáním povrchového napětí lepidla a adherendu. Pokud je povrchové napětí lepidla nižší než lepeného povrchu, rozlití (smočení) bude výraznější (Obrázek 3 nahoře) než v opačném poměru (Obrázek 3 dole). Dobrou smáčivostí lepidla na adherendu jsou nastaveny vhodné podmínky pro vytvoření vyžadované adhezní pevnosti. Smáčivost je demonstrována následujícím obrázkem, kde je porovnána dobrá smáčivost kapky vody na vzorku skla a špatná smáčivost kapky vody na vzorku z PVC, které má v porovnání s vodou nižší povrchové napětí. [5], [6]



Obrázek 3 - Porovnání smáčivosti různých povrchů, [6]

3.1.1 Rozdělení dle fyzické podstaty

Základní specifikace lepidel spočívá právě v jejich rozdělení do jednotlivých přírodních skupenství, a to kapalná, tuhá či jejich určitá kombinace:

1. Kapalná lepidla

Látky v kapalném stavu – reaktivní monomery, reaktivní prepolymer, roztoková či disperzní lepidla.

2. Tuhá lepidla

Látky v tuhém stavu působením tepla (přímým působením tepla, vysokou frekvencí atd.) jsou uvedeny do plastického stavu, a tím jsou schopny adheze a následným spojením lepených ploch – termolepidla, lepicí fólie, prášková lepidla apod.

3. Plastická lepidla

Svou podstatou jsou jistým přechodem mezi tuhým a kapalným skupenstvím – tmely, kaučukové patche, některé typy cementů, plasty apod.

[4]

3.1.2 Rozdělení dle chemické struktury

Do předchozí definice tedy spadá široká řada materiálů, které se v běžné praxi používají ke spojování lepením, a proto je nutné je řádně dělit. Dle chemické podstaty jsou lepidla rozdělována jako 1. lepidla s organickou bází, 2. lepidla na bázi silikonů a 3. lepidla na anorganické bázi. [4]

1. Organická lepidla

Polymerní látky s centrálním atomem na bázi uhlíku jsou nazývány právě organická lepidla. Dále se dělí na lepidla přírodní, semisyntetická a syntetická.

Přírodní lepidla

Do této skupiny spadají lepidla tvořená látkami původem z rostlin či živočichů, respektive z jejich produktů, jako jsou např. vejce, mléko, kosti, škrob získaný z mouky apod. Z rostlinných pryskyřičných výpotků (látka klovatin) a škrobu z mouky se například vyrábí arabská guma, denárová pryskyřice a jiné. Dále lze do této kategorie zařadit i latex z přírodního kaučuku, kliš z kostí nebo kůže zvěře, kasein z mléka či například albumin z vajec. [4]

Semisyntetická lepidla

Základem tvorby semisyntetických lepidel je tvorba polymerního řetězce, jehož základ je reprezentován přírodním materiálem. Ten je následně chemicky upraven, a je tak vytvořen lepený spoj o požadovaných vlastnostech. [4]

Nejběžněji tvoří základní strukturu polymerního řetězce báze celulózy. V celulózovém řetězci jsou volné karboxylové skupiny, které jsou následně modifikovány především estery celulózy (nitrocelulóza), dále např. acetát nebo acetobutyrát celulózy, étery celulózy (vodorozpustná metylcelulóza, karboxymethylcelulóza, hydroxymethylcelulóza), popř. i étery celulózy rozpustné v organických rozpouštědlech, např. etylcelulóza. Dále se v praxi často využívá chemicky upravený přírodní kaučuk – cyklokaučuk, chlorkaučuk či hydrochlorkaučuk, modifikovaný škrob – karboxymetylškrob nebo kasein apod. [4]

Syntetická lepidla

Zde je chemickou reakcí z nízkomolekulárních látek (monomolekulárních látek) zformován polymer tvořící syntetické lepidlo. K tvorbě polymeru jsou využívány tyto reakce:

- Polymerační – výsledkem této reakce je makromolekulární polymerizát (PVC, PVAc apod.).
- Polykondenzační – vznikají polykondenzáty, tedy polyamid a polyester.
- Polyadiční – zde se tvoří polyadukty, mezi ně patří polyuretan, epoxidy aj. [4]

2. Silikonová lepidla

Lepidla na bázi silikonů jsou nazývána polymerní látky s centrálním atomem na bázi křemíku. Tyto látky tvoří jistý přechod mezi anorganickými a organickými sloučeninami. Tento atom křemíku s dalšími substituenty nebo koncovými skupinami organického původu tvoří polymerní řetězec. Může také dále obsahovat reaktivní skupiny prvků, které jsou schopné polymerní řetězec prodloužit, nebo dokáží vytvořit prostorovou strukturu polymeru. [4]

3. Anorganická lepidla

Do této skupiny spadají malty, cementy, rozpustné silikáty, vodní sklo apod. Zároveň jsou do této skupiny zahrnuty i taveniny na bázi anorganických kyslíčků a silikátů, které slouží zejména pro spojování skla. [4]

3.1.3 Rozdělení dle počtu složek

Při nanášení lepidla na adherend je rozlišováno, zdali je lepidlo tvořeno jednou složkou, nebo jsou aplikovány dvě či více složek, které jsou míseny. Promícháním těchto látek vícesložkového lepidla při nanášení vzniká chemická reakce, jejímž cílem je vytvoření pevného lepeného spoje. [4]

1. Jednosložková lepidla

Dále jsou jednosložková lepidla rozdělována podle počtu komponent ve směsi:

Jednokomponentní lepidla

Do této kategorie patří lepidla na bázi taveniny nebo fólie z termoplastických polymerů a lepidla na bázi reaktivních monomerů nebo prepolymerů, kde je působením vlhkosti dosaženo vytvrzení lepidla. Právě účinkem vlhkosti je v látkách zapříčiněna síťovací reakce. [4]

Vícekomponentní lepidla

Do skupiny vícekomponentních jsou řazena:

- Anaerobní lepidla na bázi monomerů a peroxidu.

Inaktivní v přítomnosti kyslíku, při zabrání přístupu kyslíku dochází k polymerační reakci (zejména v přítomnosti iontů kovů).

- Lepidla vytvrzována UV zářením obsahující monomery nebo prepolymeru a fotoaktivátory.

Fotoaktivátory vyvolají polymerační nebo síťující reakci při jisté intenzitě a vlnové délce záření rozštěpením na radikály.

- Lepidla vyžadující zvýšenou teplotu pro aktivaci polymerační nebo síťující reakce.

Za normální pokojové teploty stabilní, reakce je vyvolána zvýšením teploty. Doba vytvrzování je přímo závislá na teplotě – vyšší teplota znamená kratší dobu vytvrzování. Minimální teplota pro aktivaci tvrdidla a polymerace musí být uvedena výrobcem. Příklady: směs epoxidové pryskyřice s ftalanhydriem, lepidla s maskovanými izokyanátovými skupinami apod.

[4]

2. Vícesložková lepidla

Po homogenizaci složek vícesložkového lepidla dochází k chemické reakci. Doba od smíchání po vytvrzení směsi se nazývá „doba zpracovatelnosti“, tedy doba potřebná k vytvoření pevného lepeného spoje. Tato doba se pro jednotlivá lepidla liší a jejich použití závisí na specifických požadavcích při jejich aplikaci. Příliš krátká, respektive příliš dlouhá doba zpracovatelnosti je pro běžnou praxi nevhodná, proto se většinou hledá určitý kompromis. U mnoha dvousložkových systémů je možné tuto dobu zkrátit působením tepla. V praxi se využívají dvě metody tepelného působení na lepený spoj – předehřát lepené adhérendy nebo vystavit zvýšené teplotě celý spoj až po nanesení lepidla. Doba zpracovatelnosti některých speciálních dvousložkových lepidel je možné urychlit UV nebo světelným zářením. [4]

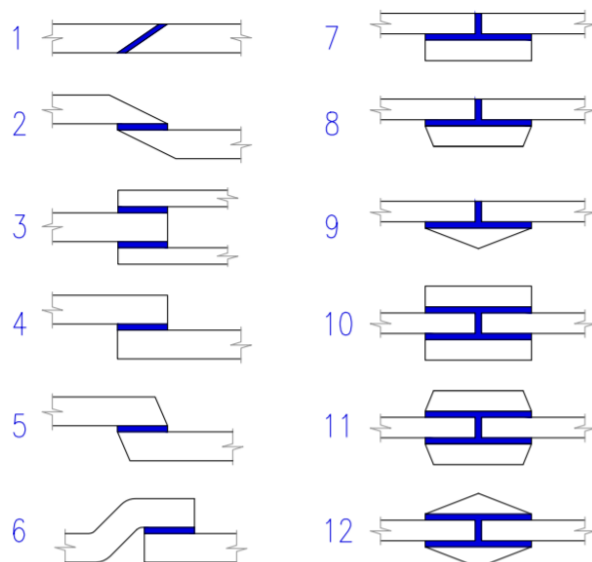
3.2 Výhody a nevýhody lepeného spoje

Lepení je v praxi využíváno ke spojování různých dílů a různých materiálů stále více především díky jeho jedinečným výhodám. Oproti jiným metodám tvorby nerozebíratelného spoje, jako je např. svařování, nýtování, pájení, nebo dokonce šití, má řadu výhod, jako např.: základní materiál není deformovaný, na lepený materiál nepůsobí při tvorbě spoje teplo, lepení má velmi dobrou dynamickou pevnost spoje (schopnost částečného tlumení chvění) a také zde vzniká možnost kombinovat různé materiály ke spojení, kombinovat lepení s dalšími metodami spojování (podlepotat odporově svařované plechy apod.) či lepit velmi tenké fólie nebo lepení velkých ploch. Hlavní výhodou je také rovnoměrné rozložení sil v lepeném spoji. Lepidlo po vytvrzení zároveň tvoří tzv. difúzní bariéru a může lepený spoj chránit před prachem, vodou, chemikáliemi, světlem, větrem, teplem apod. Doplňkové funkce spoje jsou například elektrická vodivost, tepelná vodivost, zvuková izolace, optické vlastnosti, jako je průhlednost nebo určitá barva lepidla. Lepený spoj je chráněn před účinky koroze. [4] [1]

Mezi nevýhody je možné řadit částečně malou počáteční pevnost před vytvrnutím lepidla, omezenou tvarovou stálost při tepelném namáhání lepeného spoje, náchylnost k plastickému tečení při statické zátěži a nákladné destruktivní zkoušky při zkoumání pevnosti spoje. Lepený materiál musí být před aplikací lepení řádně opracován, což může být pro různé aplikace pracné a představuje významnou časovou ztrátu. Směrnici pro přípravu kovů a plastů před lepením konstrukčními lepidly uvádí norma EN 13887. Často jsou také potřeba specifická upínací zařízení k fixaci a vytvrzení po nanesení lepidla. [4] [1] [7]

3.3 Konstrukce lepených spojů

Volba konstrukce lepeného spoje (Obrázek 4) závisí zejména na typu použití a způsobu namáhání spoje. Příkladem namáhání lepeného spoje je např. namáhání tahovou silou, namáhání smykem, tlakové zatížení, namáhání loupáním, popř. štěpením a mnoho dalších, včetně jejich kombinací, přičemž strukturní pevnost lepeného spoje je nejvíce ohrožena právě při odlupování. Lepený spoj je zpravidla konstruován tak, aby k odlupování docházet nemohlo. [8]



Obrázek 4 - Základní konstrukční možnosti plochých lepených spojů, [9], vlastní zpracování

1 – tupý spoj, zkosený; 2 – jednoduše přeplátovaný spoj, výrazně zkosený; 3 – dvojitě přeplátovaný spoj; 4 – jednoduše přeplátovaný spoj; 5 – jednoduše přeplátovaný spoj, zkosený; 6 – lemový spoj; 7 – čelní spoj s jednou příložkou; 8 a 9 – čelní spoje, různé tvary příložky; 10 – čelní spoj s dvěma příložkami; 11 a 12 – čelní spoje s dvěma příložkami, různé tvary

V experimentální části této diplomové práce jsou vzorky lepeny dle schématu č. 4 předchozího obrázku, s délkou přeplátování 12,5 mm definovanou normou ČSN EN 1465.

3.4 Úprava povrchu adherendu

Pro vytvoření lepeného spoje s ideálními pevnostními vlastnostmi je nutno splnit řadu přípravných procesů. Bez úpravy povrchu lepených ploch může být povrch materiálu kontaminován prachem, olejem, atmosférickými plynnými složkami apod. V praxi není nikdy možné očistit adherend zcela dokonale, je ale nutné se tomuto stavu co nejvíce přiblížit. Nečistoty materiálu nejen že snižují plošnou využitelnost lepeného povrchu pomocí adherentních sil, ale právě prachové částice, oleje, emulgátory apod. snižují kohezní vlastnosti lepidla, a to se může odlupovat. Na povrch materiálu nepříznivě působí i atmosférické vlastnosti, které mohou jejich působením vytvořit jinou chemickou nebo fyzikálně-chemickou strukturu, než má samotný materiál (nejběžnějším jevem je oxidace). Tento jev je typický právě pro kovy. [4]

3.4.1 Fyzikální procesy

Fyzikálním procesem úpravy povrchu adherendu se rozumí jeho mechanické opracování. Nejběžněji využívanými postupy jsou omývání a zdrsňování povrchu lepeného materiálu.

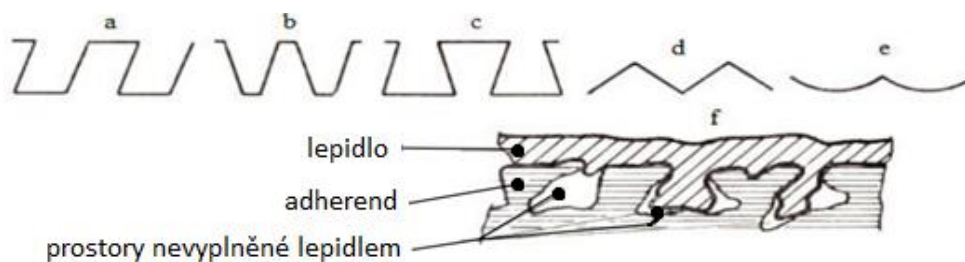
Omytí povrchu

Nejčastější a nejběžněji používanou formou úpravy povrchu je omytí základního materiálu. To zbaví povrch mechanických nečistot jako prach, oleje a většinu absorbovaných plynů a par. Běžně se k omytí používají organická rozpouštědla. Omytí může následovat i po dalších procesech, jako je různé zdrsňování povrchu – cílem je zejména odstranění prachu a jiných mechanických částic vzniklých opracováním materiálu. [4]

Zvýšení drsnosti povrchu

Jedná se především o procesy jako hrubé broušení, pískování apod. To odstraní z materiálu nevhodné povrchové vrstvy, ale svou podstatou i zdrsňuje jinak hladký povrch adherendu, a zlepšuje tak vlastnosti lepeného spoje. Zdrsněním je docíleno zvětšení lepené plochy dvou adherendů. Výrazné zdrsnění však nemusí být zpravidla jasnou výhodou zvyšující pevnost lepeného spoje – mohou v soustavě zůstat částice vzduchu, a ty jsou následně centrem, ze kterého se tvoří trhliny při mechanickém namáhání spoje. [4]

Přílišným zdrsněním povrchu lepené plochy mohou vzniknout ve spoji nevyplněné prostory (Obrázek 5-f). Tento jev vzniká kombinací přílišného zdrsnění povrchu a nedostatečnou smáčivostí lepidla. Tvar nerovností podporuje mechanické vlastnosti lepené soustavy v případě, že se v ní částice vzduchu nevyskytují, proto je vhodné dosáhnout ideálního mikropovrchu – Obrázek 5-d a 5-e. [2]



Obrázek 5 - Druhy nerovností povrchu adherendu, [10]

Nejběžnějším opracováním povrchu materiálů je právě otryskávání. Jedná se otryskání jemných abrazivních částic (křemičitý písek, ocelový či litinový granulát, korund, sekaný ocelový drát apod.) na základní materiál do doby, než se jeví jako homogenní na celé ploše. [10]

3.4.2 Chemické procesy

Chemické, respektive fyzikálně-chemické úpravy lepených povrchů mají za cíl zvýšit povrchovou energii lepeného materiálu. O čistě chemickém zpracování lze hovořit pouze při leptání povrchu kovu kyselinami, které odstraní povrchovou vrstvu, a odhalí tak povrch čistého kovu.

Odmaštění

Při odmašťování je povrch adharendu ošetřen kapalinou, zejména se v praxi jedná o technický aceton, ethylalkohol, metyletylketon, toluen nebo trichlórethylén, která má funkci rozpouštědla a zbavuje povrch olejů, tuků a podobných nečistot. Běžně je povrch ocelových polotovarů (plechy, tyče, profily) zanesen oleji používanými ve výrobě. Nejčastěji tato operace následuje po mechanickém opracování povrchu a zbavení hrubých nečistot. [10]

Moření

Mořením je docíleno zbavení povrchu nečistot vzniklých oxidací (okuje, rez, oxidové vrstvy vzniklé okolní atmosférou nebo mechanickým, tepelným nebo chemickým opracováním). Moření se provádí v lázních s kyselými nebo silně zásaditými chemikáliemi, jako jsou roztoky kyselin (sírová, chlorovodíková, fluorovodíková, fosforečná, dusičná apod.) a roztoky alkálií (hydroxidy). Nejčastěji mořeným materiálem je zejména kov. Plasty a jiné materiály se takto opracovávají velmi výjimečně. Moření je řazeno mezi ekonomicky náročné povrchové úpravy. [10]

Nátěr primery

Primery jsou látky, které při nátěru lepených povrchů zvyšují adhezi. Na povrchu následně zůstávají jen aktivní látky podporující pevnost spoje. Primery se nanášejí nástřikem nebo štětcem na zcela čistý opracovaný povrch materiálu. [11]

Fosfátování

Fosfátování je často využívanou technologií chemické úpravy povrchu oceli. Podstatou je vytvoření vrstvy na povrchu materiálu, která vytváří krystalické terciární fosforečnany zinku, manganu, železa nebo vápníku. Tyto povrchové vrstvy chrání základní materiál proti korozi. [12]

3.5 Tuhá fáze lepeného spoje

Tuhou fází je označován stav, kdy přejde lepidlo z kapalného či jiného skupenství na tuhé, a vytvoří tak spojení s určitými pevnostními vlastnostmi. Tuhá fáze lepidla může vzniknout třemi následujícími způsoby:

1. Ztuhnutí reverzibilní tepelnou změnou

Tento způsob tuhnutí je charakteristický pro lepidla nanášená ve formě taveniny, kde vzniká tuhá fáze poklesem teploty pod bod měknutí polymeru. Při lepení termoplastickými fóliemi je nutné ji nejprve účinkem teploty či vysoké frekvence převést do plastického stavu. Následně je chladnutím dosaženo tuhé fáze.

2. Odpaření nosného média

Probíhá u lepidel na bázi roztoku vysokomolekulární látky, kde je tuhá fáze vytvořena odpařením rozpouštědel. Jedná se o rozpouštědla jak na lepené ploše adherendu, i rozpouštědla difundovaná v adherendu. Jako rozpouštědla se používají zpravidla kapaliny tvořící filmotvornou složku aktivující povrch adherendu, a způsobující tak difúzí lepší pevnost spoje. Nevýhodou tohoto procesu je časová náročnost, tedy doba potřebná k odpaření rozpouštědla.

Pouze malou skupinu lepidel tvoří disperzní lepidla, kde vysokomolekulární látka s nosným médiem netvoří homogenní soustavu, ale je rozptýlena v kapalině v podobě částic. Zde dochází při tuhnutí k odpaření nosného média, které je tvořeno zpravidla vodou (vodné disperze) nebo v některých případech i organickým rozpouštědlem. V praxi se tyto látky používají jen zřídka, například v situaci, kdy je zapotřebí vytvořit za normální teploty homogenní film z polymeru s vysokým bodem tání (disperze polystyrenu, nebo ABS kopolymeru v acetonu).

3. Chemická reakce

Vytvoření tuhé fáze pomocí chemické reakce se v praxi využívá v případech:

- Použití lepidel na bázi kapalných nebo pastovitých monomerů, prepolymerů, nebo jejich reaktivních směsí.
- Použití disperzních nebo roztokových adheziv, kdy není lepicí vrstva schopna bez následné chemické reakce zajistit potřebnou pevnost spoje. Příkladem může být zvýšení pevnosti PUR lepidla jeho zesíťováním pomocí triizokyanátu při lepení dopravních pásů.
- Použití tavných lepidel, kdy síťující složka chemicky reaguje až při dosažení určité teploty.
- Použití lepicích fólií na bázi kaučuku, kdy je nutné polymer vulkanizovat pro dosažení potřebné tuhosti a pevnosti lepidla.

[4]

3.6 Degradční vlivy

Degradčními vlivy se rozumí procesy působící na materiál, lepidlo nebo na celý lepený spoj a způsobující fyzikální, mechanické vlastnosti, popř. vzhledové změny. Degradace probíhá zpravidla trvale a postupně působením vnějších vlivů, jako je vlhkost, teplota, přímý kontakt s vodou, chemicky reaktivní prostředí, popř. kombinace předchozích. Tyto jevy ohrožují bezpečnost a spolehlivost lepených spojů, kde v krajních případech dochází k deformaci. Vznik a působení jednotlivých nepříznivých vlivů je detailně popsáno v dalších kapitolách. [13], [14]

3.6.1 Degradace adheziva před lepením

Lepidla mohou před samotným použitím podléhat řadě negativně působících procesů. Ty mohou vzniknout nesprávnou manipulací, přepravou nebo skladováním a jedná se především o vystavení lepidla jiné teplotě, než udává výrobce. Optimální teplota pro skladování epoxidových lepidel bývá mezi 5 až 25 °C a výrobce zpravidla doporučuje skladovat adheziva v temných prostorech, bez přímého působení slunečního záření. [2]

3.6.2 Degradace působením teploty

Jednou z nejzásadnějších nevýhod lepených spojů je stálost vlastností při vystavení extrémním tepelným podmínkám a jejich spolehlivost je dána odolností proti působení vlivu teploty. Každý typ adhérendu má určitou tepelnou odolnost (zpravidla popsanou výrobcem). Tato odolnost je dána složením lepidla a představuje jistou hranici mezi stálostí a teplotní degradací lepeného spoje, při jejím překročení spoj ztrácí své původní vlastnosti. Může se jednat o změnu struktury spoje, tepelný rozklad, termooxidační destrukci, nebo může dojít ke změně koeficientů tepelné roztažnosti adhérendu a adheziva. Výsledkem tepelné degradace bývá změna pevnosti nebo deformace, popř. destrukce lepené soustavy. [14], [15]

Stárnutí stálým působením tepla

Tepelné stárnutí je proces, při kterém je těleso dlouhodobě vystaveno působení zvýšené teploty v průběhu času. Jedná se tedy o jev, při kterém je narušována tepelná stálost lepeného spoje. Při působení zvýšené teploty se teplo šíří spojem a reakcí s atmosférou, navíc dochází k difundaci vzdušného kyslíku do lepeného spoje a proces tepelného stárnutí je tím urychlován. Dochází tak zpravidla k termooxidační deformaci. Při dlouhodobém působení teploty dochází ke změnám poměru kohezních vůči adhezním silám, a vlastnosti spoje se tak mění. Může tak dojít k náhlému snížení pevnosti, popř. destrukci spoje. Tepelná odolnost lepeného spoje je dána také tepelnou stálostí adheziva při zvýšení či snížení teploty. Tepelnou stálost ovlivňuje chemické složení a struktura lepidla. Pozitivními faktory podmiňujícími dobrou tepelnou stálost je stupeň vytvrzení a rychlost vytvrzování lepidla. Příkladem takového prostředí může být lepení solárních panelů, kde jsou fotovoltaické křemíkové články lepeny k přednímu sklu a zadní desce. U lepidel v podobných oblastech použití je tepelná odolnost podmínkou. [15], [16]

Anderson zkoumal tepelnou degradaci dvou epoxidových lepidel při 195–250 °C a výsledky ukázaly, že pevnost a hmotnost lepidel klesá s rostoucí teplotou a dobou působení, což poukazuje na štěpení chemických vazeb v lepidle při vystavení extrémní teplotě. [17]

Studie kterou publikuje Schneider a kol. za cílem zjistit vliv stálého působení teploty na únavovou pevnost spoje lepeného komerčním jednosložkovým, zatepla vytvrzovaným, epoxidovým lepidlem. Výsledky prokázali zpomalení poškození při teplotě –10 °C, a naopak zrychlení poškození při teplotě +50 °C, v porovnání se vzorkem o teplotě 23 °C. Ani jedna z variant neměla vliv na typ porušení spoje. [18]

Degradace způsobená tepelným rázem

Odolnost adheziva vůči tepelnému rázu je jeho schopnost zachování vlastností lepeného spoje při náhlé změně teploty. Čím rychlejší tepelný ráz je, tím méně je lepidlo schopné relaxovat tepelné napětí a může docházet ke změnám vlastností. Cyklickým opakováním tepelných rázů vzniká ve spoji napětí, které může být přirovnáno k opakovanému statickému či dynamickému namáhání. Tím se zvyšuje únava spoje a snižuje pevnost zpravidla úměrně k počtu cyklů. V praxi k tomuto jevu dochází např. u dopravních prostředků, letadel apod. a jsou vůči němu více náchylné lepené spoje, kde jsou spojovány různé materiály. [15]

Qin, Na, Mu a Tan zkoumali vliv cyklických změn teploty na degradaci lepených spojů epoxidovými lepidly. Teplota se v průběhu experimentu cyklicky měnila od –40 do +80 °C. Pevnost lepených spojů poklesla o více než 40 % při působení cyklických změn teploty po dobu 30 dnů. [19]

Schneider a kol. ve svém experimentu porovnávali vliv stále teploty a teplotních výkyvů na únavovou pevnost spoje lepeného komerčním jednosložkovým, zatepla vytvrzovaným, epoxidovým lepidlem. Studie prokázala vysoké zrychlení poškození lepidla se zvýšeným úměrným počtem teplotních změn v porovnání se stálým zatížením teplem. Amplituda teplotních změn se v experimentu pohybovala od –10 do +50 °C. [18]

3.6.3 Degradace působením vlhkosti

Působením vody, jejích par, popř. vzdušné vlhkosti lepené spoje degradují a jejich pevnost se časem snižuje. Snižování je způsobeno pronikáním vody nebo vlhkosti do spoje skrz lepicí vrstvu a může rozrušovat vazby ve spoji. Některé druhy lepidel jsou proti působení vodních vlivů částečně odolné. Degradaci lepidel může umocňovat vliv slané vody, například u námořních aplikací lepidel. [20], [21]

V lepeném spoji může působením vlhkosti docházet k rozpouštění nebo plastifikaci adheziva, hydrolýze, nabobtnávání a následně k vysychání. Všechny tyto vlivy mají fyzikální, nikoliv chemický charakter a dochází zde k napětí s následnou relaxací ve spoji. To působí jako dlouhodobé zatížení, a je tím způsobena únava lepeného spoje. Proměnlivým navlhčováním

a vysycháním v atmosférických podmínkách dochází opět k cyklickému namáhání, které je umocňováno kumulováním zbytkového napětí, které po každém cyklu ve spoji zůstává. Přestože plastifikace a bobtnání lepidel jsou částečně vratné procesy, další procesy jako tvorba mikrotrhlin a hydrolýza způsobují trvalé poškození lepidla. [15], [22]

Zaeri a Googarchin ve své práci zkoumají vlivy stárnutí působením vody na epoxidová lepidla. Lepené vzorky jsou ponořeny ve vodní lázni při pokojové teplotě po 0, 35, 80 a 270 dnů. Po degradaci vzorků je měřena pevnost ve smyku tahovým namáháním, která odhalila pokles pevnosti až o 59,1 % po 270 dnech stárnutí. Pozorování lomových povrchů adheziv následně odhalilo zvyšující tendenci k poruchám při prodlužování doby expozice vlhkému prostředí. Zároveň bylo zjištěno, že všechny vzorky více tolerovaly delší prodloužení při destruktivní zkoušce než nedegradovaný etalon. [23]

Sander, Meschut, Kroll a Matzenmiller ve svém experimentu také zkoumali degradaci lepených vzorků epoxidovým lepidlem. Zde byl pozorován vliv relativní vlhkosti při různé okolní teplotě, tedy hydro-termální degradační působení. Bylo prokázáno, že nasycení vlhkosti lepených spojů primárně závisí na relativní vlhkosti okolí, zatímco koeficient difúze závisí na teplotě epoxidového lepidla. [24]

Výzkum degradace pevnosti spojů lepených epoxidovým termosetem ve vlhkém prostředí provedli Kropka a kol. Bylo potvrzeno, že na degradaci testovaných adherendů nerezové oceli a hliníku ve vlhkém prostředí měla výrazný vliv příprava povrchu před lepením. Povrchová úprava adherendů sestávala z očištění, otryskání a nátěru spojovacím činidlem primeru. Zjistilo se, že abraze a korozní procesy jsou klíčovými faktory při určování spolehlivosti lepených spojů ve vlhkém prostředí a lepidlo bylo do jisté míry schopné relaxovat přijatou vlhkost po vysušení. [25]

Gude, Prolongo a Urena zkoumali vliv degradace vodou na pevnost lepených spojů. Zajímavým výstupem experimentu je zjištění, že při použití nanoplňiv do epoxidového lepidla (0,5 % hm. nanovláken a 0,25 % hm. nanotrubiček) bylo sníženo množství vody absorbované lepidlem. Epoxidová lepidla s tímto plnivem proto vykazovala nižší snížení pevnosti než lepidla bez příměsi. [26]

3.6.4 Degradace kontaminanty

Kontaminanty se rozumí znečišťující látky a chemicky agresivní prostředí, kterým může být lepený spoj běžně vystaven. Chemicky agresivním prostředím mohou být organická rozpouštědla, organické či anorganické kyseliny, zásady, paliva, oxidační látky, oleje a podobné látky. Kontaminace těmito látkami probíhá totožně jako působením vody nebo vlhkosti. Reakcí je zpravidla koroze adherendu a následné porušení adhezních vazeb. Riziko vzniku povrchové koroze materiálu lze určit elektrickou vodivostí, pH kapalného prostředí, nebo při vzniku galvanického článku působením styku jiných materiálů. [14]

Vznik koroze ve struktuře lepeného spoje zkoumal Weiss a kol. Stárnutí bylo simulováno ponořením oceli lepené polyuretanem do provzdušňovaného elektrolytu bez chloridů při zvýšené teplotě. Byl pozorován silný vliv vodou nasycené polymerní fáze na změnu struktury mezifázového oxidového filmu kovového adherendu. Tento jev se nazývá podkorodování a výsledkem tohoto jevu je částečná nebo úplná ztráta adhezních sil v lepeném spoji. [27]

Dle chemické podstaty lepidel jsou různé druhy schopny odolávat různým reaktivním látkám, například epoxidová lepidla odolávají kyselině solné. Většina termoaktivních lepidel vytvrzovaných za tepla je schopna odolávat dlouhodobému působení dieselových paliv, aromatických rozpouštědel, kerozinu, benzinu, minerálním olejům apod. Chemická odolnost lepidel vytvrzovaných při vyšších teplotách roste se stupněm vytvrzení adheziva. [15]

Za kontaminant působící na pevnost lepidel lze v některých případech určit i radiační prostředí, které se vyskytuje například ve vesmírných misích, jaderných reaktorech (fúzních nebo štěpných) a detektorech částic. Ionizující účinky záření na epoxidová lepidla zkoumali ve své práci Zimmermann, Schalm, Sadeghi a Schroder. Výzkum ukazuje, že u některých druhů lepidel záření štěpí polymerní řetězce, zatímco u jiných se jejich pevnost a tuhost zvýšila. [28]

3.6.5 Působení okolních přírodních vlivů na lepený spoj

Lepidla a celkově lepené spoje stárnou právě tak jako i ostatní materiály, avšak některé přírodní vlivy mohou mít na lepený spoj specifický vliv. Nebezpečným prostředím pro lepený spoj je nejen voda a vlhkost a působení teploty, ale i sluneční záření, kyslík, ozon, ultrafialové záření či mikroorganismy. [3], [20]

Oblasti s nežádoucím působením na lepený spoj

V průmyslových oblastech mohou být agresivními činiteli agresivní plyny jako SO_2 , H_2S souběžně s působením větru nebo v přímořských oblastech obsah soli ve vzdušné vlhkosti. Další reaktivní situací je působení atmosférických vlivů při soustavných změnách ročních období a změnách počasí. Nastává zde opět cyklický charakter změn a ve spoji se kumulují pnutí, které pomalu zapříčiňuje stárnutí a ovlivňuje životnost spoje. V místech se zvýšenou teplotou způsobuje vzdušný kyslík tzv. atmosférické stárnutí, kde je míra oxidace závislá právě na vysoké teplotě a difuzi kyslíku ve spoji. [20]

Atmosférická koroze může ohrozit celistvost lepeného spoje. Ta je způsobena pronikáním difúzního degradačního média do vrstvy lepidla a způsobuje následnou kohezní poruchu, nebo působením na adherend proniká mezi lepený materiál a adhezivo, čímž vzniká tzv. podkorodování a následkem je adhezní porucha spoje. [2]

K nežádoucí degradaci lepidel vlivem stárnutí způsobeným slunečním zářením může docházet například u staveb. Kothe, Wunsch a Wehler zkoumali vliv slunečního záření na

změnu barvy transparentních lepidel, který může být například u lepení bezpečnostního vrstveného skla velmi nežádoucí. Mnoho druhů lepidel tohoto experimentu bylo zcela nevyhovující. Ke změnám zabarvení vlivem UV záření došlo u lepidel epoxidové pryskyřice, naopak lepidlo z polyuretanu obsahovalo světelné stabilizátory a zabraňovalo nežádoucím vlivům záření. Chránit lepidla před vlivem slunečního záření mohou speciální nátěry s nízkou propustností UV záření, fungující jako filtry. Machalická, Vokáč a Eliášová rovněž zkoumali degradaci lepidel budov – silikonové tmely byly vystaveny vlivům neutrální solné mlhy, zvýšené teploty a vlhkosti. K takovému stárnutí může běžně docházet v přímořských oblastech. Sousa, Correia a Cabral-Fonseca se zaměřili na stárnutí polyurethanového lepidla v podobném prostředí (Lisabon, Portugalsko) a byla zjištěna částečná schopnost lepidla částečně relaxovat, ale s rostoucím časem stárnutí byly výsledky degradace nevratné. [29], [30], [31]

3.7 Zkoušky lepených spojů

Zkoušky lepidel a lepených spojů jsou nedílnou součástí technologie lepení, kde je nutné znát mechanické vlastnosti lepidla pro různé druhy namáhání. Zkoušky se dělí na dvě základní skupiny – destruktivní a nedestruktivní. Destruktivní zkoušky lze dále dělit na statické, k nim patří zkoušky pevnosti ve smyku, tahu a tlaku, odlupování, a lámavosti, a dynamické, ke kterým jsou řazeny zkoušky rázové pevnosti a zkoušky na únavu lepených spojů. [14]

3.7.1 Nedestruktivní zkoušky lepených spojů

Nedestruktivní metody analýzy lepeného spoje nejprve sestávaly z hodnocení rovnoměrnosti tloušťky vrstvy lepidla a celistvosti materiálu, až následně se rozvojem této oblasti přidaly například zkoušky založené na principu prozařování (rentgenové, radioaktivní záření), akustické zkoušky (zvukové, ultrazvukové), magnetické a elektrické (elektromagnetické, indukční, kapacitní), tepelné zkoušky apod. Jejich úkolem je zpravidla ohodnotit kvalitu vybraného lepeného spoje nedestruktivní formou. Cílem nedestruktivních zkoušek je odhalit skryté vady spoje. [2], [32]

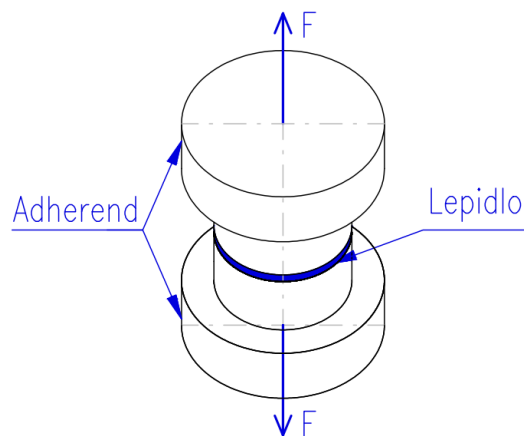
Výstupem nedestruktivních zkoušek není přesná hodnota pevnosti lepeného spoje, což je zásadní nevýhodou, provádějí se však běžně v praxi současně s technologií výroby jako kontrola kvality. [14]

3.7.2 Destruktivní zkoušky pevnosti

Jedná se o zkoušky pevnosti lepených spojů, jejich výsledkem je zjištěna pevnost lepeného spoje přetržením, odlepením nebo jinou deformací spoje. S pevností spoje je pevně spjata i analýza typu porušení a jsou zkoumány rozdíly adhezních a kohezních sil. Hlavní typy porušení lepených spojů včetně jejich zkráceného označení upravuje norma ČSN ISO 10365 a jejich grafické znázornění je uvedeno v Tabulce 2 – kapitola 4.1 Metodika laboratorního experimentu, odrážka j) Typ porušeného spoje. Pro simulování lepeného spoje v konkrétních praktických podmínkách existuje velká řada dalších zkoušek, než je zde uvedeno, například zkoušky rázem, rozvrstvování laminátu štípáním apod. Veškeré zkoušky mohou být také prováděny jak statickým, tak dynamickým zatížením lepeného spoje, kde je počet cyklů udáván v hertzech a je zde tak hovořeno o frekvenci zatěžování. Výstupem zkoušky v tomto případě může být i počet cyklů potřebných k porušení vzorku. [4]

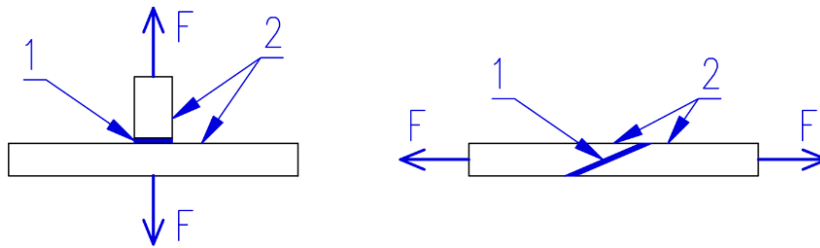
Zkouška tahem

Kovová tělesa jsou lepena dle Obrázku 6 a Obrázku 7, a dochází zde k tahovému pnutí. Pro tuto zkoušku je velmi důležitá příprava povrchu vzorků a přesnost lepení, kdy malá výchylka od rovinnosti povrchů může způsobovat štěpení, a nedocházelo by tak k čistě tahovému efektu. Tato zkouška není v praxi běžná z důvodu jejích značných nevýhod, mezi které patří skutečnost, že takto zatěžované lepené spoje se nevyužívají a v praxi je snaha volit konstrukci lepeného spoje zatěžovaného tahem jinak. Ve spoji vystaveném tahovému zatížení natupo není rozložení napětí jednotné ve srovnání středu a hrany vzorku a dochází k jeho destrukci směrem od hran lepených těles. [1]



Obrázek 6 - Zkouška pevnosti tahem "natupo", [1], vlastní zpracování

Dalšími způsoby provedení čistě tahové zkoušky je tupý spoj na ploše, nebo zkosený spoj:



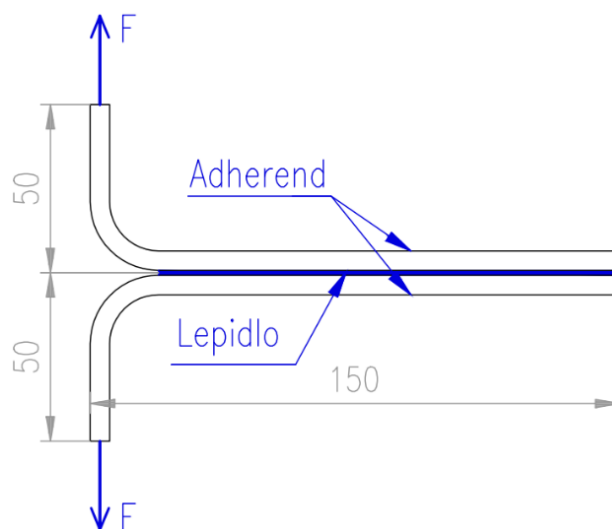
Obrázek 7 - Tupý spoj na ploše (vlevo) a zkosený spoj (vpravo), [4], vlastní zpracování

1 – lepidlo; 2 – adherend

Zkouška odloupením

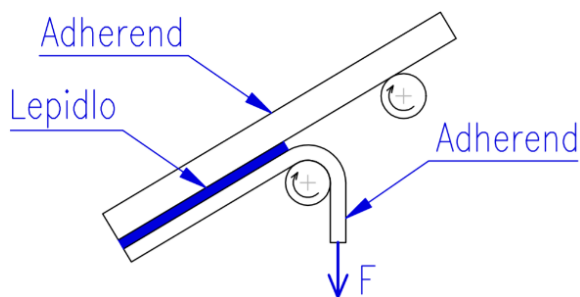
Podstatou této zkoušky je nalezení síly potřebné k odloupení (rozlepení) vzorků směrem od sebe. Zpravidla se jedná o plošně slepované spoje, často z ohebných materiálů, jako jsou usně, fólie apod. [4]

Podstatou T-zkoušky v odloupení jsou dva vzorky ohnuté pod úhlem 90° a jsou lepeny k sobě dle Obrázku 8. Následně je těleso zatěžováno tahovou silou tak, že dochází k odloupení. Zátěžový test se pro T-zkoušku provádí na přístroji pro tahovou zkoušku. T-zkouška odloupení je definována normou ČSN EN ISO 11339-2010. [33]



Obrázek 8 - T – zkouška odloupení, [33], vlastní zpracování

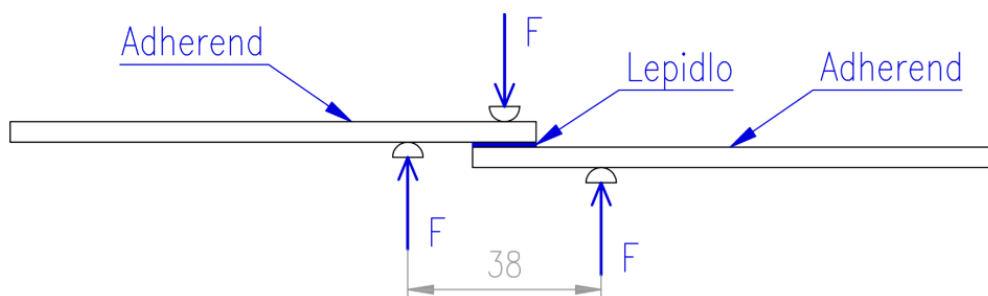
Další variantou zkoušky na odloupení se pro lepené spoje využívá zkouška odloupením pomocí válečků (Obrázek 9), kde je ohebný materiál lepen na pevný. V některých případech lze zkoušky odloupení využít jako výstupní kontrolu hotových výrobků, kdy je spoj zatěžován určitou silou a výrobky, u nichž dojde k poruše, jsou vyřazeny (např. pevnost slepení špic obuvi s podešví). [4]



Obrázek 9 - Zkouška odloupení pomocí válečků, [4], vlastní zpracování

Zkouška lámavosti

Tato zkouška je upravena normou ČSN 66 8511 a jedná se o namáhání lepeného zkušební tělesa ohybem. Vzorek je zatěžován dle Obrázku 10 po takovou dobu, dokud nedojde k porušení spoje, přičemž síla při přetržení tělesa je označována „lámavost“. Překlátování lepeného spoje ($12,5 \pm 0,5$) mm je definováno normou. [34]



Obrázek 10 - Zkouška lámavosti, [34], vlastní zpracování

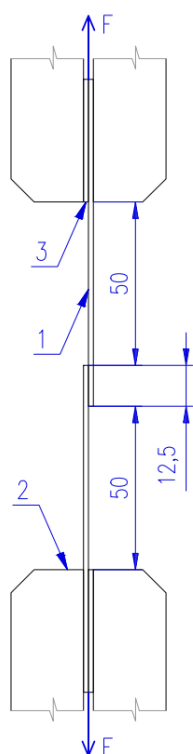
Zkouška pevnosti ve smyku tahovým namáháním

Dle ČSN EN 1465 je dán postup a metodika stanovení pevnosti ve smyku při tahovém namáhání přeplátovaných lepených soustav. Podstatou této zkoušky je stanovení pevnosti ve smyku namáháním normalizovaného přeplátovaného lepeného spoje mezi tuhými adherendy, na které je působeno tahovou silou. Tato síla působí rovnoběžně s plochou lepeného spoje a hlavní osou zkušební vzorku (viz Obrázek 11). Výsledkem této zkoušky jsou hodnoty pevnosti lepeného spoje, a to pevnost v mezi kluzu a pevnost při přetržení zkušební tělesa. Pro tuto zkoušku pevnosti se používají jednoduše nebo dvojitě přeplátované vzorky plechů. [4], [35]

Počet vzorků by (dle normy ČSN EN 1465 o měření pevnosti lepených vzorků ve smyku) neměl klesnout pod 5 z důvodu požadované přesnosti výsledků měření. Proto byl stanoven počet trhaných vzorků v každém týdnu na 6. V tom samém týdnu je s těmito vzorky vyjmut z teplotní komory i 1 vzorek, který bude sloužit pro zkoumání mikroskopem. [35]

Zkušební těleso je symetricky umístěno do čelistí přístroje. Nutné je, aby byla zachována vzdálenost (50 ± 1) mm od každé čelisti k bližšímu konci přeplátované plochy.

Použitím vyrovnávacích podložek je dosaženo působení síly v rovině lepeného spoje. Stroj je po upnutí zkušebního tělesa uveden do chodu tak, aby se napětí nebo deformace ve zkušebním spoji zvyšovaly lineárně. Tato rychlost se volí tak, aby k přerušení spoje došlo za (65 ± 20) s. Zaznamenávána je nejvyšší síla v průběhu trhání – síla na mezi pevnosti a síla při dosažení úplného přerušení lepené soustavy. Výsledky experimentu, u kterých dojde k porušení adherendu, jsou vyloučeny a výsledné hodnoty se zaznamenají pro interpretaci výsledků měření. [35]

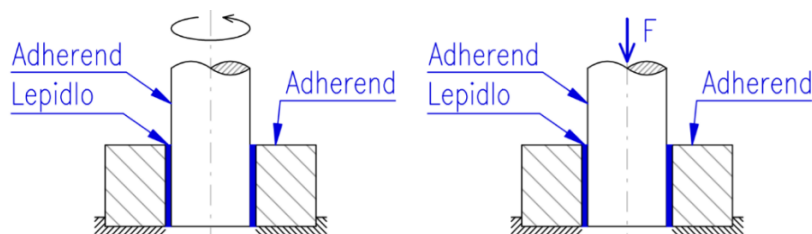


- 1 – Zkušební těleso
- 2 – Čelisti stroje
- 3 – Vyrovnávací podložka

Obrázek 11 - Upnutí zkušebního tělesa v čelistech měřícího zařízení, [zdroj autor]

Zkouška pevnosti ve smyku v krutu a tlaku

Další variace zkoušek pevnosti ve smykovém namáhání jsou znázorněny na Obrázku 12, kde je konstrukce lepených spojů zcela rozdílná od zkoušky pevnosti ve smyku zmíněné dříve. Tyto zkoušky jsou vhodné u lepidel pro fixaci šroubů, hřídelí apod. Většinou se jedná o použití anaerobních lepidel, kyanoakrylátů, případně dalších typů lepidel. [4]



Obrázek 12 - Pevnost ve smyku při namáhání krutem (vlevo) a pevnost ve smyku při namáhání tlakem (vpravo), [4], vlastní zpracování

3.8 Použití lepidel v praxi

Lepení je díky mnoha svým výhodám uplatňováno v praxi stále více, i přes vysokou technologickou náročnost, na niž jsou kladeny vysoké nároky. Hlavní výhodou technologie lepení oproti svařování je nutnost spojování dvou různých materiálů. Moderní prostředí automobilového či leteckého průmyslu využívá stále více plastů, které by se jinak musely s plechovými částmi spojovat nýtováním, popř. šroubovým spojem. Oproti jiným metodám spojování součástí je pro praxi z vlastností lepení nejdůležitější těsnost spojů, izolace proti korozivním vlivům, tlumení menších vibrací apod. Největší nevýhodou je technologická náročnost při přípravě a při samotném lepení. Dalšími významnými oblastmi, kde je lepení na konstantním vzestupu, jsou vesmírná a vojenská technika.

3.8.1 Automobilový průmysl

Pro lepení karosérie automobilu se nejvíce využívají kaučuková nebo epoxidová lepidla. Kaučuková lepidla nacházejí uplatnění zejména mezi povrchy plechů a výztuh vozu (kapota, střecha), zde má kaučukové lepidlo funkci nejen spojovací, ale hlavně i tlumicí a antivibrační. Kaučukové lepidlo je aplikováno i na místech automobilů s vysokou náchylností ke korozi – řezové hrany plechů apod. Lepidla na bázi epoxidových pryskyřic se uplatňují zejména v oblastech, jako je lemový spoj panelových dílů (dveří, kapoty a pátých dveří), nebo u podlahových částí karosérie, viz žlutě zvýrazněné oblasti na Obrázku 13. [36]



Obrázek 13 - Možnosti aplikace lepení v konstrukci karoserie osobního vozidla, [36]

U automobilů je lepení neustále častěji upřednostňováno před ostatními technologiemi spojování materiálů. Důkazem je následující tabulka vycházející z interních podkladů společnosti Škoda auto, a. s., která porovnává použité technologie spojování materiálů na celém voze Škoda Fabia II. generace, oproti III. generaci. Jak je z dat zřejmé, využití technologie lepení převažuje nad ostatními technologiemi svařování a pájení již u vozu Fabia II. generace. Největší rozdíl mezi dvěma vozy je stále rostoucí využití lepení, na úkor běžného tavného svařování. [36]

Generační rozdíly v aplikaci jednotlivých svařovacích technologií a lepení.			
Technologie	Fabia II	Fabia III	Rozdíl
Bodové odporové svařování [ks]	3 820	3 884	+ 64
Tavné svařování MAG [mm]	3 050	1 658	- 1 392
Pájení MIG [mm]	1 115	903	- 212
Laserové pájení a svařování [mm]	4 398	4 425	+ 27
Lepení [mm]	27 657	35 399	+ 7 742

Tabulka 1 - Generační rozdíly Fabia II a Fabia III v technologii svařování a lepení, [36]

Jeden z hlavních konstrukčních přístupů používaných k vytvoření konkurenceschopnějšího produktu se opírá o strukturální snížení hmotnosti. Obecně platí, že lehčí konstrukce speciálně v automobilovém průmyslu bude mít nižší spotřebu paliva, protože k jejímu pohybu je potřeba méně energie. Stejný princip platí pro elektrická vozidla – baterie je velmi těžká a jakékoli snížení hmotnosti povede ke zlepšení dojezdu. Vzhledem k tomu, že tato témata mají velký dopad na prodejnost vozidla, je investice do strukturálního snížení hmotnosti opodstatněná. [37]

Pro názornost použití lepidel v automobilovém průmyslu jsou v následující tabulce uvedeny příklady různých lepidel určených pro různé konstrukční díly automobilu. Zároveň jsou ke každému příkladu přiřazeny požadované vlastnosti lepeného spoje v závislosti na jeho použití. [38]

Příklad	Konstrukce lepeného spoje	Požadované vlastnosti lepeného spoje	Používaná lepidla
kapota	drážkové přírubové lepení	tuhost, pevnost, chování při nárazu, ochrana před korozi	epoxidové pryskyřice
kapota, dveře	výztuhové lepení	neohebnost torze, nesmí se deformovat pohledový díl	polyuretany, PVC, syntetické kaučuky
profily, sloupky, přírubové švy	lepení nosné struktury	tuhost, pevnost, chování při nárazu	epoxidové pryskyřice
hrdlo nádrže, utěsnění švu	těsné lepení	odolnost proti korozi, těsnost	PVC, syntetické kaučuky
přední, zadní a pevné boční tabule	přímé zasklívání	tuhost karosérie, těsnost a nepropustnost spoje	polyuretany

Tabulka 2 - Lepené spoje karosérie automobilu, [38]

3.8.2 Letectví a kosmická technika

Hlavní výhodou lepidel oproti jiným druhům tvorby nerozebíratelného spoje je hmotnost. Ta je v leteckém průmyslu, a zejména pak v kosmické technice, velmi důležitou veličinou nejen z důvodu technologie, ale ovlivňuje i provozní náklady i ekonomičnost provozu. Letečtí konstruktéři tak často volí tenkostěnné lepené konstrukce, které však musí mít z důvodu bezpečnosti znamenité únavové vlastnosti. [2]

Letectví a vesmírná technologie má vysoké nároky a v praxi se používají zejména tzv. sendvičové konstrukce. Jedná se o vrstvené konstrukce tvořené potahovými plechy a výplňovým materiálem, které jsou spojovány právě lepením. Svařování, pájení ani nýtování se v tomto případě neosvědčilo. Příkladem může být sendvičová konstrukce s výplní ve tvaru buněk – tzv. voštiny. Tato konstrukce má hned několik praktických výhod, zejména dobrou tepelnou izolaci, poměrně dobrou izolaci hluku a životnost konstrukce. Voštinové sendvičové konstrukce jsou u letadel využívány v panelech křídel, trupu, odtokových hranách, klapky, křídélka, kormidla, podlahy, dveře, výplně rotorů apod. Lepené spoje v konstrukci letadel nachází uplatnění v panelech trupu, konstrukci trupu, panelech křídel, konstrukci křídel, plochy kormidel, dveří a krytů, zesílení okrajů otvorů, lepení podlah, těsnění styčných ploch apod. [2]

Konstrukce raketoplánů běžně vyžaduje spojování různých materiálů a často i extrémně tenkých materiálů, které nejsou ani klasickými způsoby spojování proveditelné. Za hlavní výhody lepení v kosmické technice tak lze považovat minimální hmotnost, možnost spojování různých materiálů, ale částečně i tlumení vibrací, tepelnou a hlukovou izolaci apod. Příklady v použití technologie lepení u raketoplánu jsou: hnací jednotky (raketové motory, turbíny a jejich prodloužení, kryty, izolace), primární nosné konstrukce, rámy, vzpěry, kuželové válcové konstrukce, připojovací prvky, chladicí desky pro udržení teploty elektronické části, antény, sluneční panely a tepelné štíty nebo montáž elektrického a elektronického vybavení. [2]

3.8.3 Stavební průmysl

Dlouholetou tradici má technologie lepení právě ve stavebnictví, zde se odjakživa spojovaly různé adhérendy – dřevo, železo, plast, sklo, kamenivo apod. Hlavními příklady lepení ve stavebním průmyslu je spojování různých profilů, lepení rámců oken, patek, dřevotřískové či voštinové desky, spojování trubek jak plastových, tak kovových, lepení dlaždic a obkládaček, dále stavby lávek a mostů pomocí epoxidové malty a mnoho dalších. [2]

4 Metodika laboratorního experimentu

Obsah zkoušky pevnosti ve smyku přeplátovaných lepených vzorků ovlivněných procesem stárnutí, předepisuje norma ČSN EN 1465 odrážkami a) až l):

a) Odkaz na normy předepisující podmínky laboratorních zkoušek

Zkoušky pevnosti ve smyku přeplátovaných lepených plechů po jejich degradaci se řídí následujícími normami: ČSN EN 1465 – Stanovení pevnosti ve smyku při tahovém namáhání přeplátovaných lepených soustav, ČSN ISO 10365 – Lepidla – označení hlavních typů porušení lepeného spoje, ČSN EN ISO 91 42 – Lepidla – Směrnice k výběru laboratorních podmínek stárnutí pro hodnocení lepených spojů.

b) Identifikace testovaných lepidel, včetně typu, zdroje, označení výrobce apod.

Pro experimentální část diplomové práce byly zvoleny tři druhy epoxidových lepidel do české firmy HORTEX, s. r. o., sídlící v Hradci Králové. Epoxidové lepidlo bylo zvoleno z důvodu značného využití ve strojírenské praxi. První lepidlo má název Epoxy adhesive – Transparent, další jsou kompozitní epoxidová lepidla Epoxy adhesive – metal (lepidlo s příměsí oceli) a Epoxy adhesive – aluminium (s příměsí hliníku). Lepidla se od sebe svými technickými parametry výrazně neliší, všechna lepidla trvale odolávají vodě, slané vodě, saponátům, oleji, naftě, benzínu, zředěným minerálními kyselinám (chlorovodíková 10 %, dusičná 10 %, sírová 30 %) a alkalickým roztokům (hydroxid sodný 40 %, amoniak 10 %), neodolávají organickým kyselinám (octová 5 %, mléčná 10 %) a jsou narušitelné organickými rozpouštědly (ethanol, xylén, aceton). Lepidla jsou vhodná pro použití při teplotě kolem 20 °C (± 10 °C) a všechna lepidla dosahují plného vytvrzení po 24 hodinách. [39]

Lepidlo „T“:

Transparentní dvousložkové epoxidové lepidlo, bezbarvé až lehce nažloutlé barvy, rychle vytvrzující (doba zpracování 2 až 4 min), široké spektrum využití – kov, dřevo, sklo a keramika, plasty a papír. Dle technického listu (Příloha č. 1 – Technická a všeobecná data lepidel Hortex) je však nejvhodnější pro lepení betonu, pórobetonu, mramoru, žuly, umělých kamenů a cihel. Výrobce uvádí pevnost lepeného spoje 18 MPa při lepení oceli a teplotní odolnost lepidla (–50 až + 80 °C). Technický list s dalšími informacemi o produktu viz Příloha č. 2 – Technický list, Epoxidové lepidlo transparentní. [39]

Lepidlo „O“:

Dvousložkové epoxidové lepidlo s příměsí oceli, barva antracitová, rychle vytvrzující (doba zpracování 3 až 6 min), vhodné k lepení skla, keramiky, dřeva, některých tvrdých umělých hmot, kamenů apod. Nejvhodnější použití pro tento druh je dle Přílohy 1 lepení kovů (ocel, hliník, litina, nerez, slitiny lehkých kovů, měď, bronz, mosaz atd.). Teplotní odolnost

udává výrobce (−50 až +80 °C) a pevnost při použití na oceli 20 MPa. Technický list s dalšími informacemi viz Příloha č. 3 – Technický list, epoxidové lepidlo s obsahem oceli. [39]

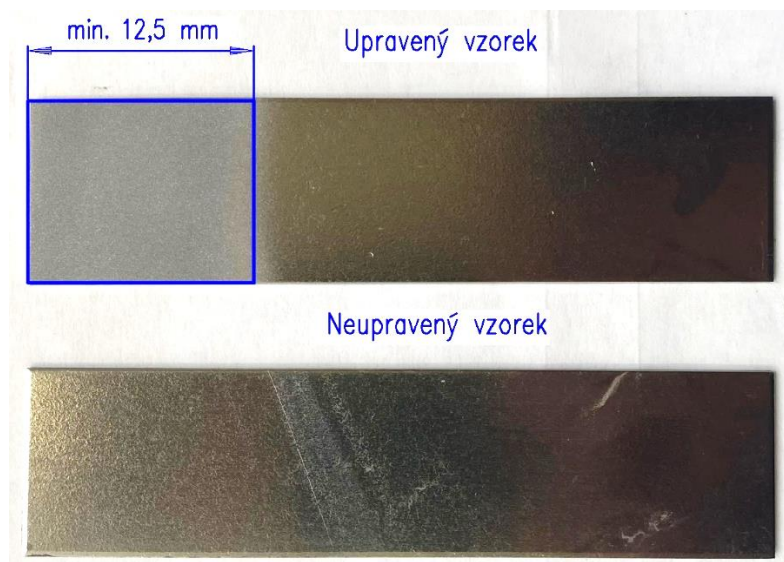
Lepidlo „H“:

Dvousložkové epoxidové lepidlo s obsahem hliníku, světle šedé barvy, rychle vytvrzující (doba zpracování 3 až 4 min), rovněž vhodné k lepení skla, keramiky, dřeva, některých tvrdých umělých hmot, kamenů apod. Nejvhodnější použití je pro lepidlo s obsahem hliníku dle Přílohy 1 lepení kovů (ocel, hliník, litina, nerez, slitiny lehkých kovů, měď, bronz, mosaz atd.). Teplotní odolnost udává výrobce (−50 až +145 °C, krátkodobě +180 °C). Pevnost při lepení oceli 20 MPa. Technický list s dalšími informacemi viz Příloha č. 4 – Technický list, epoxidové lepidlo s obsahem hliníku. [39]

Cyklus stárnutí lepených spojů v klimatické komoře je dle normy ČSN EN ISO 91 42 nastaven na cyklus D4, kde teplota stoupá na 70 °C, následně klesá na −40 °C a takto se do vyjmutí vzorků stále opakuje. Degradanční cyklus proto není v rozporu s technickými daty výrobce a lepidla nepodléhají extrémním vlivům. [40]

- c) Určení adherendů, včetně tloušťky materiálu, šířky vzorku a způsoby úpravy povrchu před lepením

Pro tento experiment byly zvoleny plechy z konstrukční uhlíkové oceli S235J0, o tloušťce 1,5 mm, šířce 25 mm a délce 100 mm.



Obrázek 14 - Povrchová úprava vzorku, [zdroj autor]

Úprava povrchu (Obrázek 14) před samotným lepením vzorků: 1. Mechanické opracování materiálu v tryskací komoře PK – ITB 65 (Obrázek 15), připojena na kompresor Kaeser SM 9 (Obrázek 16) – v místě, kde budou vzorky lepeny, je povrch materiálu zbaven největšího množství nečistot a také dochází k zdrsnění materiálu. Upravená část je označena

na Obrázku 18. Tím je zároveň dosaženo adekvátní adhezní schopnosti lepidel. Zbylou plochu vzorku není nutné opracovávat. 2. Očištění vzorků od zbytků pískového abraziva a dalších nečistot textilií – část vzorku neupravená pískováním v tryskové komoře je touto úpravou zbavena hrubých nečistot. 3. Očištění celého vzorku acetonem – zbaví povrch materiálu zbylých částic nečistot, jako je prach, oleje apod. Vzorky jsou po této operaci připravené k lepení.



Obrázek 15 - Tryskáč komora PK – ITB 65, [zdroj autor]



Obrázek 16 - Kompresor Kaeser SM 9, [zdroj autor]

d) Postup lepení, metoda nánosu lepidla, podmínky vytvrzování lepidla, včetně doby, tlaku a teploty při vytvrzování

Vzorky jsou pro potřeby tohoto experimentu lepeny ručně, s použitím jednoduchého přípravku ke kontrole délky přeplátování. Přípravek je tvořen dvěma linkami narýsovanými na papíru, navzájem rovnoběžnými, se vzdáleností 12,5 mm mezi sebou. Při tvorbě lepeného spoje je tímto vizuálně kontrolováno přeplátování vzorků. Povrchově upravené vzorky jsou lepeny v sérii po 20 kusech, aby nedošlo ke kontaminaci dlouhodobým vystavením atmosférickým vlivům. Smíchání dvou složek lepidla probíhá ručně pomocí míchací tyčinky a na připravené vzorky je vrstva lepidla nanášena rovněž ručně pomocí nanášecích tyčinek.

Následně je přiložen druhý vzorek na stanovenou plochu přeplátování, sestava je ručně stlačena a ihned po stlačení je na vzorek umístěno závaží o předepsané hmotnosti 740 ± 10 g. Toto závaží je na lepené sestavě umístěno po celých 24 hodin vytvrzování. Zkušební vzorky jsou lepeny při standardních laboratorních podmínkách, tedy teplotě přibližně $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ a tlaku 1 atm, v dílenských prostorech Katedry materiálů a strojírenské technologie na České zemědělské univerzitě v Praze a po vytvrzení jednotlivých sérií jsou uschovány v identických podmínkách do dalšího postupu experimentu.

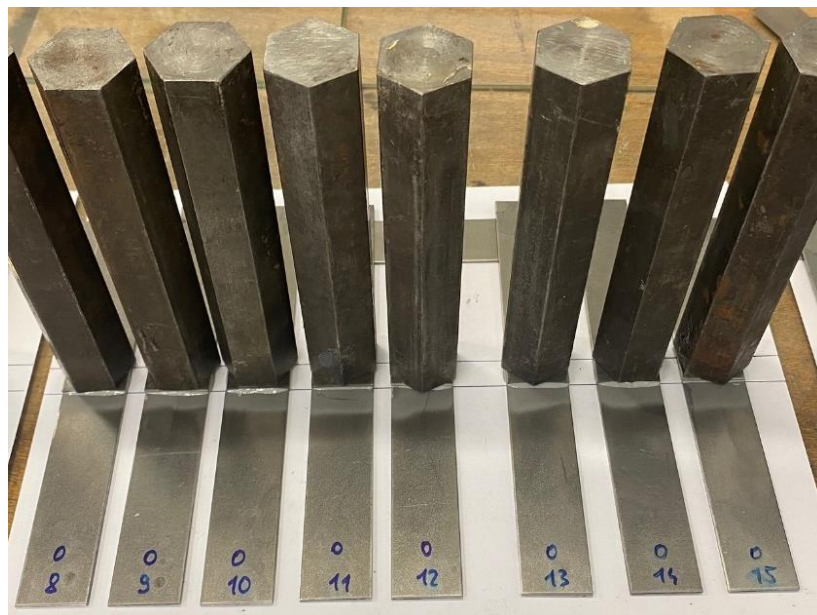
e) Průměrná tloušťka naneseného lepidla na lepené vzorky

Po ručním nanesení lepidla je tloušťka vrstvy hodnocena vizuálně, bez použití přípravků na kontrolu. Tloušťka vrstvy lepidel je rovněž sledována rovnoměrným nanášením lepidel a následným stlačením.

f) Úplný popis zkušebního tělesa, jeho rozměry, uspořádání, jmenovité přeplátování spoje, včetně popisu výroby vzorků a jejich počtu

Zkušební vzorky experimentu jsou přeplátované plechy uhlíkové oceli s délkou přeplátování $12,5 \pm 0,25$ mm. Tyto rozměry stanovuje norma ČSN EN 1465. Tloušťka lepených plechů je stanovena 1,5 mm a šířka vzorků 25 mm. [35]

Vzorky jsou značeny písmenem *T*, *O*, nebo *H* v závislosti na druhu lepidla – vzorky označené písmenem *T* jsou lepeny transparentním epoxidovým lepidlem, *O* je epoxidové lepidlo s příměsí oceli a *H* s příměsí hliníku. Pod písmenným označením je následně zaznamenáno pořadové číslo zkušebního vzorku – tzn. 1 až 60 pro každý z druhů lepidel. Na Obrázku 17 jsou zaznamenány vzorky s pořadovým číslem 8 až 15, lepené epoxidovým lepidlem s příměsí oceli (ozn. „*O*“), zatížené závažím po dobu vytvrzení (min. 24 hod).



Obrázek 17 - Značení vzorků experimentu, [zdroj autor]

Výroba polotovarů pro přípravu vzorků probíhá na tabulových padacích nůžkách NTC 2530/4 (Obrázek 18).



Obrázek 18 - Tabulové padací nůžky NTC 2530/4 [zdroj autor]

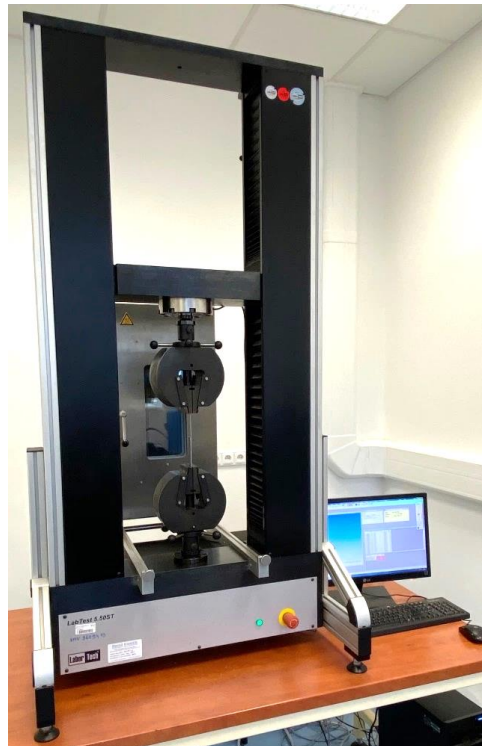
g) Kondicionování a stárnutí vzorků před zkoušením a parametry zkušebního prostředí

Vzorky jsou následně vystaveny vlivu stárnutí. Stárnutí je v tomto experimentu reprezentované degradačními cykly v programovatelné klimatické komoře Binder MKF240 (Obrázek 20). Všechny degradační cykly jsou definovány v normě pro výběr laboratorních podmínek stárnutí pro hodnocení lepených spojů ČSN EN ISO 9142, z nich byl pro potřeby tohoto experimentu zvolen cyklus D4 (Obrázek 19) – Vlhké teplo a ochlazení. Cyklus se skládá z následujících operací:

- Zvýšení teploty ze standardních laboratorních podmínek na 70 ± 2 °C během 30 min (pouze pro začátek 1. cyklu – vložení všech vzorků do klimatické komory, pro další cykly se tato operace neprovádí).
- Expozice vzorků po dobu $5 \text{ h} \pm 20 \text{ min}$ při 70 ± 2 °C a relativní vlhkosti ≥ 90 %.
- Během následujících 60 ± 20 min změna teploty na -40 ± 3 °C a expozice vzorků po $5 \text{ h} \pm 20 \text{ min}$.
- Během následujících 60 ± 20 min změna teploty na 70 ± 2 °C. [40]

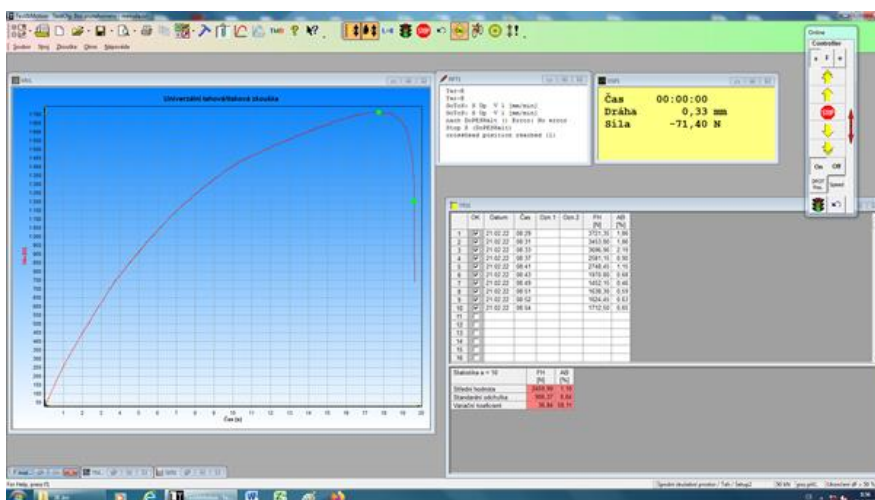
h) Rychlost zatěžování / posuvu čelistí přístroje na měření deformace

Destruktivní zkoušky pevnosti ve smyku lepených těles jsou realizovány na univerzálním zkušebním stroji LabTest 5.50ST (Obrázek 21), který je programem nastaven na „univerzální tahovou zkoušku“. Pohyb čelistí stroje směrem od sebe vytváří tahovou sílu působící na lepená tělesa a pro lepený spoj je tak stanovena tzv. pevnost ve smyku při tahovém namáhání.



Obrázek 21 - Univerzální zkušební stroj LabTest 5.50ST, [zdroj autor]

Rychlost posuvu čelistí univerzálního zkušebního přístroje LabTest 5.50ST určeného pro destruktivní zkoušky experimentu je předem určena $1 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$. Tato rychlost je v průběhu měření zachována pro všechny vzorky.



Obrázek 22 - Pracovní plocha programu LT Test&Motion, [zdroj autor]

Univerzální zkušební stroj dokáže komunikovat se stolním počítačem a díky programu LT Test&Motion (Obrázek 22) je možné exportovat výsledky měření do Excelu. Na monitoru počítače pak zobrazuje průběh vybrané zkoušky jak graficky (levá část) tahovým diagramem, tak sledováním přesných hodnot času zkoušky, dráhy čelistí stroje a aktuální vynaložené síly (vpravo nahoře).

- i) Výsledky síly, napětí při přerušení, včetně aritmetického průměru, variačního koeficientu a informací o rozptylu výsledků

Výsledky experimentálního měření jsou vyjádřeny jako aritmetický průměr a variační koeficient síly při přetržení v newtonech. Pevnost ve smyku v megapascalch se pro jednotlivé vzorky následně vypočte jako podíl síly v newtonech a lepené plochy v milimetrech čtverečních. Deformace neboli prodloužení lepené soustavy při namáhání před dosažením meze pevnosti je vyjádřeno v %. [35]

Smykové napětí (Vztah 1) – vyjadřuje pevnost lepeného vzorku podrobeného tahové zkoušce smykem:

$$\tau = \frac{FN}{S} = \frac{FN}{b \cdot l}$$

Vztah 1 - Pevnost ve smyku

τ – pevnost ve smyku [MPa], FN – maximální tahová síla nutná k přetržení vzorku [N], b – šířka vzorku [mm], l – délka přeplátování lepeného spoje [mm]

Aritmetický průměr (Vztah 2) – součet naměřených hodnot, dělený jejich počtem:

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

Vztah 2 - Aritmetický průměr

\bar{x} – aritmetický průměr [MPa], n – celkový počet hodnot, x_i – jednotlivé hodnoty [MPa]

Směrodatná odchylka (Vztah 3) – kvadratický průměr odchylek hodnot znaku od jejich aritmetického průměru – směrodatná odchylka vyjadřuje míru rozptylu hodnot měření:

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

Vztah 3 - Směrodatná odchylka

σ – směrodatná odchylka [MPa], n – celkový počet naměřených hodnot, x_i – jednotlivé hodnoty [MPa], \bar{x} – aritmetický průměr jednotlivých hodnot [MPa]

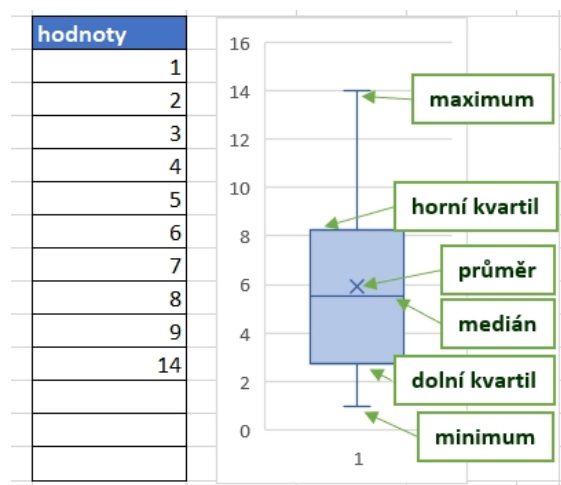
Variační koeficient (Vztah 4) – vyjadřuje variabilitu rozdělení pravděpodobnosti náhodné veličiny:

$$V = \frac{\sigma}{\bar{x}} \cdot 100$$

Vztah 4 - Variační koeficient

V – variační koeficient [%], σ – směrodatná odchylka [MPa], \bar{x} – aritmetický průměr [MPa]

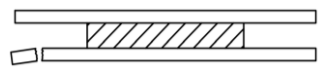
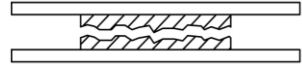
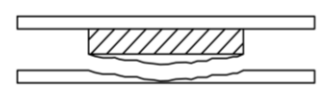
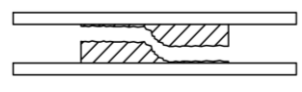
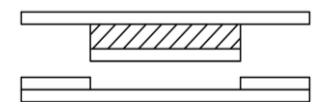
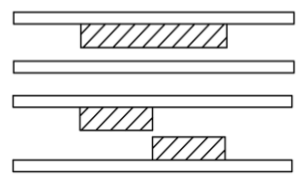
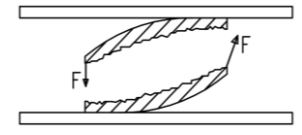
Výsledky měření jsou zároveň v kapitole č. 5 – Interpretace výsledků destruktivní zkoušky pevnosti znázorněny graficky, pomocí krabicového a bodového grafu. Krabicový graf znázorňuje rozdělení dat do kvartilů (dolní 25 % a horní 75 %) a udává průměr, medián a odlehlé hodnoty měření. Z každé krabice mohou vést tzv. „vousy“, které označují proměnlivost mimo horní a dolní kvartily (minimum a maximum hodnot), a každá naměřená hodnota mimo tyto čáry je nazývána odlehlá hodnota a je tak vyřazena. Příklad a popis krabicového grafu je uveden na Obrázku 23. Jednotlivé body bodového grafu jsou průměry hodnot každé degradované série vzorků. Tyto body jsou následně proloženy lineární spojnicí trendu, která zároveň predikuje tendenci změny pevnosti nebo deformace lepeného spoje. V bodovém grafu jsou zahrnuty hodnoty všech 3 druhů lepidel a výsledky experimentu jsou tak porovnány. [42]



Obrázek 23 - Příklad a popis krabicového grafu, [43]

j) Typ porušeného spoje

Na základě vizuálního rozboru přetržených vzorků po smykové zkoušce pevnosti tahem je typ porušeného spoje určen dle Tabulky 3. Do tabulky s výsledky měření je zaznamenán typ porušení dle jeho označení. [40]

Typ porušení adhérendu	Označení	Typ porušení lepidla	Označení
 Porušení jednoho nebo dvou adhérendů	SF	 Kohezní porušení	CF
 Porušení jednoho adhérendu	CSF	 Speciální kohezní porušení	SCF
 Porušení delaminační	DF		
		 Adhezní porušení	AF
		 Adhezní a kohezní porušení	ACFP

Tabulka 3 - Typy porušení lepeného spoje, [30], vlastní zpracování

Nejčastěji dochází při destruktivních zkouškách pevnosti lepených spojů k těmto lomům:

- **Čistě adhezní porušení (AF)** nastává v případě, kdy je adhezní síla na jednom z adhérendů nižší než adhezní síla na druhém adhérendu a kohezní síla. V případě zkoušky v odlupování může dojít k adheznímu lomu u obou z adhérendů a typicky se jedná o nevhodně zvolenou kombinaci adhérendu a lepidla, které nejsou schopné společně vytvořit dostatečnou adhezní pevnost. [4]
- **Čistý kohezní lom (CF)** vzniká v případě kdy jsou adhezní síly adhérendů vyšší než kohezní pevnost lepicí vrstvy. V praxi tento jev znamená, že pro dosažení maximální pevnosti spoje je potřeba použít co možná nejtenčí vrstvu lepidla. [4]
- **Smišený lom (ACFP, popř. AF – dolní schéma)** – k němu dochází v praxi poměrně často. Vzniká kombinací adhezních a kohezních poruch lepeného spoje. Vhodnější volbou technologického postupu (nanášení lepidla na adhérend, úprava povrchu adhérendu) lze dosáhnout nebo se přiblížit čistému koheznímu lomu (CF). [4]
- **Kohezní lom na hranici adhérendu (SCF)** se často vyskytuje při použití nátěru primery lepené plochy před lepením nebo při cyklickém namáhání lepeného spoje. V Tabulce 2 je kohezní lom na hranici substrátu o analogii adhezního lomu přiblížen schématem níže, kombinovaný adhezní a kohezní na schématu výše. [4]

- **Porušení adherendu** (SF, CSF, DF) vzniká, když je pevnost lepeného spoje vyšší než pevnost substrátu. Tato situace často nastává u zkoušek pevnosti lepených laminátů nebo tkaných textilií. Dle ČSN EN 1465 musí být zkušební vzorky s tímto typem porušení vyloučeny, s výjimkou výrobních zkoušek. [4], [35]

Následující postup měření experimentu [odrážka k) a l)] je detailně popsán v samostatné kapitole 7 Doplňující informace o odchylkách experimentu.

- k) Informace o zkušebních tělesech, u kterých při měření došlo k porušení adherendu.
- l) Informace o odchylkách od předepsaného postupu a okolnosti, které by mohly ovlivnit výsledky.

Zkoumání struktury lepeného spoje mikroskopem

Výstupem tohoto experimentu je vedle hodnot smykové zkoušky pevnosti i analýza degradovaných vzorků elektronovým mikroskopem. Smyslem tohoto zkoumání je vizuální analýza mnohonásobným přiblížením řezu lepeným spojem. Výstupy analýzy vzorků mikroskopem jsou jejich přiblížené snímky, jejich porovnání a detailní popis a jsou uvedeny v kapitole 6 Interpretace výsledků zkoumání mikroskopem.

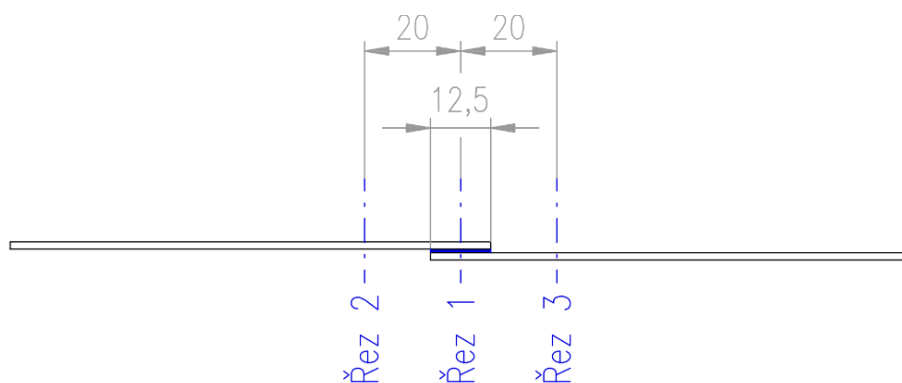
Příprava vzorků pro zkoumání elektronovým mikroskopem:

Řez vzorku lepeného spoje je proveden dle Obrázku 25 pomocí pásové pily Pilous ARG 190 plus (Obrázek 24). Pomocí řezu 1 je odhalena struktura lepeného spoje, která je podrobena analýze mikroskopem.



Obrázek 24 - Pásová pila Pilous ARG 190 plus, [zdroj autor]

Přes všechny snahy o opatrnost při procesu řezání vzorků se nebylo možné vyhnout nežádoucí destrukci jednoho ze vzorků, jelikož pásová pila přenáší na řezané vzorky značné množství vibrací a vzorky degradované v klimatické komoře mají snížené kvalitativní vlastnosti. Při řezu vzorku „14 H“ (Epoxidové lepidlo s obsahem hliníku degradované 14 dní) a „42 O“ (Epoxidové lepidlo s obsahem oceli degradované 42 dní) došlo k adheznímu porušení a není tak možné tento vzorek použít k dalšímu zkoumání.

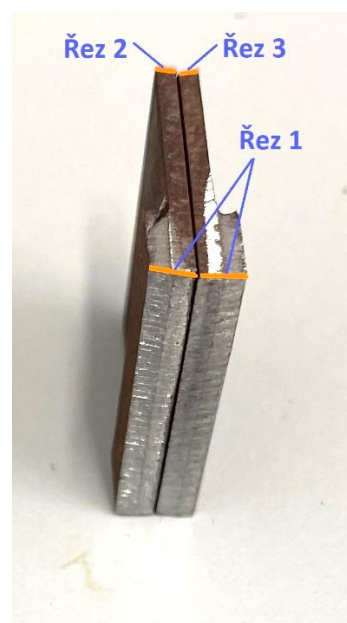


Obrázek 25 - Řez vzorku určeného pro analýzu mikroskopem, [zdroj autor]

Následujícím procesem je povrchová úprava řezaných vzorků leštěním. Pro zvětšení upravované plochy jsou vzorky stejného lepidla a degradační doby lepeny k sobě (Obrázek 27) sekundovým lepidlem Bison Super Glue (Obrázek 26). Takto slepený vzorek je nejdříve zbaven výrazných otřepů ručním pilníkem a následně je připraven pro leštění na kotoučové brusce značky Metasinex (Obrázek 28).



Obrázek 26 - Sekundové lepidlo Bison Super Glue, [zdroj autor]

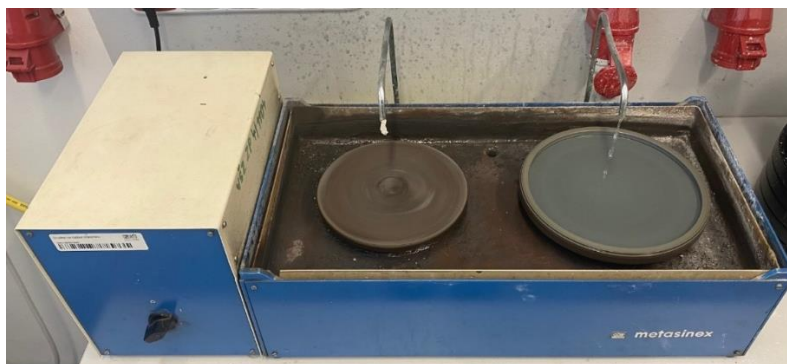


Obrázek 27 - Příprava vzorku před leštěním, [zdroj autor]

Každý vzorek je leštěn postupně třemi plochými kotouči. Leštění vzorku začíná na nejhrubším diamantovém kotouči, tím se docílí odstranění hrubých vrypů od pásové pily a srovnání upravované plochy do jedné roviny. V případě, že by nebyla zkoumaná plocha srovnána do roviny, na elektronovém mikroskopu by jiná rovina vytvářela odlesky a zkreslovala tak přiblížený snímek. Následně je hrubě opracovaný vzorek leštěn jemnějším kotoučem o zrnitosti 1200 a v poslední fázi je vzorek vyleštěn na filcovém kotouči, čímž je docíleno konečného výsledku. Velmi často se stává, že vyleštění vzorku filcovým kotoučem odhalí nedokonalosti předchozích leštících operací (vizuální kontrola odhalí stále

neopracované vrypy na leštěné ploše) a celý proces je tak nutné opakovat až do docílení „zrcadlové plochy“ vzorku. Celý proces povrchové úpravy broušení na kotoučové brusce probíhá pod mírným proudem tekoucí vody. Při broušení voda odvádí nečistoty, chladí vzorky a pomáhá k vytvoření lesklého povrchu.

Při leštění vzorku „42 H“ došlo k adhezni poruše jedné ze dvou částí vzorku. Stále je proto jedna část vzorku použitelná pro vizuální zkoumání a není tak zcela vyřazen z následných analýz.



Obrázek 28 - Kotoučová bruska na rozbor materiálu, [zdroj autor]

Po vyleštění je nutné vzorky ihned osušit, aby nedocházelo k povrchové korozi, a tím k znehodnocení připraveného vzorku. K tomuto účelu je použit klasický fén na vlasy a horkým proudícím vzduchem jsou všechny vzorky po leštění zbaveny vlhkosti. Voda může stále na vyleštěné ploše vzorku zanechávat nežádoucí nečistoty, proto je po vysušení vzorek otřen izopropylalkoholem a ihned znovu osušen fénem.

Další procesem je oprašování vybraných vzorků zlatem. Oprašování zlatem je podstatnou součástí zkoumání vzorků elektronovým mikroskopem. Zlato odhaluje strukturu lepidla, které by jinak na snímcích rastrovacího elektronového mikroskopu nebylo vidět (elektronový mikroskop zobrazuje kovové nebo pokovené materiály). Tato operace probíhá na naprašovačce Quorum Q150R ES (Obrázek 29), kde jsou vzorky nejdříve upnuty do speciálního držáku do stejné roviny pomocí pinzety a následně je nastaven naprašovací cyklus QT Time gold. Proces naprašování zlatem probíhá v komoře naprašovacího zařízení v argonové ochranné atmosféře.



Obrázek 29 - Naprašovačka Quorum Q150R ES, [zdroj autor]

Finálním krokem je již samotné zkoumání řezu lepeným spojem na rastrovacím elektronovém mikroskopu (anglicky scanning elektron microscope, známo proto pod zkratkou „SEM“) MIRA3 GMU, sériové číslo 115-0075 od firmy Tescan (Obrázek 30). Ke sledování a výstupu snímků mikroskopu je použit počítačový program MIRA TCx64. Rastrovací elektronový mikroskop pro potřeby této práce využívá snímač na detekování sekundárních elektronů a celý proces probíhá ve vakuu. Urychlovací napětí pro měření vzorků bylo nastaveno na 10 kV.



Obrázek 30 - Rastrovací elektronový mikroskop Tescan MIRA3 GMU, [zdroj autor]

5 Interpretace výsledků destruktivní zkoušky pevnosti lepených spojů

Výstupní hodnoty destruktivní zkoušky pevnosti ve smyku tahovým zatížením jsou zde interpretovány pomocí průměru, mediánu, směrodatné odchylky a variačního koeficientu hodnot. Tyto údaje jsou vypočtené a uvedené ve výsledkových tabulkách – Příloha č. 5 až č. 7 a zároveň jsou prezentovány v krabicových, spojnicových a bodových grafech v následujících kapitolách.

Krabicové grafy popisují naměřené hodnoty pevnosti a deformace lepených spojů v jednotlivých degradačních cyklech pro každé z lepidel samostatně. Pro jednotlivá lepidla je interpretována predikce ve formě spojnicového grafu, který vychází z hodnot pevnosti. Bodové grafy následně slouží k porovnání degradačního průběhu všech druhů lepidel navzájem. Všechny grafické interpretace jsou výstupem programu Microsoft Excel z osobního počítače autora.

5.1 Pevnost zkoumaných lepidel

Výstupem deformační zkoušky pevnosti je hodnota síly nutná k přerušení vzorku. Z této síly je vypočtena hodnota mezi pevnosti lepeného spoje, která je zahrnuta do grafické interpretace výsledků měření v následujících podkapitolách. Každá z podkapitol se zaměřuje na jeden druh lepidla a v poslední podkapitole je uvedeno jejich porovnání.

Pevnost zkoumaných lepidel je dána výrobcem v technickém listu (Příloha 1) a je vždy porovnána s výslednými hodnotami experimentu. Při poklesu pevnosti o 15 % z původní hodnoty dosahuje vzorek hranice bezpečného použití. Tato hranice je popsána pro jednotlivá lepidla ve vlastních podkapitolách a je vypočtena z průměru hodnot pevnosti etalonových vzorků.

5.1.1 Změna pevnosti transparentního epoxidového lepidla

Pevnost lepeného spoje transparentního epoxidového lepidla uvádí výrobce, firma Hortex, 18 MPa pro lepení oceli. Již prvním měřením (tvorba etalonových hodnot jako reference degradovaným vzorkům) je tato téze vyvrácena, jelikož z 6 naměřených hodnot pevnosti se přibližovala pouze 1, zbytek hodnot se více blížil nižší pevnosti, někdy až 12 MPa.

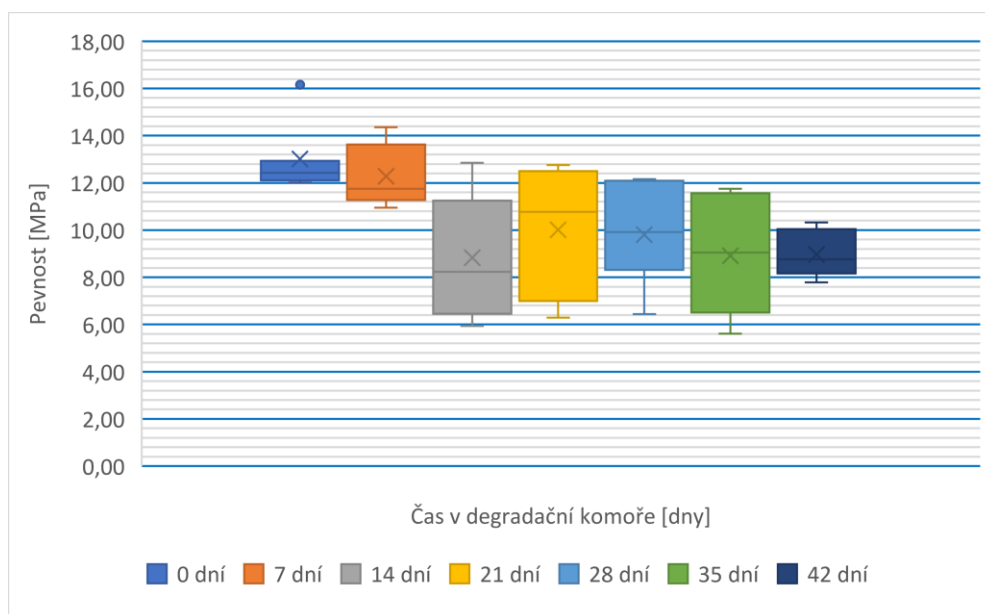
Z Grafu 1 je zřejmé, že pevnost lepeného spoje relativně rovnoměrně klesá. Pevnost lepeného spoje se po 7 dnech degradace snižuje pouze o 0,77 %, výrazné snížení pevnosti nastává až po 14 dnech degradace, kdy pevnost klesá o 28,7 % a vzniká zde tak lehký výkyv hodnot, jelikož po 21 dnech degradace se průměr pevností snižuje o 19,13 % vůči etalonu. Další změna pevnosti pokračuje po degradaci 28 dní, kdy klesá o 20,78 % a následně 35 dní, kdy se pevnost snižuje již o 27,97 %. Po 42 dnech stárnutí vzorků se hodnoty pevnosti lepených spojů ustalují a jsou sníženy o 27,53 %. Při porovnání s ostatními druhy lepidel popisovanými v dalších kapitolách se jedná o nejnižší snížení pevnosti z vybraných lepidel. Hodnoty pevnosti

výrazně klesají v sérii se 14 dny degradace v klimatické komoře. To může být přisuzováno sekundárnímu vytvrzování lepidla (zvýšení pevnosti v dalším týdnu degradace), nebo je možné, že by byla s vyšším počtem zkoumaných vzorků tato výchylka odstraněna. Od 21 do 42 dní degradace má medián hodnot lineárně klesající tendenci.

Nejvyšší hodnota variačního koeficientu 29 % odpovídá vzorkům degradovaným 14 dnů. Vyšší variabilita zaznamenána nebyla, avšak variační koeficient více než 20 % byl vypočten ještě u vzorků degradovaných 21, 28 a 35 dnů. I přes značný rozptyl hodnot je klesající trend zřejmý.

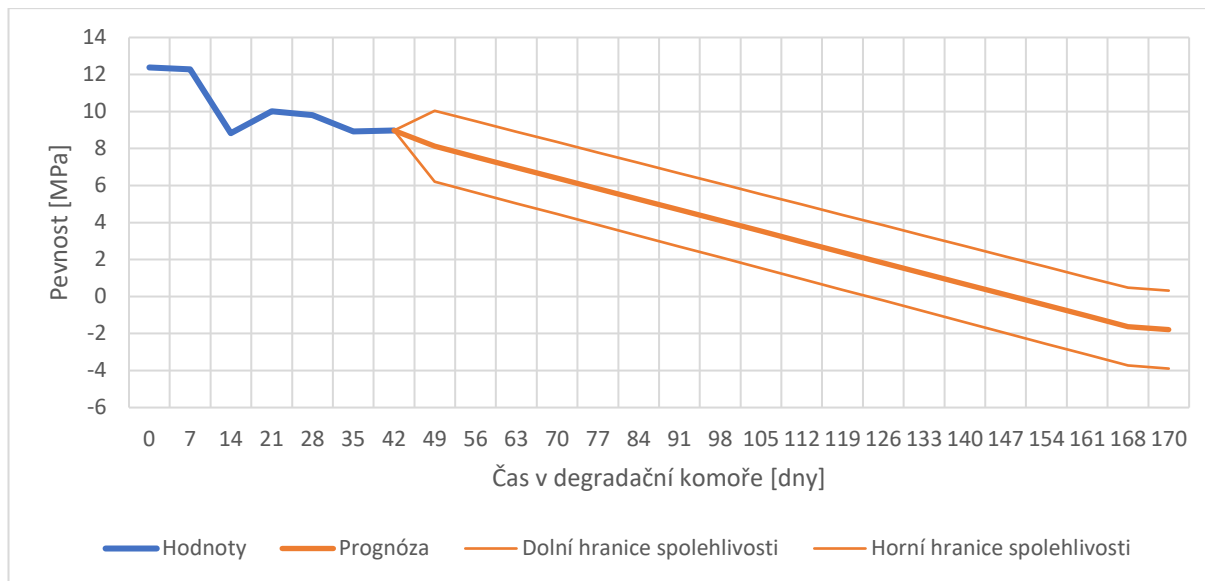
Hranice bezpečného použití lepeného spoje transparentním epoxidovým lepidlem je 10,52 MPa. Nad touto hranicí se drží transparentní epoxidové lepidlo pouze po 7 dnech degradace v klimatické komoře, po dalších 7 dnech vystavení extrémním podmínkám klesá průměrná pevnost pod tuto hranici.

Po přetržení jednotlivých vzorků byl vizuálně zkoumán typ porušeného spoje. Pro transparentní epoxidové lepidlo byly všechny typy vyhodnoceny jako ACFP, což značí vyrovnanost adhezních a kohezních sil i po vystavení vzorků umělému stárnutí v klimatické komoře.



Graf 1 - Krabicový graf pevnosti transparentního epoxidového lepidla, [zdroj autor]

Z důvodu vyhodnocení pevnosti vzorků je naměřená hodnota vzorku „1 T“ posouzena jako odlehlý údaj a je vyřazen z dalších analýz. Odlehlá hodnota je vyhodnocena programem Microsoft Excel a je v krabicovém grafu znázorněna bodem. Vyřazením jednoho vzorku stále zbývá 5 naměřených hodnot, které jsou dle normy ČSN ISO 10365 dostatečné pro statistickou interpretaci. [40], [44]



Graf 2 - Prognóza trendu pevnosti transparentního epoxidového lepidla, [zdroj autor]

Graf 2 predikuje počet dní v klimatické komoře potřebný k úplné ztrátě pevnosti, a tudíž celkové soudržnosti lepidla. Z hodnot predikce je zřejmé, že pevnost klesne na nulovou hodnotu přibližně kolem 147 dnů degradace. Touto predikcí je potvrzena dobrá životnost transparentního lepidla při vystavení výkyvům teploty a vlhkosti. Dolní a horní hranice spolehlivosti programem Microsoft Excel reprezentuje toleranci predikce, tedy ± 21 dnů. Tabulka s hodnotami a prognózou trendu je v Příloze č. 8.

5.1.2 Změna pevnosti epoxidového lepidla s obsahem oceli

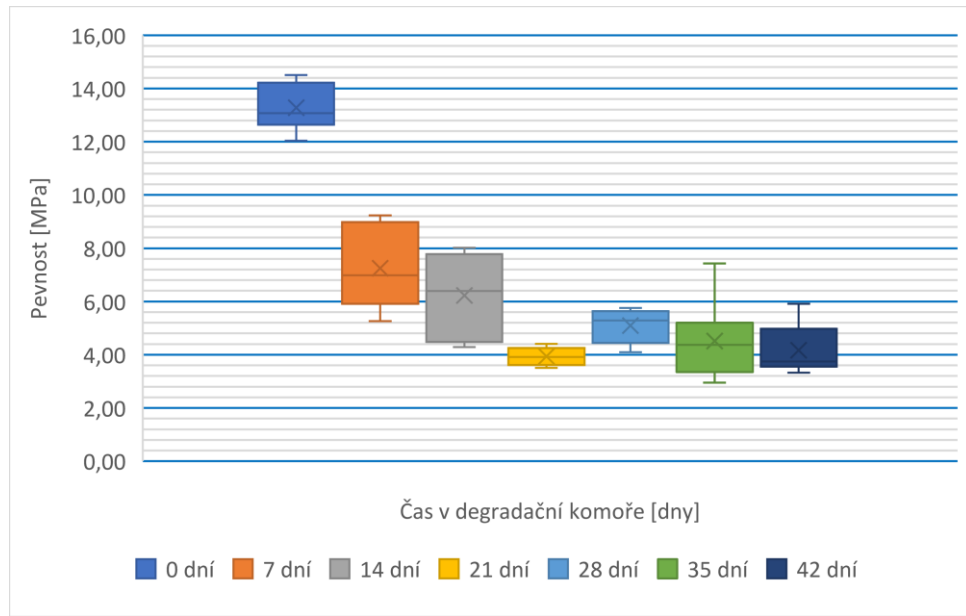
Při tvorbě referenčních, nedegradovaných hodnot pevnosti lepeného spoje epoxidovým lepidlem s příměsí oceli bylo zjištěno, že průměrná hodnota je 13,27 MPa. Pevnost tohoto druhu lepidla by však měla dle výrobce být dokonce vyšší než u transparentního lepidla a měla by dosahovat 20 MPa.

Pevnost lepeného spoje s použitím epoxidového lepidla s příměsí oceli (Graf 3) výrazně klesá již po 7 dnech po vystavení vzorků extrémním klimatickým podmínkám v degrační komoře, a to o 45,39 %. Po dalších 7 dnech, tedy celkem po 14 dnech stárnutí, výrazný pokles nevzniká, průměr snížení pevnosti je roven 53,10 %. Extrémní snížení pevnosti nastává po 21 dnech, kdy pokles činí 70,37 %. Zde se hodnoty pevnosti ustalují a další snížení už později nenastává – po 28 dnech je pokles pevnosti 61,59 %, po 35 dnech 66,02 % a po stárnutí 42 dní 68,59 %.

Variabilita hodnot pevnosti se v průběhu experimentu hodně mění. Pevnost etalonu má variační koeficient 6,22 %, tedy nejnižší, naopak nejvyšší byl zaznamenán po 35 dnech degradace a činí 31,41 %.

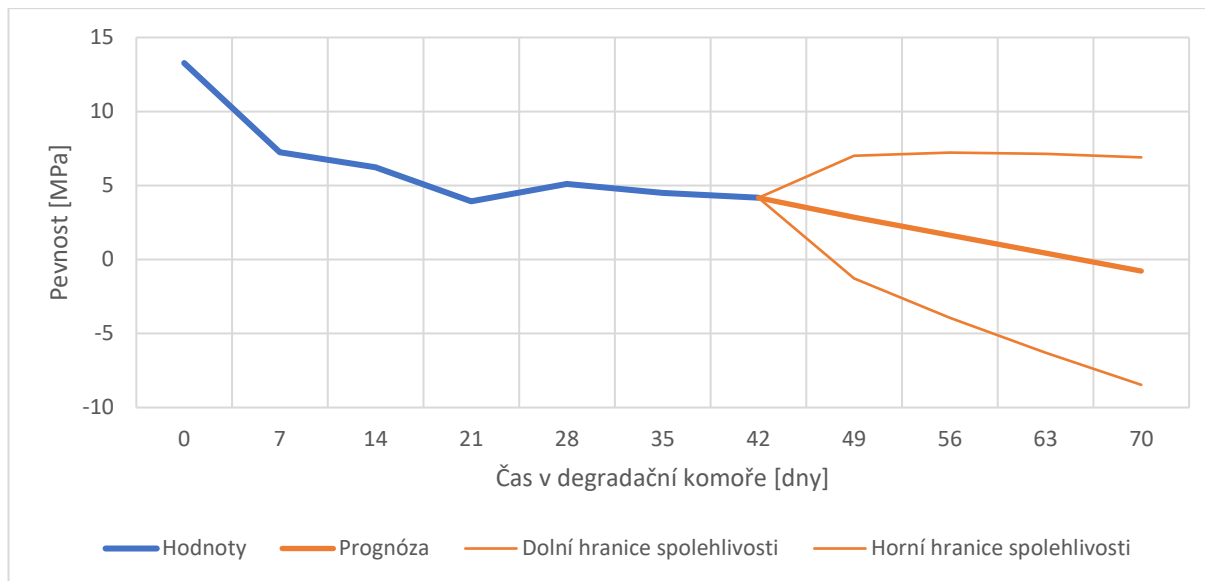
Hranici bezpečného používání je výpočtem z pevnosti etalonových vzorků stanovena na 11,28 MPa. Pod tuto hranici se epoxidové lepidlo s obsahem oceli dostává již po 7 dnech stárnutí v degrační komoře.

Vizuální zkoumání vzorků po přetržení na univerzálním zkušebním stroji vyhodnotila všechny lomy epoxidového lepidla s obsahem oceli jako ACFP, což naznačuje rovnost, nebo alespoň podobnost adhezních a kohezních sil lepeného spoje.



Graf 3 - Krabicový graf pevnosti epoxidového lepidla s obsahem oceli, [zdroj autor]

Z výsledků poklesu pevnosti lepeného spoje je tak zřejmé, že epoxidové lepidlo s obsahem oceli není schopné dobře snášet extrémní vlivy teploty nebo vlhkosti. Výrobce však v technickém listu uvádí, že teplotní odolnost lepidla je od -50 do $+145$ °C, proto by nastavená – degrační teplota klimatické komory neměla být hlavním činitelem tohoto výrazného prvotního poklesu pevnosti. V technickém listu (Příloha 3) je zároveň uvedeno, že lepidlo trvale odolává celé řadě vnějších vlivů, mezi ně je zahrnuta i voda.



Graf 4 - Prognóza trendu pevnosti epoxidového lepidla s obsahem oceli, [zdroj autor]

Prognóza poklesu pevnosti epoxidového lepidla s obsahem oceli v Grafu 4 uvádí, že k úplné ztrátě pevnosti lepidla dojde zřejmě před 70. dnem expozice vzorků degračním cyklem. V porovnání s transparentním epoxidovým lepidlem je tato doba velmi krátká a predikce tak poukazuje na velmi krátkou životnost lepidla s příměsí oceli při vystavení vlivům vlhkosti a teploty. Tabulka s hodnotami a prognózou trendu je v Příloze č. 9.

5.1.3 Změna pevnosti epoxidového lepidla s obsahem hliníku

Pevnost lepeného spoje při lepení oceli epoxidovým lepidlem s obsahem oceli uvádí výrobce, firma Hortex, 20 MPa. Destruktivní zkouškou pevnosti smykem takovým zatížením bylo při přetržení 6 etalonových vzorků zjištěno, že průměr meze pevnosti spoje odpovídá hodnotě nižší, a to 13,9 MPa.

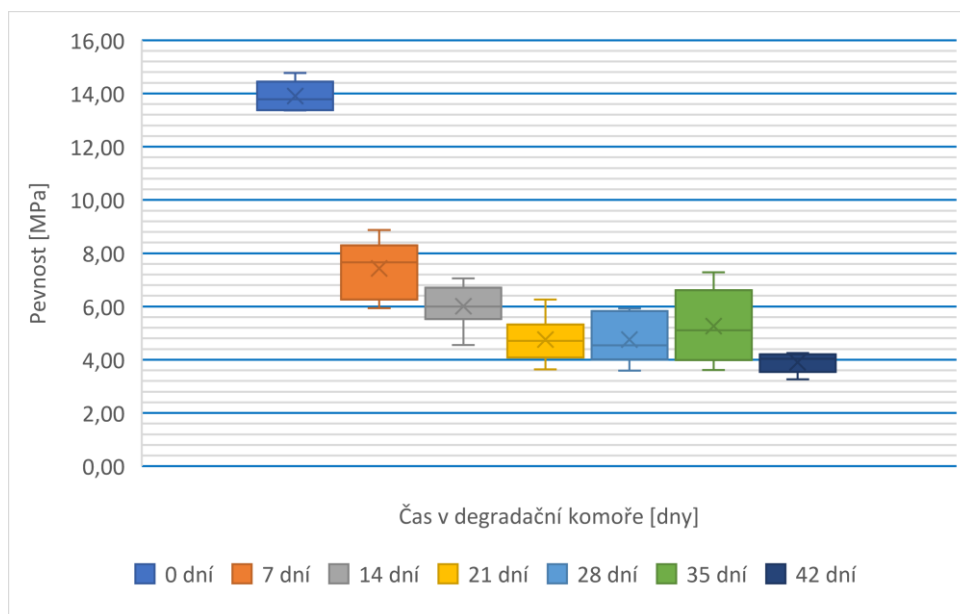
Podobně jako je tomu u lepených spojů epoxidovým lepidlem s obsahem oceli i zde (Graf 5) je zaznamenán výrazný, dokonce výraznější pokles pevnosti již po 7 dnech degradace vzorků. Lepené spoje vystavené stárnutí po 7 dní vykazují pokles pevnosti o 46,53 % vůči etalonu. Další podobný extrémní propad pevnosti zde již nevzniká, po 14 dnech stárnutí hodnota pevnosti klesá pomaleji, o 56,79 % v porovnání s etalonem, dále po 21 dnech o 65,75 %. Zde se klesání pevnosti pozastavuje a další vzorky s degradací 28 dní vykazují pokles o 65,77 %. Následující zkoušky vzorků s 35 dny degradace v klimatické komoře prezentují klesání průměrné pevnosti o 62,12 % a po 42 dnech stárnutí pevnost klesá o 71,94 % na konečnou hodnotu 3,9 MPa. V porovnání s pevností etalonu 13,9 MPa se tak jedná o nejvýraznější pokles pevnosti ze všech zkoumaných druhů epoxidových lepidel.

Variační koeficienty pevnosti vzorků poukazují na nízký rozptyl hodnot. Pro lepidla s obsahem hliníku byl nejvyšší variabilní koeficient vypočítán 23,95 % pro vzorky degradované

35 dnů. Zbylé variační koeficienty se drží pod hranicí 18 % a jedná se tak o nejnižší variabilitu hodnot ze všech zkoumaných lepidel.

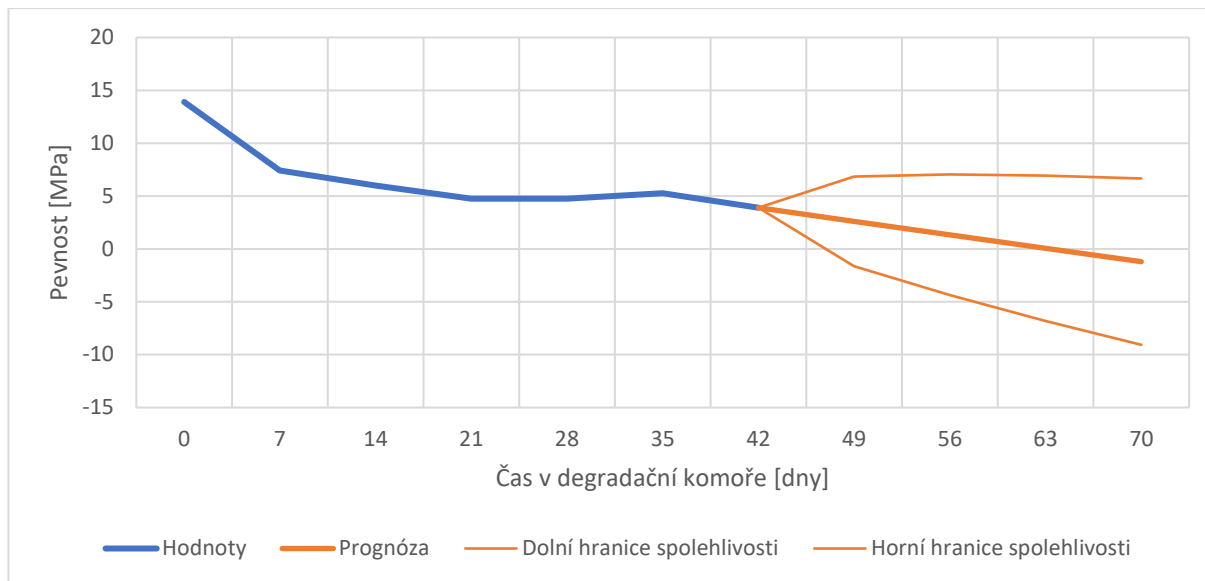
Poklesem na hodnotu pevnosti 11,8 MPa se epoxidové lepidlo s obsahem hliníku dostává na hranici bezpečného používání. Tuto hranici překonává lepidlo již po prvních 7 dnech umělého stárnutí.

Po přetržení všech vzorků na univerzálním zkušebním stroji byla vizuálně zkoumána lomová plocha. V žádném z případů nedošlo k přetržení adherendu a většina druhů porušení byla vyhodnocena jako ACFP. Ve dvou případech – „46 H“ a „48 H“ byla pozorována lomová plocha AF, tedy adhezní porušení lepených spojů.



Graf 5 - Kráčkový graf pevnosti epoxidového lepidla s obsahem hliníku, [zdroj autor]

Výrazný pokles pevnosti již po 7 dnech vystavení extrémním vnějším vlivům teploty a vlhkosti v klimatické poukazuje na nesnášenlivost lepidla některému z těchto vlivů, avšak výrobce v technickém listu uvádí teplotní odolnost lepidla od -50 do $+145$ °C. Zároveň uvádí, že epoxidové lepidlo s obsahem hliníku je schopné krátkodobě odolávat dokonce ještě vyšší teplotě, a to $+180$ °C. Z těchto hodnot vyplývá, že při vystavení lepených spojů teplotě -40 a $+70$ °C v klimatické komoře nemůže mít takto výrazný vliv na pevnost lepidla. Zároveň výrobce v technickém listu lepidla (Příloha 4) uvádí, že lepidlo trvale odolává vodě, proto by ani vlhké prostředí degračního cyklu nemělo mít takto výrazný vliv.



Graf 6 - Prognóza trendu pevnosti epoxidového lepidla s obsahem hliníku, [zdroj autor]

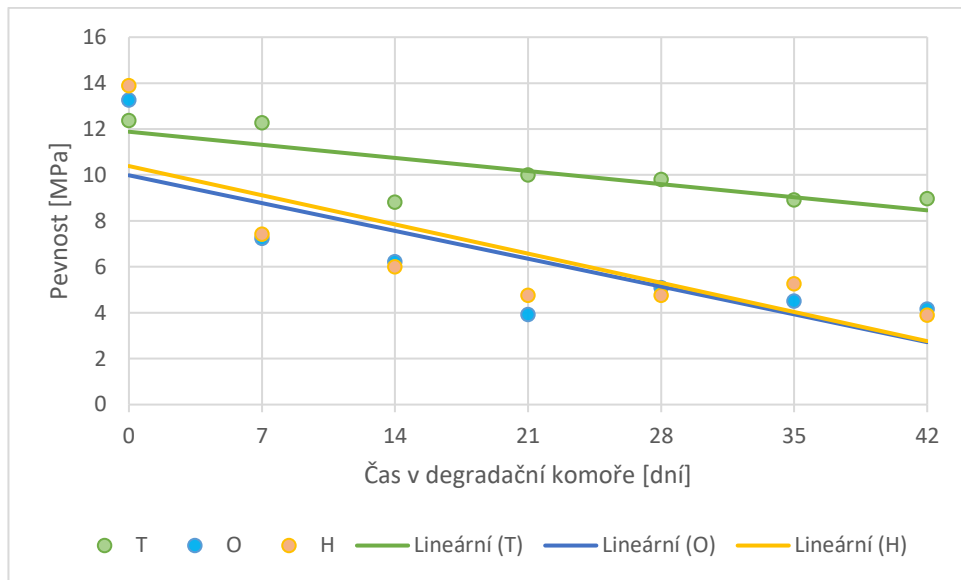
Predikce poklesu pevnosti lepidla s obsahem hliníku (Graf 6) má podobný průběh jako lepidla s příměsí oceli. K ztrátě pevnosti má dle predikce dojít kolem 70 dnů stárnutí vzorků. V porovnání s transparentním lepidlem je to velmi krátká doba a poukazuje tak na nízkou odolnost lepidla s příměsí hliníku vůči teplotním a vlhkostním výkyvům, a tím jeho krátkou životnost. Hodnoty a predikce tohoto grafu jsou uvedeny v tabulce v Příloze 10.

5.1.4 Porovnání hodnot pevnosti lepidel

Možnost porovnání klesání pevnosti lepených spojů všech zkoumaných lepidel poskytuje Graf 7, kde je pevnost na svislé ose porovnána s časem v degrační komoře. Pro jednotlivé dny degradace jsou v grafu vyznačené body reprezentující průměrné hodnoty pevnosti pro daná lepidla, s barvou dle legendy grafu. Body jsou následně pro každý druh lepidla proloženy lineární spojnici trendu, která názorně reprezentuje průběh pevnosti lepidel.

Z grafu 7 je patrné, že vzorky plechu lepené epoxidovým lepidlem s obsahem oceli i s obsahem hliníku mají velmi podobný klesající průběh hodnot pevnosti. Podobnost sdílejí tato lepidla i ve výrazném poklesu pevnosti už při prvních 7 dnech vystavení klimatickým podmínkám degrační komory. Transparentní epoxidové lepidlo dosahuje mnohem vyšších hodnot pevnosti v jednotlivých dnech degradace, a zdá se tak odolnější vůči degračním cyklům.

Lineární spojnice trendu transparentního epoxidového lepidla zároveň vykazuje méně klesající tendenci v porovnání s ostatními druhy lepidel, což značí lepší odolnost vůči teplotním a vlhkostním cyklickým vlivům. Zajímavou skutečností rovněž je, že etalon epoxidového lepidla s příměsí oceli i hliníku má vyšší pevnost než transparentní epoxidové lepidlo. Tato pevnost však degradací velmi rychle klesá, zatímco transparentní lepidlo si svou pevnost drží déle, a reprezentuje tak svou vyšší odolnost vůči degradačním vlivům.



Graf 7 - Bodový graf porovnání změny pevnosti lepidel za čas, [zdroj autor]

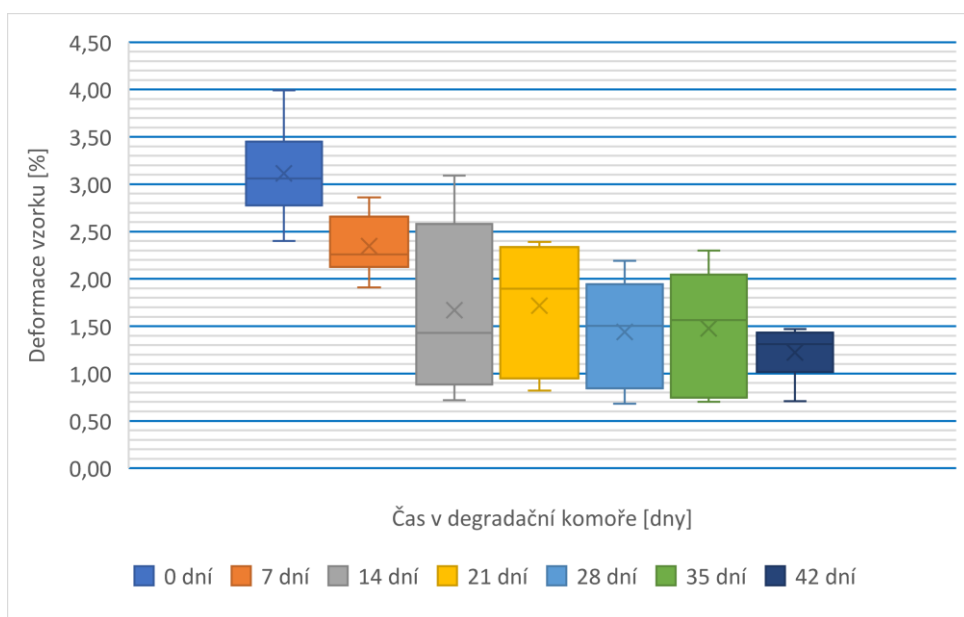
Tyto výsledné hodnoty pevnostních zkoušek potvrzují tvrzení výrobce, ten v technickém listu epoxidových lepidel (Příloha 1) uvádí, že epoxidová lepidla s obsahem oceli a obsahem hliníku jsou nejvhodnější na spojování kovů. Pro transparentní epoxidové lepidlo však udává výrobce nejvhodnější použití lepení kamene – beton, pórobeton, mramor, žula apod. Doporučení výrobce použít pro lepení oceli epoxidové lepidlo s obsahem oceli nebo obsahem hliníku je experimentem potvrzeno pevnostními zkouškami etalonu, kde mají lepidla s příměsí oceli a hliníku vyšší pevnost. Experiment však poukazuje také na skutečnost, že při vystavení těchto lepidel degradačním vlivům výrazně snižuje jejich původní pevnost.

5.2 Deformace zkoumaných lepidel

Druhým výstupem deformační zkoušky pevnosti ve smyku tahovým zatížením je poměrné prodloužení lepeného vzorku po přetržení. Toto prodloužení je programem LT Test&Motion označeno jako deformace a je udávané v %.

5.2.1 Změna deformace transparentního epoxidového lepidla

Při tvorbě etalonu pro destruktivní zkoušky transparentního epoxidového lepidla byla zjištěna vzorová průměrná hodnota deformace 3,11 %. Z Grafu 8 je zřejmé, že se zvyšující se dobou degradace vzorků klesá poměrné prodloužení potřebné k přetržení zkušební vzorku poměrně rovnoměrně. Během prvních 7 dní degradace klesá deformace vzorku o 0,77 %, v následujících 14 dnech je pokles roven 1,44 %. V následujícím týdnu se pokles nezvyšuje, činí 1,40 % a klesá až po 28 dnech v klimatické komoře, kdy je zaznamenán pokles o 1,67 %. V následujícím týdnu se průměrná hodnota poklesu deformace opět výrazně nemění a činí 1,64 %, v poslední degradační sérii, 42 dnů, činí hodnota deformace 1,22 %, což odpovídá poklesu o 1,89 %.

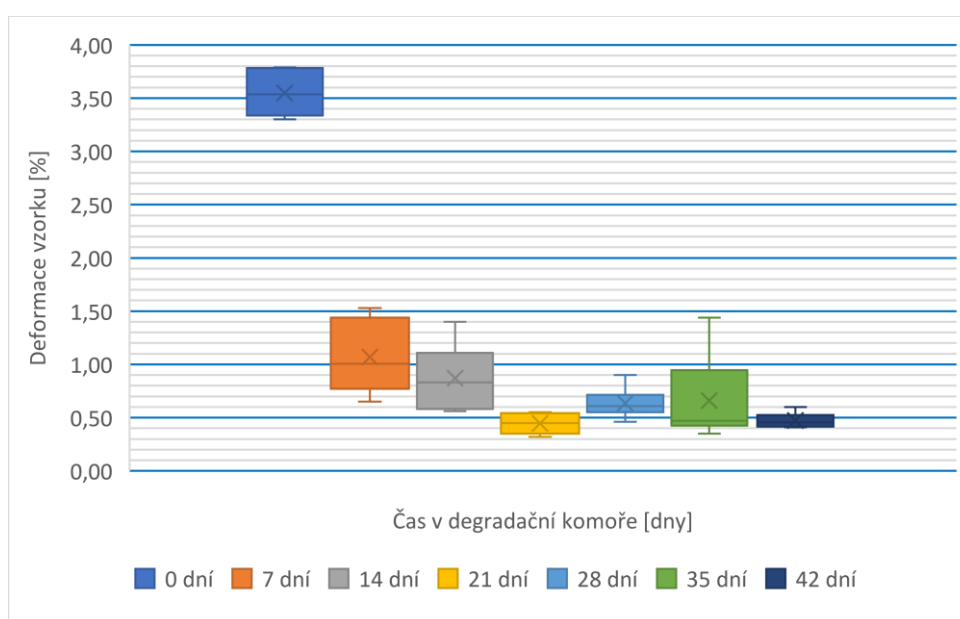


Graf 8 - Krabicový graf deformace transparentního epoxidového lepidla, [zdroj autor]

Maximální rozptyl hodnot deformace je zaznamenán u degradace 14 dnů, kde je variační koeficient deformace roven 52,18 %. Vysokou variabilitu zapříčiňuje vzorek „18 T“, kde byla zaznamenána vysoká hodnota deformace 3,09 %. Programem Microsoft Excel však tato hodnota nebyla označena jako odlehlá a není tak vyřazena z výpočtů.

5.2.2 Změna deformace epoxidového lepidla s obsahem oceli

V porovnání s transparentním epoxidovým lepidlem je deformace etalonových vzorků epoxidového lepidla s obsahem oceli (Graf 9) lehce vyšší a při jejich přetržení činí průměr hodnot 3,55 %. To značí vyšší houževnatost lepidla s příměsí oceli před začátkem degradačních cyklů. Začátkem působení umělého stárnutí se však tato houževnatost ztrácí a lepený spoj je přetržen již při poměrném prodloužení 1,07 % a rozdíl vůči etalonu je roven 69,89 %. Po 14 dnech stárnutí vzorků v klimatické komoře je zaznamenán pokles deformace o 75,48 %, následně po 21 dnech již o 87,46 % vůči etalonu. 28. den deformace vykazuje vyšší hodnotu deformace než v předchozím týdnu a pokles činí 82,10 %, 35. den o 81,40 % a ve 42. dnu degradace o 86,66 %. Minimální průměrná hodnota deformace je tak zaznamenána po 21 dnech stárnutí a od této hranice se výrazně nemění.

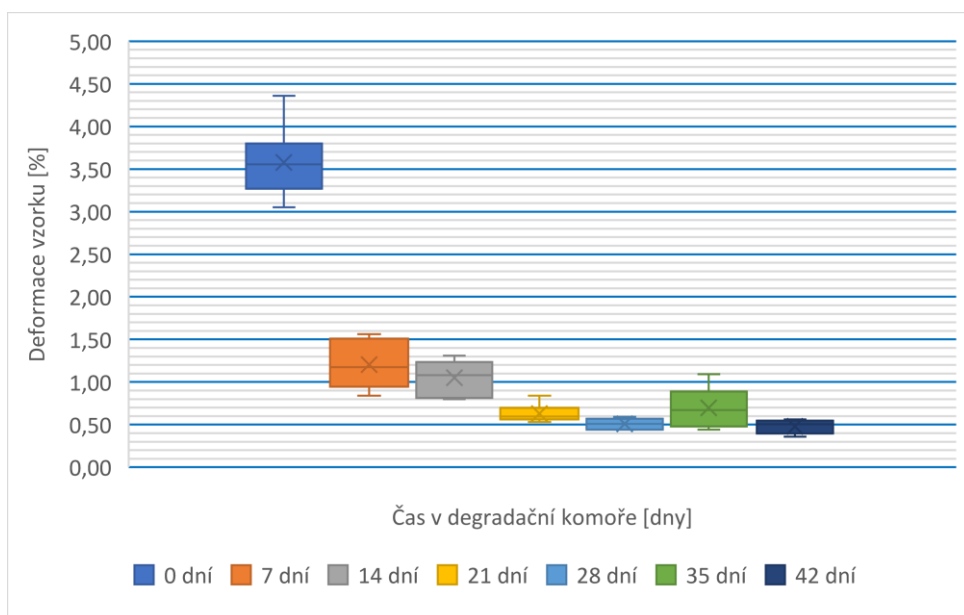


Graf 9 - Krabicový graf deformace epoxidového lepidla s obsahem oceli, [zdroj autor]

Statistické ukazatele variability vzorků ukazují, že k nejvyššímu rozptylu došlo u vzorků degradovaných 35 dnů, kde variační koeficient deformace činí 56,56 %. Takto výraznou variabilitu vzorků zapříčiňují vzorky „38 O“ (deformace 1,44 %) a „36 O“ (deformace 0,35 %). Nejnižší variační koeficient byl zaznamenán u etalonových vzorků, kde činí 5,37 %.

5.2.3 Změna deformace epoxidového lepidla s obsahem hliníku

Deformace epoxidového lepidla s hliníkovým plnivem (Graf 10) má velmi podobný, až skoro identický průběh jako lepidlo s obsahem oceli. Průměrná deformace etalonu činí 3,58 %, s variačním koeficientem 11,13 %, což značí relativně nízké odchyly hodnot od průměru. Deformační zkouška lepených spojů vystavených degradačním cyklům po 7 dní odhalila, že deformace těchto vzorků klesla na 1,2 %, tedy o 66,37 % v porovnání s etalonem. Deformace s pokračující dobou deformace dále klesá – 21. den o 82,39 % a 28. den o 85,79 %. 35. den je deformace vyšší než v předchozím týdnu (pokles vůči etalonu o 80,53 %), tento výsledek ale zkresluje značný rozptyl vzorků, kdy byla naměřena maximální hodnota 1,09 % a minimální 0,44 %. Po 42 dnech stárnutí lepených spojů deformace nadále klesá na 0,48 % a rozdíl činí 86,59 %. Výsledná průměrná hodnota deformace je tak téměř identická s epoxidovým lepidlem s obsahem oceli.

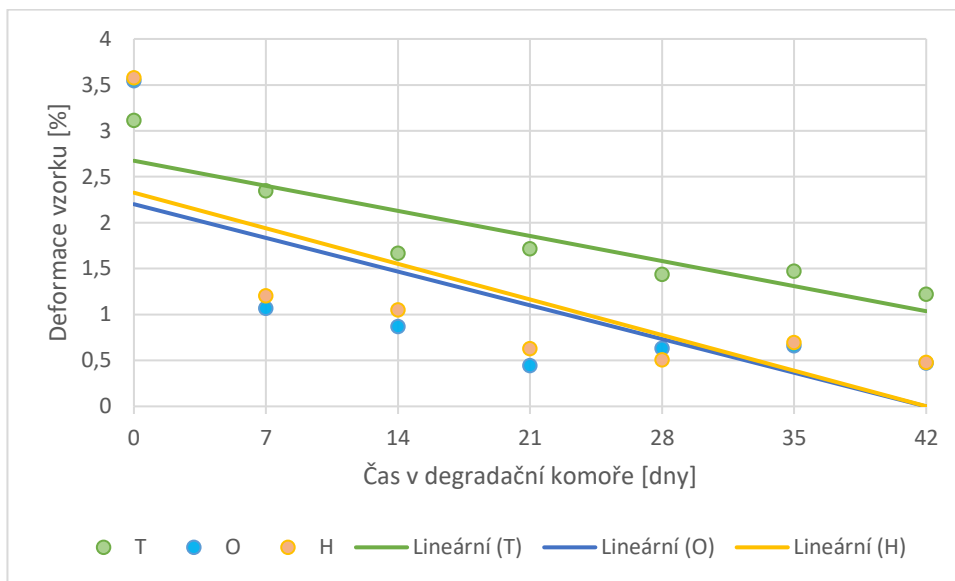


Graf 10 - Krabicový graf deformace epoxidového lepidla s obsahem hliníku, [zdroj autor]

Variační koeficient průměrných hodnot deformace se v průběhu různého degradačního času pohybuje v rozmezí 10,98 až 31,89 %. Nejvyšší variační koeficient 31,89 % vyšel u vzorků degradovaných 35 dnů, avšak z Grafu 8 je jasné, že průměr i medián se od lineárně klesající tendence grafu výrazně neodchyluje.

5.2.4 Porovnání hodnot deformace lepidel

V následujícím grafu jsou pro jednotlivé časy v degradační komoře bodem znázorněny průměrné hodnoty deformace všech zkoumaných lepidel. Porovnáním těchto bodů je zřejmé, že před počátkem degradačního působení jsou lepidla s příměsemi oceli a hliníku schopná většího poměrného prodloužení před destrukcí vzorků na univerzálním zkušebním stroji. Již po prvních dnech vzorky s těmito lepidly výrazně degradují a deformace několikanásobně klesá. Body grafu jsou proloženy lineární spojnicí trendu – ta u všech druhů lepidel vykazuje klesající tendenci a porovnává tak rychlost stárnutí lepidel.



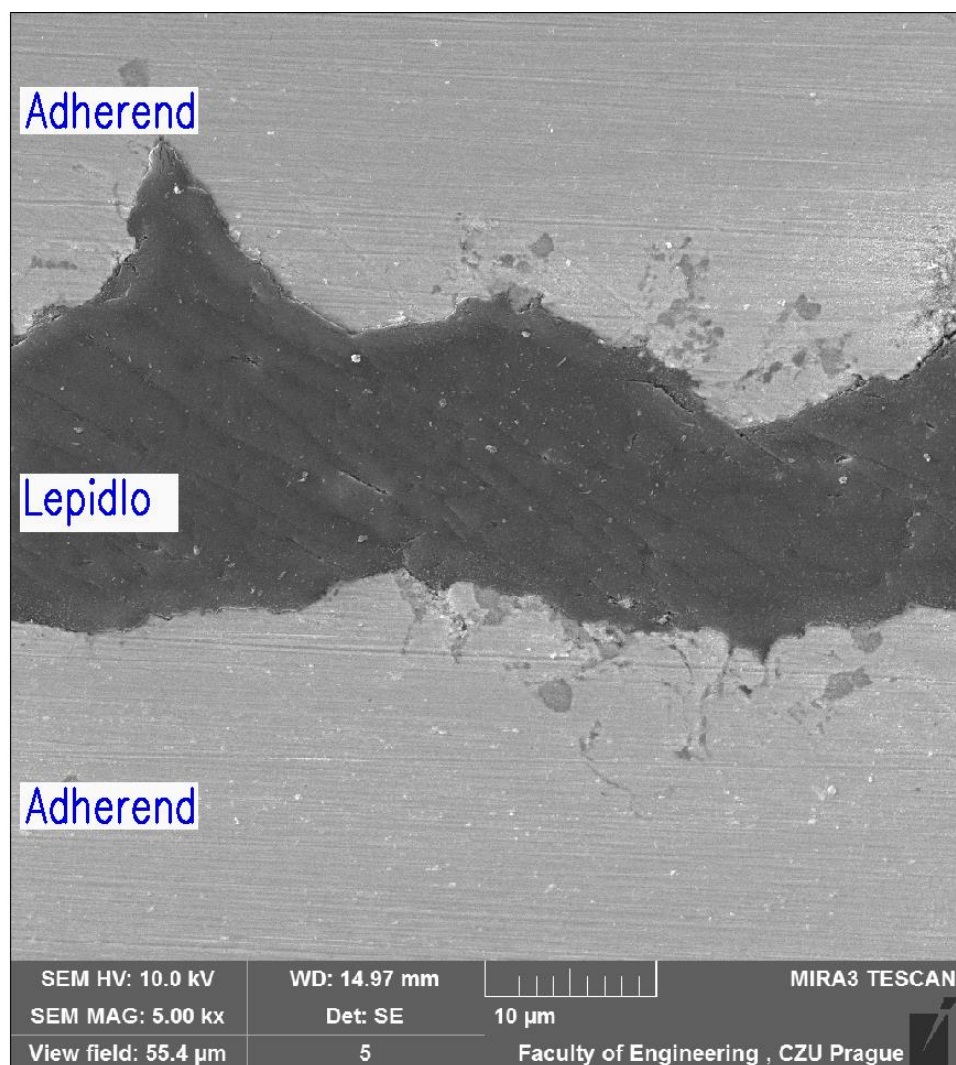
Graf 11 - Bodový graf porovnání změn deformace lepidel za čas, [zdroj autor]

6 Interpretace výsledků zkoumání mikroskopem

Vybrané snímky etalonu a degradovaných vzorků lepených spojů získané z rastrovacího elektronového mikroskopu Tescan MIRA3 GMU jsou zde popsány a porovnány. Další pořízené snímky jsou umístěny v příloze diplomové práce.

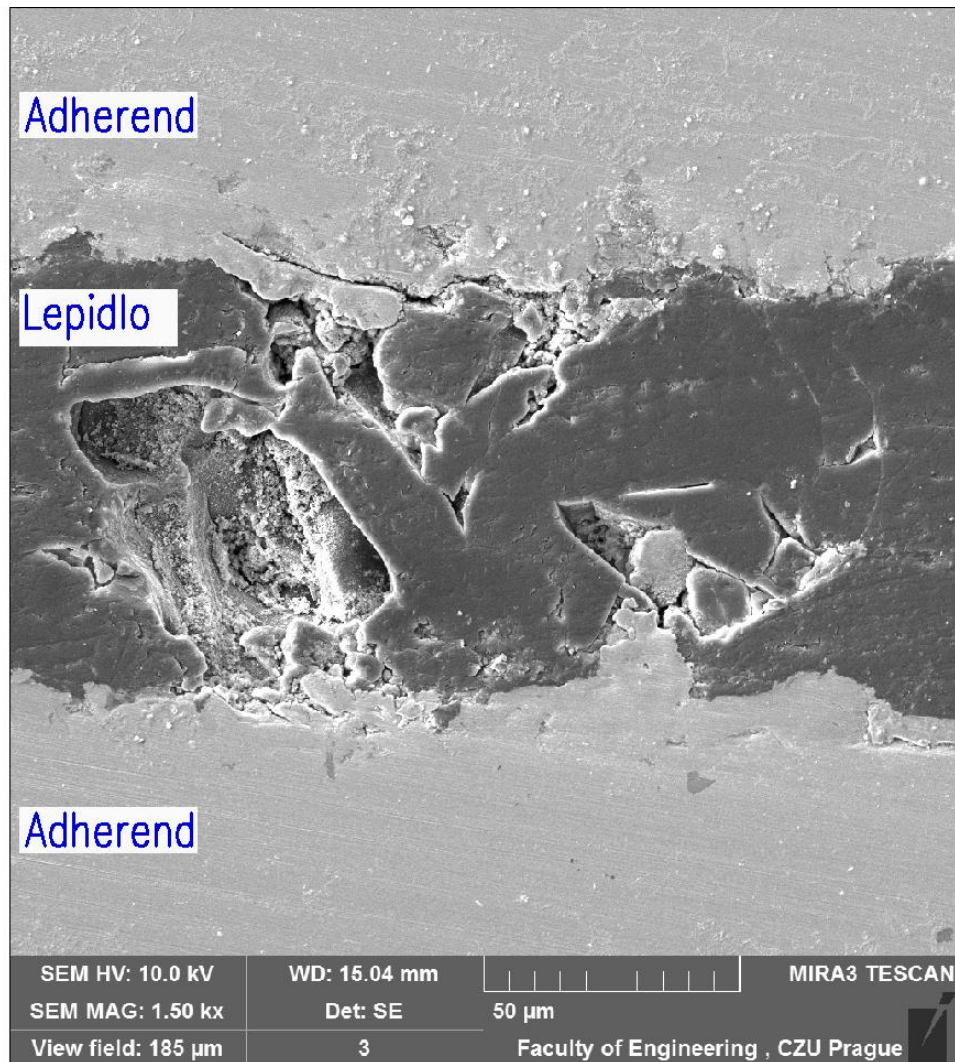
Transparentní epoxidové lepidlo

Snímek elektronového mikroskopu na Obrázku 31 zobrazuje řez lepeným spojem nedegradovaného transparentního epoxidového lepidla. Na obrázku je patrná dobrá smáčivost lepidla, textura tryskaného povrchu po mechanické povrchové úpravě adherendu a dobrá přilnavost lepidla k lepenému povrchu plechu. To značí dostatečnou povrchovou úpravu adherendu před lepením. Řez lepidlem neodhalil výrazné nedostatky adhezních sil ani vzduchové bubliny v lepeném spoji.



Obrázek 31 - Nedegradovaný vzorek „0 T“, snímek č.1, [zdroj autor]

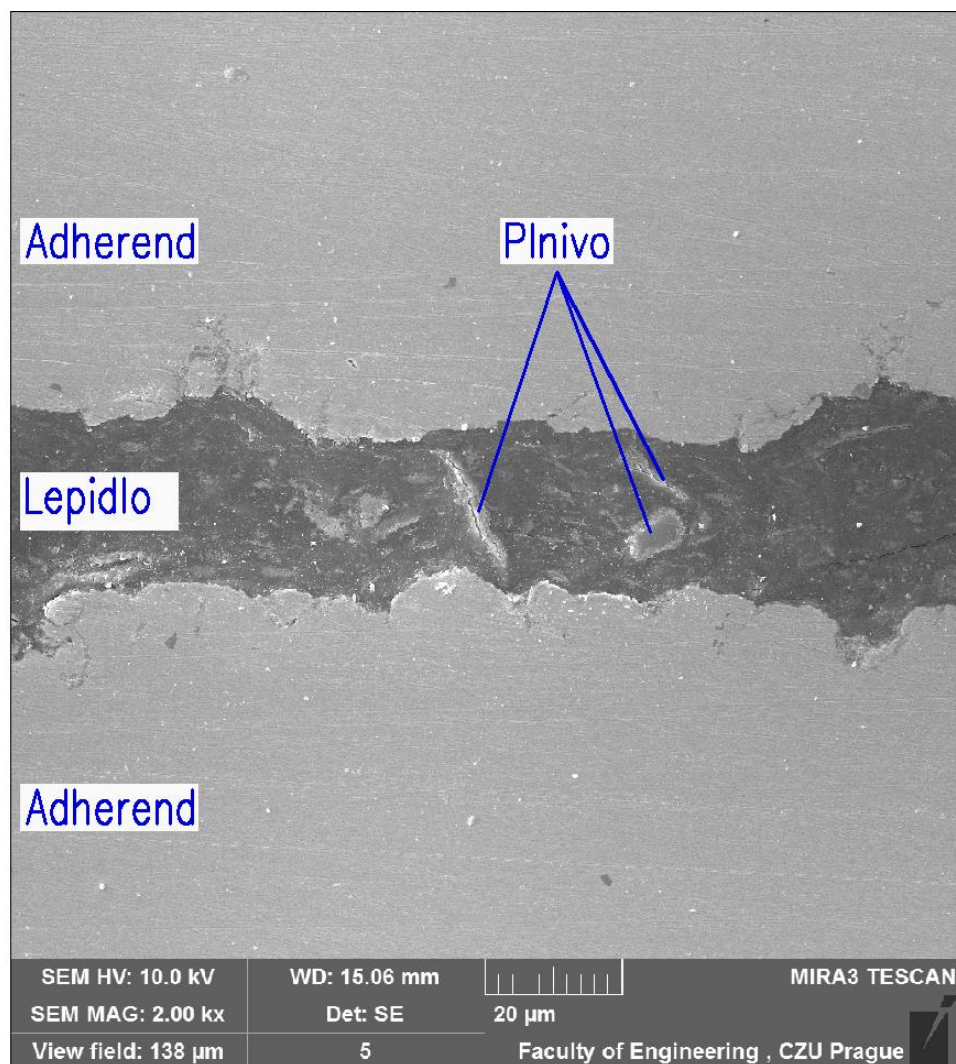
Tento druh lepidla prokázal pevnostními zkouškami určitou odolnost vůči degradačním vlivům teploty a vlhkosti, přesto zkoumání lepeného spoje transparentním epoxidovým lepidlem odhalilo značné stárnutí lepidla. Degradace je zobrazena na Obrázku 32, kde byla nalezena ve značném rozsahu uvnitř lepidla. Přes samotnou degradaci si však lepidlo stále zachovává adhezí integritu a nedochází zde i po vystavení degradačním klimatickým vlivům po 42 dnů k odlupování lepidla od adherendu.



Obrázek 32 - Degradovaný vzorek „42 T“, snímek č.1, [zdroj autor]

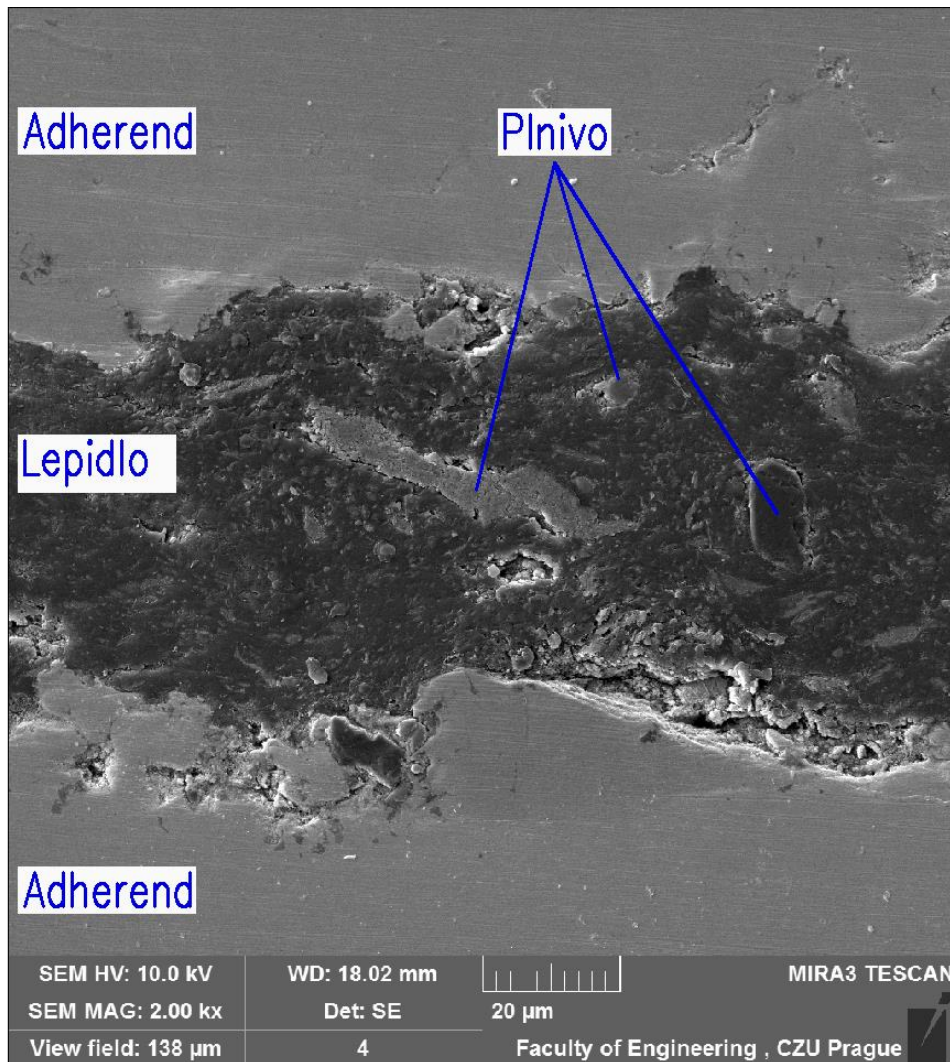
Epoxidové lepidlo s obsahem oceli

Do tohoto lepidla přimíchává výrobce ocelové plnivo, které má zvyšovat jeho pevnost. Zvýšená pevnost nedegradovaných vzorků lepených spojů byla potvrzena v předchozí kapitole. Zkoumání vzorku lepeného epoxidovým lepidlem s příměsí oceli odhaluje značné rozdíly ve velikostech plniva a dobrou smáčivost lepidla. Na obrázku 33 je zobrazen etalon, tedy nedegradovaný vzorek tohoto lepidla.



Obrázek 33 - Nedegradovaný vzorek „0 O“, snímek č.1, [zdroj autor]

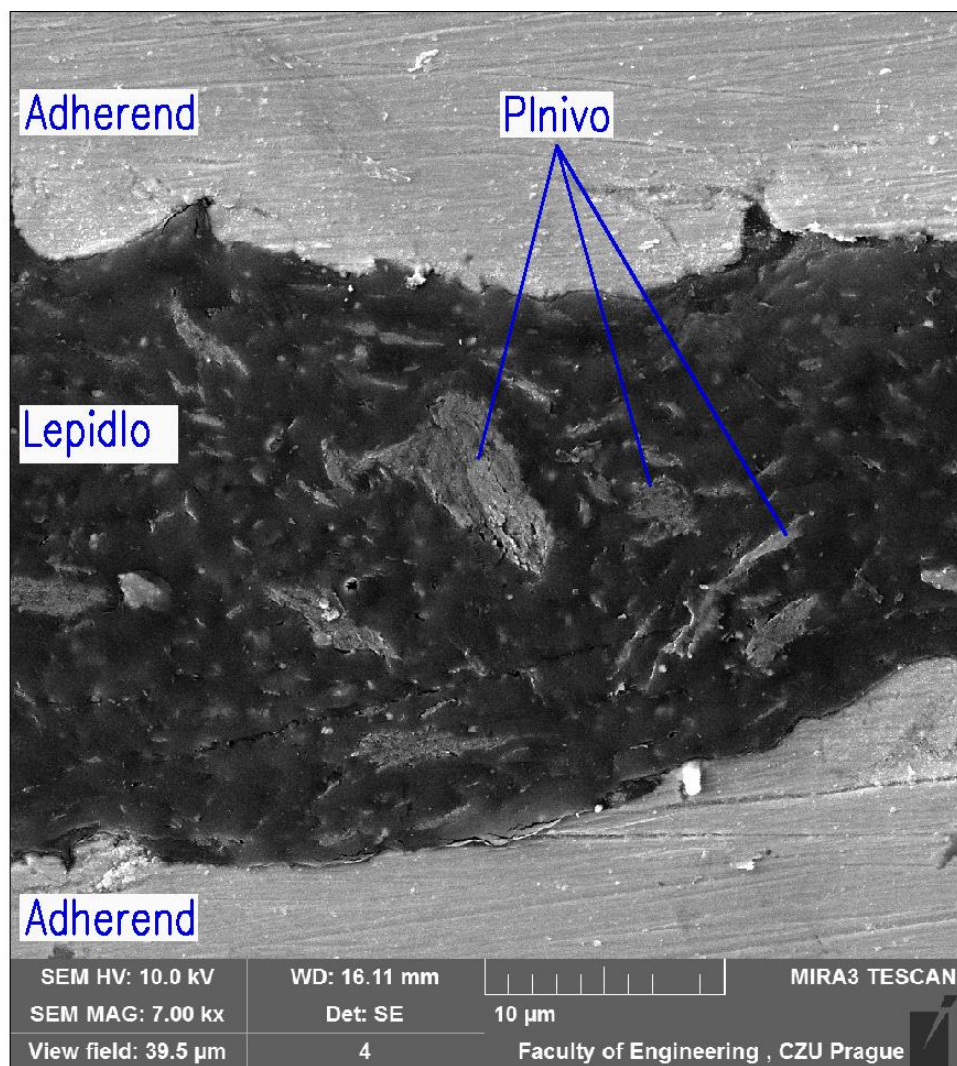
Výrazné snížení pevnosti epoxidového lepidla s obsahem oceli je zkoumáním elektronovým mikroskopem odůvodněno rozsáhlým působením koroze v lepeném spoji (Obrázek 34). Koroze adherendu se rozšířila následně i do struktury lepidla, kde korodují i některé částice ocelového plniva. Takto degradovaný vzorek ztrácí svou pevnost a při jeho namáhání následně dochází k adhezně-koheznímu porušení. Ztráta adhezních sil je přisuzována podkorodování a lom strukturou lepidla je přisuzován trhlinou šířící se kolem degradovaných částic ocelového plniva lepidla. Další snímky degradovaného lepeného spoje jsou umístěny v přílohách diplomové práce



Obrázek 34 - Degradovaný vzorek „35 O“, snímek č.1, [zdroj autor]

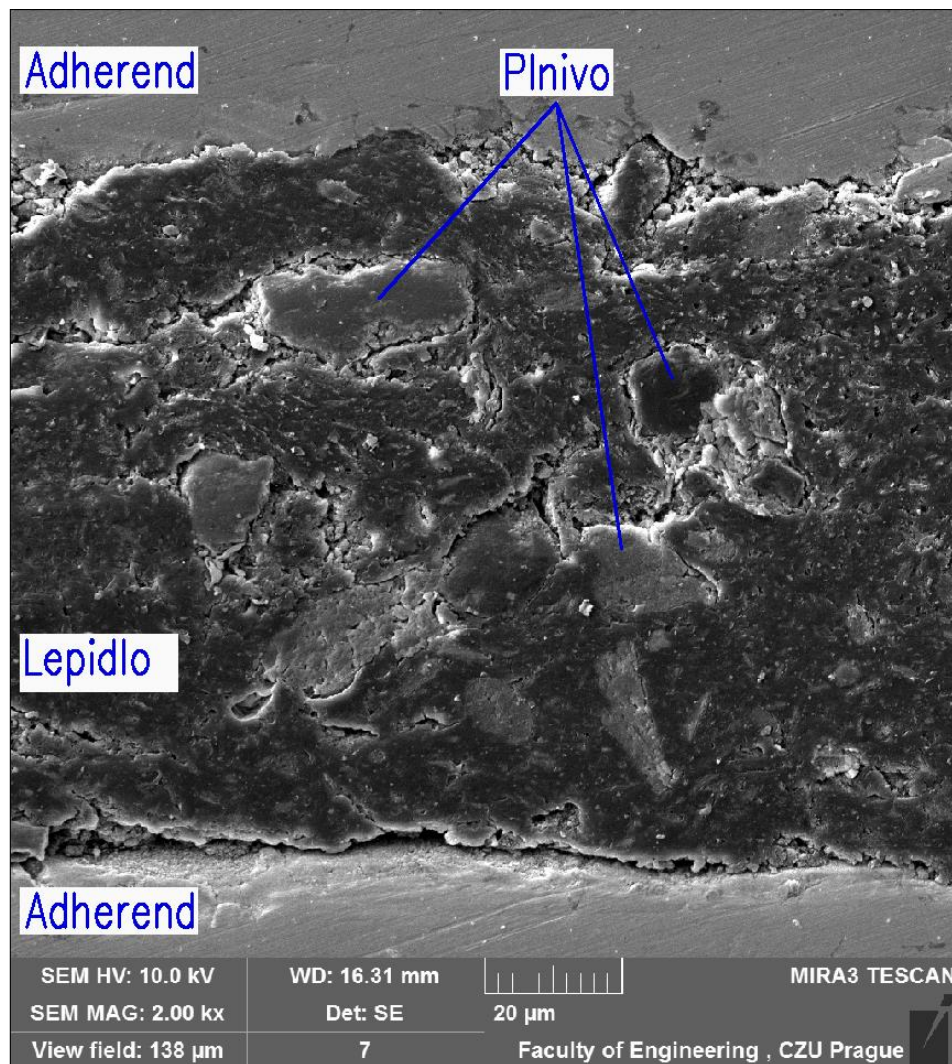
Epoxidové lepidlo s obsahem hliníku

Na Obrázku 35 je zobrazen snímek etalonu epoxidového lepidla s hliníkovým plnivem z elektronového mikroskopu, který odhaluje strukturní stálost epoxidového lepidla a velké množství částic hliníkového plniva různých velikostí. Snímek elektronového mikroskopu s přiblížením 7 000x nezobrazil nedostatečnou smáčivost lepidla ani známky odlupování lepidla od adherendu, což by značilo nedostatečnou povrchovou úpravu materiálu před samotným lepením vzorků.



Obrázek 35 - Nedegradovaný vzorek „0 H“, snímek č.1, [zdroj autor]

Velké množství hliníkových částic v lepidle zpočátku zvyšovalo pevnost etalonu lepeného spoje, avšak stejně jako u epoxidového lepidla s příměsí oceli i zde se degradace výrazně šíří lepidlem právě díky těmto kovovým částicím. Stárnutím v degradační komoře se na rozhraní lepidla a adherendu rozšiřuje koroze, která znemožňuje lepidlu ponechat si svou adhezní schopnost a koroze na povrchu hliníkového plniva podporuje snížení kohezní soudržnosti lepidla. Degradace uvnitř lepidla i na rozhraní lepidla a adherendu snižující pevnost spoje je zobrazena na Obrázku 36 níže.



Obrázek 36 - Degradovaný vzorek „35 H“, snímek č.1, [zdroj autor]

7 Doplnující informace o odchylkách experimentu

Informace o zkušebních tělesech, u kterých při měření došlo k porušení adherendu:

U žádných ze zkoušených vzorků nedošlo k porušení adherendu, žádné vzorky proto nebyly vyřazeny z výsledků experimentu.

Informace o odchylkách od předepsaného postupu a okolnosti, které by mohly ovlivnit výsledky:

- V průběhu experimentu byly vyřazeny vzorky:

„14 H“ a „42 O“ – lepené spoje určené pro zkoumání mikroskopem se při řezu na pásové pile rozpadly z důvodu selhání adhezních sil. Z každé série degradovaných vzorků byl pro zkoumání mikroskopem vždy vyčleněn pouze 1 lepený spoj, proto nebylo možné tyto porušené vzorky nahradit.

„1 T“ – vyřazen z důvodu odlehle hodnoty pevnosti zjištěné destruktivní zkouškou.

„42 H“ – vzorek byl vyřazen z důvodu nedostatečného vyleštění před zkoumáním rastrovacím elektronovým mikroskopem. Byl nahrazen vzorkem „35 H“, tedy o jeden týden méně degradovaný vzorek. Výsledky jsou i přes tuto náhradu vypovídající.

- Nebyla přesně kontrolována tloušťka vrstvy lepidla při přípravě vzorků – různá tloušťka mohla mít částečný vliv na variabilitu hodnot pevnosti lepených spojů.

8 Ekonomické zhodnocení

Ekonomické zhodnocení diplomové práce vychází z hodnot Tabulky 1 (str. 26), která udává rozdíl použití jednotlivých technologií spojování materiálu automobilů Škoda Fabia II a Fabia III. Cílem je vypočítat celkovou cenu použitého lepidla pro oba automobily a následně porovnání hodnot. Výpočet zahrnuje cenu epoxidových lepidel od firmy Hortex, které byly použity pro experimentální část diplomové práce. Cena transparentního epoxidového lepidla je 166 Kč za kus. Cena epoxidového lepidla s obsahem oceli a s obsahem hliníku se shoduje a činí 257 Kč za kus. Objem lepidla v jednom kusu zakoupeného lepidla je 24 000 mm³. Šířka lepených ploch je převzatá z normy ČSN EN 1465, kde je doporučena délka přeplátování lepených spojů 25 mm.

	Délka lepených spojů [mm]	Lepená plocha [mm ²]	Objem lepidla [mm ³]	Celková cena transparentního lepidla [Kč]	Celková cena lepidla s příměsí [Kč]
Fabia II	27 657	691 425	34 571,25	239,12	370,20
Fabia III	35 399	884 975	44 248,75	306,05	473,83

Tabulka 4 - Ekonomické zhodnocení, [zdroj autor]

Z výpočtu potřebného objemu lepidla pro oba vozy Škoda Fabia (Tabulka 4) vyplývá, že při použití transparentního epoxidového lepidla firmy Hortex je celková cena za použité lepidlo 239 Kč u vozu Fabia II a pouze 306 Kč automobilu Fabia III. Cena pevnějších epoxidových lepidel s plnivem oceli nebo hliníku je vyšší a pro automobil Fabia II vychází 370 Kč a vozu Fabia III celkově 474 Kč. Ve srovnání s pořizovací cenou základního modelu Fabia III 234 900 Kč se jedná o velmi nepatrnou částku a automobilka je tak tímto směrem schopna snižovat náklady na výrobu automobilu. [45]

Výpočet nákladů na lepení karosérie automobilu je jediným logickým ekonomickým zhodnocením, které má jistou vypovídající hodnotu. Porovnat různé technologie spojování materiálu je neproveditelné, jelikož nejsou k dispozici důležitá data potřebná k výpočtu nákladů.

9 Závěr a přínos práce

Teoretická východiska diplomové práce pomocí literární rešerše shrnula obecné poznatky o technologii lepení, velmi prestižní metodě spojování materiálu. Nejdůležitější částí teoretické části byl popis degradačních vlivů působících na lepený spoj zapříčiňujících jeho stárnutí a snižování pevnosti. Degradační vlivy mají významný vliv na pevnost a samotnou integritu lepených spojů, proto je toto téma významné a problematika aktuální. Poznatky z teoretické části diplomové práce sloužily jako podklad pro experimentální část.

Výzkum diplomové práce spočíval ve vystavení vzorků lepených spojů epoxidovými lepidly české firmy Hortex, s. r. o., degradačním vlivům v klimatické komoře. Série vzorků po 7 kusech byly umístěny v klimatické komoře po 7, 14, 21, 28, 35 a 42 dnů, za působení extrémních teplot a vlhkosti v cyklickém opakování. 6 z těchto 7 vzorků bylo každý týden vyjmuty z klimatické komory a podrobena zkoušce pevnosti ve smyku tahovým namáháním na univerzálním zkušebním stroji. Poslední ze 7 degradovaných vzorků byl zpracován pro zkoumání rastrovacím elektronovým mikroskopem. Výstupy obou metod zkoumání byly v diplomové práci detailně popsány a výsledky zhodnoceny. Součástí praktické části je ekonomické zhodnocení, byly vypočteny náklady související s lepením karosérie automobilu Škoda Fabia.

Experiment prokázal částečnou pevnostní stálost při stárnutí transparentního epoxidového lepidla Hortex, s. r. o., které po 42 dnech vystavení degradačním vlivům teploty a vlhkosti snížilo svou pevnost o pouhých 27,53 %. Nestálost pevnosti prokázal experiment u stárnutí epoxidových lepidel s příměsemi oceli a hliníku firmy Hortex, s. r. o. Již po 7 dnech vystavení vzorků degradačním podmínkám byl zaznamenán pokles pevnosti o 43,39 % u lepidla s příměsí oceli a o 46,53 % u lepidla s obsahem hliníku. Výsledný pokles pevnosti po 42 dnech degradace lepených spojů činil 68,59 % epoxidového lepidla s ocelí, a dokonce 71,94 % epoxidového lepidla s hliníkem. Při tvorbě a následných destruktivních zkouškách

pevnosti etalonu lepených spojů jednotlivých lepidel bylo dokázáno, že lepidla s plnivem oceli a hliníku mají díky těmto příměsím zvýšenou pevnost, po vystavení degradačním vlivům však obsah těchto plniv podporuje šíření koroze lepeným spojem, a proto byl zaznamenán takto náhlý pokles pevnosti.

Technický list epoxidových lepidel firmy Hortex, s. r. o. sídlící v Hradci Králové udává doporučené použití lepidel. Dle technického listu jsou na lepení oceli nejvhodnější epoxidová lepidla s obsahem oceli a hliníku, zatímco transparentní epoxidové lepidlo je vhodnější použít pro lepení kamene než kovů. Tento údaj technického listu byl výzkumem potvrzen, jelikož etalon lepených spojů lepidel s příměsemi prokázal destruktivní zkouškou pevnosti ve smyku tahovým namáháním vyšší pevnost než lepidlo transparentní.

Návrhem pro zvýšení pevnosti degradovaných lepených spojů použitých lepidel je nátěr primery při tvorbě spojů, který po vytvrzení lepidel zvyšuje jejich adhezní pevnost. Dalším doporučením je ochranný nátěr lepeného spoje po vytvrzení lepidla, který je schopen částečně chránit samotné lepidlo od extrémních vnějších vlivů, které mohou snižovat adhezní a kohezní integritu lepidel.

Výrobce lepidel na technickém listě uvádí: „*Všechna udaná data jsou založena na laboratorních měřeních a četných zkušenostech od zákazníků. Byla sestavena pečlivě, přesto však nezakládají právní nárok na odvolání.*“ Na doplňující dotazy týkajících se zmíněných laboratorních zkoušek se výrobce nevyjádřil a není tak možné porovnat metodiku měření pevnosti lepených spojů výrobce s diplomovou prací.

Přínosem diplomové práce jsou výsledky experimentální části, které mohou stát jako základ pro údaje technického listu výrobce. V práci je pro doplnění údajů o vlastnostech lepidel vypočten předpoklad konce životnosti epoxidových lepidel při vystavení lepených spojů definovaným degradačním procesům.

Námětem k diskusi může být důvod výrazného poklesu pevnosti epoxidových lepidel s ocelovým a hliníkovým plnivem již po 7 dnech stárnutí, jelikož výrobce uvádí teplotní odolnost lepidel -50 až $+145$ °C a slovně popisuje lepidla jako odolná vůči vodě. Je tím myšlena odolnost lepidel při krátkodobém ponoření do vody? Může být hlavním degradačním činitelem kombinace vlivů teploty a vlhkosti?

10 Citované zdroje

- [1] W. Brockmann, P. L. Geiss, J. Klingen a B. Schroder, Adhesive bonding - Materials, Applications and Technology, Wiley-VCH, 2009.
- [2] J. Peterka, Lepení konstrukčních materiálu ve strojírenství, Praha: Nakladatelství technické literatury, 1980.
- [3] O. Mezelínek, Lepení kovů ve strojírenství, Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1961.
- [4] P. Briš, J. Kuběna a J. Štrkaň, Lepení v praxi, Praha: Grada Publishing, 2017.
- [5] O. Čada, Lepení plastů a pryže navzájem a s jinými materiály, Praha: ČSVTS - společnost pro průmyslovou chemii, 1985.
- [6] I. Fraunhofer, „Based introductory learning course,“ 2012. [Online]. Available: crayons.ifam.fraunhofer.de. [Přístup získán 2 2022].
- [7] ČSN EN 13887, Konstrukční lepidla - Směrnice pro přípravu povrchu kovů a plastů před lepením., Praha: Český normalizační institut, 2004.
- [8] LEAR, a.s., „Základy teorie lepení,“ 2013. [Online]. Available: http://users.fs.cvut.cz/libor.benes/vyuka/lepeni/Teorie_lepeni%20_%20LEAR.pdf. [Přístup získán 1 2022].
- [9] M. Osten, Práce s lepidly a tmely, Praha: SNTL - Státní nakladatelství technické literatury, 1987.
- [10] J. Pokorný, Lepení a tmelení v dílně i domácnosti: [dřevo, kovy, plasty, sklo, a další materiály a výrobky]., Praha: Grada, 2000.
- [11] D. Hrdličková, Strojírenská technologie III pro strojírenské učební obory., Praha: SNTL, 1982.
- [12] Kraus, Povrch a jejich úpravy, Plzeň: Západočeská univerzita, 2000.

- [13] L. Ptáček, *Nauka o materiálu II. 2. opravené a rozšířené vydání*, Brno: CERM, 2002.
- [14] L. Kovačič, *Lepenie kovov a plastov 2. opravené vydanie*, Bratislava: Alfa, Vydavateľstvo technologickej a ekonomickej literatúry, 1984.
- [15] A. S. Frejdin, *Pevnosť a životnosť lepených spojov*, 1. slov. vyd., Bratislava: Alfa, 1988.
- [16] A. Badiie, I. Ashcroft a R. Wildman, „The thermo-mechanical degradation of ethylene vinyl acetate used as a solar panel adhesive and encapsulant,“ *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 7. 2016.
- [17] B. J. Anderson, „Thermal stability of high temperature epoxy adhesives by thermogravimetric and adhesive strength measurements,“ *Polym Degrad Stab*, 2011.
- [18] B. Schneider, V. Beber, J. Schweer, M. Brede a B. Mayer, „An experimental investigation of the fatigue damage behaviour of adhesively bonded joints under the combined effect of variable amplitude stress and temperature variation,“ *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 6. 2018.
- [19] G. Guofeng, N. Jingxin, M. Wenlong a T. Wei, „Effect of thermal cycling on the degradation of adhesively bonded CFRP/aluminum alloy joints for automobiles,“ *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 12 2019.
- [20] V. Ducháček, *Polymery*, 2. přeprac. vyd., Praha: Vydavatelství VŠCHT, 2006.
- [21] J. van Dam, S. Abrahami, A. Yilmaz, Y. Gonzalez-Garcia, H. Terryn a J. Mol, „Effect of surface roughness and chemistry on the adhesion and durability of a steel-epoxy adhesive interface,“ *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 1. 2020.
- [22] N. Hirulkar, P. Jaiswal, P. Reis a J. Ferreira, „Effect of hygrothermal aging and cyclic thermal shocks on the mechanical performance of single-lap adhesive joints,“ *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 6. 2020.
- [23] A. R. Zaeri a H. S. Googarchin, „Experimental investigation on environmental degradation of automotive mixed-adhesive joints,“ *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 3 2019.

- [24] S. Sander, G. Meschut, U. Kroll a A. Matzenmiller, „Methodology for the systematic investigation of the hygrothermal-mechanical behavior of a structural epoxy adhesive,“ *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 3 2022.
- [25] J. Kropka, D. Adolf, S. Spangler, K. Austin a R. Chambers, „Mechanisms of degradation in adhesive joint strength: Glassy polymer thermoset bond in a humid environment,“ *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 12. 2015.
- [26] M. Gude, S. Prolongo a A. Urena, „Hygrothermal ageing of adhesive joints with nanoreinforced adhesives and different surface treatments of carbon fibre/epoxy substrates,“ *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 1. 2013.
- [27] J. Weiss, M. Voigt, C. Kunze, J. Huacuja Sánchez, W. Possart a G. Grundmeier, „Ageing mechanisms of polyurethane adhesive/steel interfaces,“ *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 10. 2016.
- [28] J. Zimmermann, T. Schalm, M. Z. Sadeghi a K. U. Schroder, „Empirical investigations on the effects of ionizing radiation on epoxy structural adhesives and resins: An overview,“ *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 11 2021.
- [29] C. Kothe, J. Wunsch a B. Weller, „Discoloration of transparent adhesives for building applications due to aging under solar exposure,“ *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 3. 2022.
- [30] K. Machalická, M. Vokáč a M. Eliášová, „Influence of artificial aging on structural adhesive connections for façade applications,“ *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 6. 2018.
- [31] J. Sousa, J. Correia a S. Cabral-Fonseca, „Some permanent effects of hygrothermal and outdoor ageing on a structural polyurethane adhesive used in civil engineering applications,“ *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 9 2018.
- [32] G. K. Habenicht, Grundlagen, Technologien, Anwendung, Berlin: Springer, 2002.
- [33] ČSN EN ISO 11339-2010, Lepidla - T-zkouška v odlupování slepů z ohebných adherendů, Praha: Český normalizační institut, 2005.

- [34] ČSN 66 8511, Zkoušky lepených spojů (kov s kovem). Zkouška lámavosti lepených spojů, Praha: Český normalizační institut, 1960.
- [35] ČSN EN 1465, Lepidla - Stanovení pevnosti ve smyku při tahovém namáhání přeplátovaných lepených soustav., Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví., 2009.
- [36] T. Pilvousek, „MM Průmyslové spektrum,“ 06 2017. [Online]. Available: <https://www.mmspektrum.com/clanek/lepeni-ve-vyrobe-karoserie>. [Přístup získán 1 2022].
- [37] J. Antelo, A. Akhavan-Safar, R. Carbas, E. Marques, R. Goyal a L. da Silva, „Replacing welding with adhesive bonding: An industrial case study,“ *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 3 2022.
- [38] „ksp.tul,“ [Online]. Available: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/stud_materialy/spt/lepeni.pdf. [Přístup získán 2 2022].
- [39] HORTEX, s.r.o., „Průmyslová chemie HORTEX technology,“ 2020. [Online]. Available: <http://www.hortex.cz/>. [Přístup získán 10 2021].
- [40] ČSN ISO 10365, Lepidla - Označení hlavních typů porušení lepeného spoje, Praha: Český normalizační institut, 1995.
- [41] ČSN EN ISO 9142, Lepidla - Směrnice k výběru laboratorních podmínek stárnutí pro hodnocení lepených spojů, Praha: Český normalizační institut, 2004.
- [42] ©. M. 2022, „Jak vytvořit krabicový graf,“ [Online]. Available: <https://support.microsoft.com/cs-cz/office/jak-vytvo%C5%99it-krabicov%C3%BD-graf-62f4219f-db4b-4754-aca8-4743f6190f0d>. [Přístup získán 2 2022].
- [43] P. Lasák, „Krabicový grad - Boxplot - Excel,“ 19 9 2020. [Online]. Available: <https://office.lasakovi.com/excel/grafy/krabicovy-graf-boxplot-excel/>.
- [44] R. Hindls, M. Artlová, S. Hronová, I. Malá, L. Marek, I. Pecáková a H. Řezanková, Statistika v ekonomii, Professional publishing, 2018.

[45] P. Prokopec, „Autoforum,“ 2 10 2014. [Online]. Available: <https://www.autoforum.cz/predstaveni/skoda-fabia-iii-ma-sve-ceny-ve-slusne-vybave-zacinaji-na-239-900-kc/>. [Přístup získán 3 2022].

Seznam obrázků

Obrázek 1 - Schéma struktury lepeného spoje, [2], vlastní zpracování	3
Obrázek 2 - Klasické teorie dělení adheze, [1], vlastní zpracování.....	4
Obrázek 3 - Porovnání smáčivosti různých povrchů, [6]	4
Obrázek 4 - Základní konstrukční možnosti plochých lepených spojů, [9], vlastní zpracování..	9
Obrázek 5 - Druhy nerovností povrchu adherendu, [10]	10
Obrázek 6 - Zkouška pevnosti tahem "natupo", [1], vlastní zpracování	18
Obrázek 7 - Tupý spoj na ploše (vlevo) a zkosený spoj (vpravo), [4] , vlastní zpracování	19
Obrázek 8 - T – zkouška odloupenutí, [33], vlastní zpracování	19
Obrázek 9 - Zkouška odloupenutí pomocí válečků, [4], vlastní zpracování.....	20
Obrázek 10 - Zkouška lámavosti, [34] , vlastní zpracování	20
Obrázek 11 - Upnutí zkušební tělesa v čelistech měřicího zařízení, [zdroj autor]	21
Obrázek 12 - Pevnost ve smyku při namáhání krutem (vlevo) a pevnost ve smyku při namáhání tlakem (vpravo), [4], vlastní zpracování.....	21
Obrázek 13 - Možnosti aplikace lepení v konstrukci karoserie osobního vozidla, [36].....	22
Obrázek 14 - Povrchová úprava vzorku, [zdroj autor]	26
Obrázek 15 - Tryskací komora PK – ITB 65, [zdroj autor]	27
Obrázek 16 - Kompresor Kaeser SM 9, [zdroj autor]	27
Obrázek 17 - Značení vzorků experimentu, [zdroj autor].....	28
Obrázek 18 - Tabulové padací nůžky NTC 2530/4 [zdroj autor].....	29
Obrázek 19 - Diagram cyklu D4, [40], vlastní zpracování	30
Obrázek 20 - Programovatelná klimatická komora Binder MKF240, [zdroj autor]	30
Obrázek 21 - Univerzální zkušební stroj LabTest 5.50ST, [zdroj autor]	31

Obrázek 22 - Pracovní plocha programu LT Test&Motion, [zdroj autor]	31
Obrázek 23 - Příklad a popis krabicového grafu, [43].....	33
Obrázek 24 - Pásová pila Pilous ARG 190 plus, [zdroj autor]	35
Obrázek 25 - Řez vzorku určeného pro analýzu mikroskopem, [zdroj autor]	36
Obrázek 26 - Sekundové lepidlo Bison Super Glue, [zdroj autor]	36
Obrázek 27 - Příprava vzorku před leštěním, [zdroj autor]	36
Obrázek 28 - Kotoučová bruska na rozbor materiálu, [zdroj autor]	37
Obrázek 29 - Naprašovačka Quorum Q150R ES, [zdroj autor]	38
Obrázek 30 - Rastrovací elektronový mikroskop Tescan MIRA3 GMU, [zdroj autor]	38
Obrázek 31 - Nedegradovaný vzorek „0 T“, snímek č.1, [zdroj autor]	51
Obrázek 32 - Degradovaný vzorek „42 T“, snímek č.1, [zdroj autor]	52
Obrázek 33 - Nedegradovaný vzorek „0 O“, snímek č.1, [zdroj autor]	53
Obrázek 34 - Degradovaný vzorek „35 O“, snímek č.1, [zdroj autor].....	54
Obrázek 35 - Nedegradovaný vzorek „0 H“, snímek č.1, [zdroj autor]	55
Obrázek 36 - Degradovaný vzorek „35 H“, snímek č.1, [zdroj autor].....	56

Seznam grafů

Graf 1 - Krabicový graf pevnosti transparentního epoxidového lepidla, [zdroj autor]	40
Graf 2 - Prognóza trendu pevnosti transparentního epoxidového lepidla, [zdroj autor]	41
Graf 3 - Krabicový graf pevnosti epoxidového lepidla s obsahem oceli, [zdroj autor].....	42
Graf 4 - Prognóza trendu pevnosti epoxidového lepidla s obsahem oceli, [zdroj autor].....	43
Graf 5 - Krabicový graf pevnosti epoxidového lepidla s obsahem hliníku, [zdroj autor]	44
Graf 6 - Prognóza trendu pevnosti epoxidového lepidla s obsahem hliníku, [zdroj autor]	45
Graf 7 - Bodový graf porovnání změn pevnosti lepidel za čas, [zdroj autor]	46
Graf 8 - Krabicový graf deformace transparentního epoxidového lepidla, [zdroj autor]	47
Graf 9 - Krabicový graf deformace epoxidového lepidla s obsahem oceli, [zdroj autor].....	48
Graf 10 - Krabicový graf deformace epoxidového lepidla s obsahem hliníku, [zdroj autor]....	49
Graf 11 - Bodový graf porovnání změn deformace lepidel za čas, [zdroj autor].....	50

Seznam tabulek

Tabulka 1 - Generační rozdíly Fabia II a Fabia III v technologii svařování a lepení, [36]	23
Tabulka 2 - Lepené spoje karosérie automobilu, [38]	23
Tabulka 3 - Typy porušení lepeného spoje, [30], vlastní zpracování.....	34
Tabulka 4 - Ekonomické zhodnocení, [zdroj autor]	57

Seznam rovnic

Vztah 1 - Pevnost ve smyku	32
Vztah 2 - Aritmetický průměr	32
Vztah 3 - Směrodatná odchylka	32
Vztah 4 - Variační koeficient	33

Seznam příloh

Příloha 1 - Technická a všeobecná data lepidel Hortex, [39]	1
Příloha 2 - Technický list, Epoxidové lepidlo transparentní, [39]	2
Příloha 3 - Technický list, Epoxidové lepidlo s obsahem oceli, [39]	3
Příloha 4 - Technický list, epoxidové lepidlo s obsahem hliníku, [39]	4
Příloha 5 – Tabulka výstupních hodnot destruktivní zkoušky pevnosti – Transparentní epoxidové lepidlo	5
Příloha 6 - Tabulka výstupních hodnot destruktivní zkoušky pevnosti – Epoxidové lepidlo s obsahem oceli.....	6
Příloha 7 - Tabulka výstupních hodnot destruktivní zkoušky pevnosti – Epoxidové lepidlo s obsahem hliníku.....	7
Příloha 8 - Tabulka prognózy trendu pevnosti transparentního epoxidového lepidla	8
Příloha 9 - Tabulka prognózy trendu pevnosti epoxidového lepidla s obsahem oceli.....	9
Příloha 10 - Tabulka prognózy trendu pevnosti epoxidového lepidla s obsahem hliníku.....	9
Příloha 11 - Měření tloušťky vrstvy lepidla zkoumaných vzorků.....	10
Příloha 12 - Nedegradovaný vzorek „0 T“, snímek č.2	11
Příloha 13 - Nedegradovaný vzorek „0 T“, snímek č.3	12
Příloha 14 - Nedegradovaný vzorek „0 T“, snímek č.4	13
Příloha 15 - Degradovaný vzorek „42 T“, snímek č.2	14
Příloha 16 - Degradovaný vzorek „42 T“, snímek č.3	15
Příloha 17 - Degradovaný vzorek „42 T“, snímek č.4	16
Příloha 18 - Nedegradovaný vzorek „0 O“, snímek č.2.....	17
Příloha 19 - Nedegradovaný vzorek „0 O“, snímek č.3.....	18
Příloha 20 - Nedegradovaný vzorek „0 O“, snímek č.4.....	19
Příloha 21 - Degradovaný vzorek „35 O“, snímek č.2.....	20
Příloha 22 - Degradovaný vzorek „35 O“, snímek č.3.....	21
Příloha 23 - Degradovaný vzorek „35 O“, snímek č.4.....	22
Příloha 24 - Nedegradovaný vzorek „0 H“, snímek č.2.....	23
Příloha 25 - Nedegradovaný vzorek „0 H“, snímek č.3.....	24
Příloha 26 - Nedegradovaný vzorek „0 H“, snímek č.4.....	25

Příloha 27 - Degradovaný vzorek „35 H“, snímek č.2	26
Příloha 28 - Degradovaný vzorek „35 H“, snímek č.3	27
Příloha 29 - Degradovaný vzorek „35 H“, snímek č.4	28
Příloha 30 – Degradovaný vzorek „35 H“, snímek č.5	29

EPOXIDOVÁ LEPIDLA Technická a všeobecná data

Výrobek	Epoxydové lepidlo	
	transparentní s obsahem oceli	s obsahem hliníku
Vlastnosti v nevytvrzeném stavu		
Základ	epoxid	epoxid + hliník
Skupenství (při +20°C)	husté tekuté	pasta na spachtlování
Barva	transparentně nažloutlá	antracit
Forma dodávky	dvoudílná stříkačka	dvoudílná stříkačka
Obsah	24 ml	24 ml
Zápach (vůně)	slabě posítrehnutelný	slabě posítrehnutelný
Hustota (při +20°C)	1,14 g/cm ³	1,8 g/cm ³
Viskozita 1 dynamická (20°C)	32.000 mPa·s	600.000 mPa·s
Přemístění lepeného spoje	do 2 mm - maximálně	do 4 mm - maximálně
Doba zpracování (při +20°C)	2 - 4 minuty	3 - 6 minut
Poměr míšení (objemové - automaticky)	1 : 1	1 : 1
Manipulační pevnost (30% vytvrzení) po	35 minutách	40 minutách
Částečná pevnost (50% vytvrzení) po	1 hodině	2 hodinách
Konečné vytvrzení (100 % vytvrzení) po	24 hodinách	24 hodinách
Teplota při použití hmoty	od +10°C do +30°C	od +10°C do +30°C
Teplota pro tvrdnutí hmoty	od +6°C do +40°C	od +6°C do +40°C
Vlastnosti ve vytvrzeném stavu		
Pevnost v tlaku	9 MPa	10 MPa
Pevnost v tahu	40 MPa	24 MPa
Pevnost v ohybu	58 MPa	58 MPa
Rázová houževnatost	2.000 - 2.500 kJ/m ²	4.000 - 4.500 kJ/m ²
Tvrdość Shore D	65	70
Pevnost lepeného spoje (N/mm ²)	18	20
	19	19
	12	11
Lineární smrštění	cca 2% (20 mm/m)	cca 0,3% (3 mm/m)
Tepečná vodivost	0,20 W/m·K	1,11 W/m·K
Elektrický odpor	10 ¹³ Ohm/čm	10 ¹³ Ohm/čm
Elektrická průrazová pevnost	1,0 kV/mm	1,2 kV/mm
Koeficient teplotní roztažnosti	50 x 10 ⁻⁶ K ⁻¹	30 x 10 ⁻⁶ K ⁻¹
Skladovací stabilita (při +18 až +25°C)	12 měsíců	12 měsíců
Teplotní odolnost	-50°C do +80°C * -58°F do 178°F	-50°C do +145°C * -58°F do 293°F

* (C x 1,8) + 32 = F

Applikace - Produkt	Doporučený výběr typu	
	Epoxy.lepidlo - s oceli	Epoxy.lepidlo - s hliníkem
Kov (ocel, hliník, litina, nerez, slitiny lehkých kovů, meď, bronz, mosaz atd.)	x	xx
Dřevo (smrk, buk, dub, borovice, balsa, exotické dřeviny atd.)	x	x
Materiály ze dřeva (překládka, sololit, MDF, dřevotřískka atd.)	x	x
Kámen (beton, pórobeton, mramor, žula, umělý kámen, chila atd.)	xx	xx
Sklo a keramika	x	x
Plasty (tvrdé plasty, pryskyřice, PVC, tvrdé atd.)	x	x
Guma a elastomer (měkká, tvrdá, silikon, teflon atd.)	-	-
Papír (vícevrstvý, tvrdý atd.)	x	x

/x/ - vhodné doporučení /-/ - nevhodné nedoporučeno
IV. - nejvhodnější doporučení IV. - nepodporujeme
Všechna udaná data jsou založena na laboratorních měřeních a četných zkušenostech od zákazníků. Byly sestaveny pečlivě, přesto však nezakládají právní nárok na odvolání.

HORTEX, s.r.o., Dělnická 251, CZ - 500 04 Hradec Králové telefon: 495 535 133 fax: 495 532 959 internet: www.hortex.cz e-mail: hortex@hortex.cz

Epoxidové lepidlo – transparentní (Epoxy adhesive – transparent)



Pevnost v ohybu:	58 MPa
Rázová houževnatost:	2.000 – 2.500 kJ/m ²
Tvrdość Shore D:	65
Pevnost lepeného spoje (N/mm ²):	ocel-19, hliník-18, PVC - 12
Lineární smrštění:	cca 2%
Elektrický odpor:	10 ¹³ Ohmů/cm
Elektrická průrazová pevnost:	1,0 kV/mm
Teplotní odolnost:	-50°C do +80°C *-58°F do +176°F

Trvale odolává: vodě, slané vodě, saponátům, oleji, naftě, benzínu, zředěným minerálním kyselinám (chlorovodíková 10%, dusičná 10%, sírová 30%) a alkalickým roztokům (hydroxid sodný 40%, amoniak 10%)

Neodolává: organickým kyselinám (octová 5%, mléčná 10%) a je narušována organickými rozpouštědly (ethanol, xylen), acetonem

Poznátky z praxe:

1. Výrobek je určen pro použití při 20°C. Snížená teplota při aplikaci o 5 – 10°C zpomaluje proces vytvrzování a tmel. Proto doporučujeme výrobky skladovat při teplotě 20°C a do provozů rozdělovat až při samotných opravách.
2. Všechny epoxidové kompozice mají záruku 12 měsíců.

Skladování

Składujte v suchu při teplotě 20°C v originálních obalech. Záruční doba 12 měsíců v originálních obalech.

OCHRANNÁ ZNÁMKA

Pokud není uvedeno jinak, všechny ochranné známky v tomto dokumentu jsou ochranné známky společnosti HORTEX v České republice. © značí ochrannou známku zaregistrovanou na Úřadě průmyslového vlastnictví České republiky.

UPOZORNĚNÍ

Údaje udávané v tomto technickém listě, obzvláště návrhy ke zpracování výrobků HORTEX se zakládají na našich nejnovějších znalostech a zkušenostech. Protože se však materiály mohou velmi lišit a nemáme vliv na pracovní podmínky, doporučujeme provést dostatečný počet pokusů pro zjištění vhodnosti našich výrobků. Za škody vzniklé na základě uvedených pokynů nebo na základě ústního projednání neručíme, pokud by nám ovšem nebyl prokázán záměr nebo hrubá nedbalost. Údaje byly sestaveny pečlivě, přesto nezakládají právní nárok na odvolání.

ZDRAVÍ A BEZPEČNOST

Při zpracování produktů jsou fyzikální, bezpečnostní, toxikologické a ekologické údaje a předpisy v našich bezpečnostních listech (ES) www.hortex.cz dodržovány.

$$^{\circ}\text{F} = (^{\circ}\text{C} \times 1,8) + 32$$

PROFIL PRODUKTU

Transparentně nažloutlé barvy, rychle se vytvrzující, dvousložkové epoxidové lepidlo s extrémně vysokou pevností lepeného spoje v tahu i rázu. Ideální lepidlo k rychlému lepení mnoha druhů materiálů: například kovu, skla, keramiky, dřeva, některých tvrdých umělých hmot atd.. Ve vytvrzeném stavu jsou lepené spoje stále vůči vodě, olejům stejně tak, jako vůči většině chemikáliím.

APLIKACE PRODUKTU

Očistěte, případně zdrsněte a dokonale odmastěte lepené plochy (HORTEX Čističem). Lepidlo se dávákuje ze zdvojené stříkačky do připravené míchací misky. Po dokonalém ručním promíchání musí vzniknout stejnoměrná hmota. Naneste na lepené plochy a stlačte k sobě.

INFORMACE O FYZIKÁLNÍCH A CHEMICKÝCH VLASTNOSTECH PŘÍPRAVKU

Základ lepidla:	epoxid
Skupenství (při 20°C):	hustě tekuté
Barva:	bezbarvá
Forma dodávky:	dvojitá stříkačka
Obsah:	24 ml
Zápach (vůně):	slabě postřehnutelný
Hustota (při 20°C):	1,14 gr/cm ³
Viskozita 1 dynamická (20°C):	32.000 mPa·s
Přemostění lepeného spoje:	do 2 mm - maximálně
Doba zpracování 10 ml (při 20°C):	3 – 4 minut
Poměr míšení (objemově – automaticky):	1:1
Manipulační pevnost (30% vytvrzení) po:	35 minutách
Částečná pevnost (50% vytvrzení) po:	1 hodině
Konečné vytvrzení (100% vytvrzení) po:	24 hodinách
Pevnost v tlaku:	9 MPa
Pevnost v tahu:	40 MPa

Epoxidové lepidlo – s obsahem oceli (Epoxy adhesive – metal)



Pevnost v ohybu:	58MPa
Rázová houževnatost:	4.000 – 4.500 kJ/m ²
Tvrdość Schore D:	70
Pevnost lepeného spoje (N/mm ²):	ocel-20, hliník-19, PVC - 11
Lineární smrštění:	cca 0,3%
Elektrický odpor:	10 ¹¹ Ohmů/cm
Elektrická průrazová pevnost:	1,2 kV/mm
Teplotní odolnost:	-50°C do +145°C + -58°F do +293°F

Trvale odolává: vodě, slané vodě, saponátům, oleji, naftě, benzínu, zředěným minerálním kyselinám (chlorovodíková 10%, dusičná 10%, sírová 30%) a alkalickým roztokům (hydroxid sodný 40%, amoniak 10%)

Neodolává: organickým kyselinám (octová 5%, mléčná 10%) a je narušována organickými rozpouštědly (ethanol, xylene), acetonem

Poznatzky z praxe:

1. Výrobek je určen pro použití při 20°C. Snížená teplota při aplikaci o 5 – 10°C zpomaluje proces vytvrzování a tmel. Proto doporučujeme výrobky skladovat při teplotě 20°C a do provozů rozdělovat až při samotných opravách.
2. Všechny epoxidové kompozice mají záruku 12 měsíců.

Skladování

Skladujte v suchu při teplotě 20°C v originálních obalech. Záruční doba 12 měsíců v originálních obalech.

OCHRANNÁ ZNAMKA

Pokud není uvedeno jinak, všechny ochranné známky v tomto dokumentu jsou ochranné známky společnosti HORTEX v České republice. © značí ochrannou známku zaregistrovanou na Úřadě průmyslového vlastnictví České republiky.

UPOZORNĚNÍ

Údaje udávané v tomto technickém listě, obzvláště návrhy ke zpracování výrobků HORTEX se zakládají na našich nejnovějších znalostech a zkušenostech. Protože se však materiály mohou velmi lišit a nemáme vliv na pracovní podmínky, doporučujeme provést dostatečný počet pokusů pro zjištění vhodnosti našich výrobků. Za škody vzniklé na základě uvedených pokynů nebo na základě ústního projednání neručíme, pokud by nám ovšem nebyl prokázán záměr nebo hrubá nedbalost. Údaje byly sestaveny pečlivě, přesto nezakládají právní nárok na odvolání.

ZDRAVÍ A BEZPEČNOST

Při zpracování produktů jsou fyzikální, bezpečnostní, toxikologické a ekologické údaje a předpisy v našich bezpečnostních listech (ES) www.hortex.cz dodržovány.

$$^{\circ}\text{F} = (^{\circ}\text{C} \times 1,8) + 32$$

PROFIL PRODUKTU

Dvousložkové epoxidové lepidlo s obsahem oceli, antracitové barvy, rychle se vytvrzující, s extrémně vysokou pevností lepeného spoje v tahu i rázu. Ideální lepidlo k rychlému lepení mnoha druhů materiálů: například kovu, skla, keramiky, dřeva, některých tvrdých umělých hmot atd.. Ve vytvrzeném stavu jsou lepené spoje stále vůči vodě, olejům stejně tak, jako vůči většině chemikáliím.

APLIKACE PRODUKTU

Očistěte, případně zdrsňte a dokonale odmastěte lepené plochy (HORTEX Čističem). Lepidlo se dávkuje ze zdvojené stříkačky do připravené míchací misky. Po dokonalém ručním promíchání musí vzniknout stejnoměrná hmota. Naneste na lepené plochy a stlačte k sobě.

INFORMACE O FYZIKÁLNÍCH A CHEMICKÝCH VLASTNOSTECH PŘÍPRAVKU

Základ lepidla:	epoxid s obsahem oceli
Skupenství (při 20°C):	pasta na špachtlování
Barva:	antracit
Forma dodávky:	dvojitá stříkačka
Obsah:	24 ml
Zápach (vůně):	slabě postřehnutelný
Hustota (při 20°C):	1,80 gr/cm ³
Viskozita 1 dynamická (20°C):	750.000 mPa*s
Přemostění lepeného spoje:	do 4 mm - maximálně
Doba zpracování 10 ml (při 20°C):	3 – 4 minut
Poměr míšení (objemově – automaticky):	1:1
Manipulační pevnost (30% vytvrzení) po:	40 minutách
Částečná pevnost (50% vytvrzení) po:	2 hodinách
Konečné vytvrzení (100% vytvrzení) po:	24 hodinách
Pevnost v tlaku:	10 MPa
Pevnost v tahu:	24 MPa

Epoxidové lepidlo – s obsahem hliníku (Epoxy adhesive – aluminum)



Pevnost v tahu:	48 MPa
Pevnost v ohybu:	58 MPa
Rázová houževnatost:	4.000 – 4.500 kJ/m ²
Tvrdość Shore D:	75
Pevnost lepeného spoje (N/mm ²):	ocel-20, hliník-19, PVC - 11
Lineární smrštění:	cca 0,3%
Elektrický odpor:	10 ¹³ Ohmů/cm
Elektrická průrazová pevnost:	1,2 kV/mm
Teplotní odolnost: -50°C do +145°C (krátkodobě +180°C) +58°F do +293°F (krátkodobě +356°F)	

Trvale odolává: vodě, slané vodě, saponátům, oleji, naftě, benzínu, zředěným minerálním kyselinám (chlorovodíková 10%, dusičná 10%, sírová 30%) a alkalickým roztokům (hydroxid sodný 40%, amoniak 10%)
Neodolává: organickým kyselinám (octová 5%, mléčná 10%) a je narušována organickými rozpouštědly (ethanol, xylem), acetonem

Poznátky z praxe:

1. Výrobek je určen pro použití při 20°C. Snížená teplota při aplikaci o 5 – 10°C zpomaluje proces vytvrzování a tmel. Proto doporučujeme výrobky skladovat při teplotě 20°C a do provozů rozdělovat až při samotných opravách.
2. Všechny epoxidové kompozice mají záruku 12 měsíců.

Skladování

Skladujte v suchu při teplotě 20°C v originálních obalech. Záruční doba 12 měsíců v originálních obalech.

OCHRANNÁ ZNÁMKA

Pokud není uvedeno jinak, všechny ochranné známky v tomto dokumentu jsou ochranné známky společnosti HORTEX v České republice. © značí ochrannou známku zaregistrovanou na Úřadě průmyslového vlastnictví České republiky.

UPOZORNĚNÍ

Údaje udávané v tomto technickém listě, obzvláště návrhy ke zpracování výrobků HORTEX se zakládají na našich nejnovějších znalostech a zkušenostech. Protože se však materiály mohou velmi lišit a nemáme vliv na pracovní podmínky, doporučujeme provést dostatečný počet pokusů pro zjištění vhodnosti našich výrobků. Za škody vzniklé na základě uvedených pokynů nebo na základě ústního projednání neručíme, pokud by nám ovšem nebyl prokázán záměr nebo hrubá nedbalost. Údaje byly sestaveny pečlivě, přesto nezakládají právní nárok na odvolání.

ZDRAVÍ A BEZPEČNOST

Při zpracování produktů jsou fyzikální, bezpečnostní, toxikologické a ekologické údaje a předpisy v našich bezpečnostních listech (ES) www.hortex.cz dodržovány.

$$^{\circ}\text{F} = (^{\circ}\text{C} \times 1,8) + 32$$

PROFIL PRODUKTU

Dvousložkové epoxidové lepidlo s obsahem hliníku, světlešedé barvy, rychle se vytvrzující, s extrémně vysokou pevností lepeného spoje v tahu i rázu. Ideální lepidlo k rychlému lepení mnoha druhů materiálů: například kovu, skla, keramiky, dřeva, některých tvrdých umělých hmot atd.. Ve vytvrzeném stavu jsou lepené spoje stále vůči vodě, olejům stejně tak, jako vůči většině chemikáliím.

APLIKACE PRODUKTU

Očistěte, případně zdrsňte a dokonale odmastěte lepené plochy (HORTEX Čističem). Lepidlo se dávkuje ze zdvojené stříkačky do připravené míchací misky. Po dokonalém ručním promíchání musí vzniknout stejnoměrná hmota. Naneste na lepené plochy a stlačte k sobě.

INFORMACE O FYZIKÁLNÍCH A CHEMICKÝCH VLASTNOSTECH PŘÍPRAVKU

Základ lepidla:	epoxid s obsahem hliníku
Skupenství (při 20°C):	pasta na špachtlování
Barva:	světle šedá
Forma dodávky:	dvojitá stříkačka
Obsah:	24 ml
Zápach (vůně):	slabě postřehnutelný
Hustota (při 20°C):	1,80 gr/cm ³
Viskozita 1 dynamická (20°C):	600.000 mPa·s
Přemostění lepeného spoje:	do 4 mm - maximálně
Doba zpracování 10 ml (při 20°C):	3 – 4 minut
Poměr míšení (objemově – automaticky):	1:1
Manipulační pevnost (30% vytvrzení) po:	30 minutách
Částečná pevnost (50% vytvrzení) po:	2 hodinách
Konečné vytvrzení (100% vytvrzení) po:	24 hodinách
Pevnost v tlaku:	15 MPa

vzorek číslo	čas v degrační komoře [dní]	kontrola délky překryvu [mm]	síla FH [N]	mez pevnosti [MPa]	průměr meze pevnosti [MPa]	směrodatná odchylka meze pevnosti [MPa]	variální koeficient meze pevnosti [%]	rozdíl pevnosti vůči etalonu [%]	deformace AB [%]	průměr deformace [%]	směrodatná odchylka deformace [%]	variální koeficient deformace [%]	Rozdíl deformace vůči etalonu [%]	Typ porušení spoje
1 T	0	13,47	5442,75	16,16	12,38	1,58	12,73	etalon transparentního lepidla	3,99	3,11	0,48	15,26	etalon transparentního lepidla	ACFP
2 T		13,60	4397,90	12,94					3,08					
3 T		12,55	3767,10	12,01					2,40					
4 T		12,75	3910,80	12,27					3,04					
5 T		13,17	3982,85	12,10					2,90					
6 T		12,82	4034,05	12,59					3,27					
7 T	7	12,47	3412,60	10,95	12,28	1,26	10,23	-0,77	1,91	2,35	0,30	12,94	-0,77	ACFP
8 T		12,38	3490,45	11,28					2,22					
9 T		12,36	3647,10	11,80					2,30					
10 T		12,19	4375,45	14,36					2,86					
11 T		12,45	4240,60	13,62					2,59					
12 T		12,46	3643,25	11,70					2,20					
13 T	14	12,31	2181,00	7,09	8,83	2,56	29,00	-28,70	0,94	1,67	0,87	52,18	-1,44	ACFP
14 T		12,72	3578,55	11,25					2,41					
15 T		12,45	2920,15	9,38					1,90					
16 T		13,48	4328,30	12,84					3,09					
17 T		12,52	2020,70	6,46					0,96					
18 T		12,72	1888,35	5,94					0,72					
19 T	21	12,67	3725,60	11,76	10,01	2,58	25,73	-19,13	2,08	1,72	0,62	35,89	-1,40	ACFP
20 T		12,49	3981,25	12,75					2,32					
21 T		12,32	3011,45	9,78					1,71					
22 T		12,60	1979,95	6,29					0,99					
23 T		11,95	2089,05	6,99					0,82					
24 T		12,89	4027,95	12,50					2,39					
25 T	28	12,31	3721,35	12,09	9,81	2,14	21,82	-20,78	1,86	1,44	0,56	38,75	-1,67	ACFP
26 T		12,37	3453,80	11,17					1,86					
27 T		12,16	3696,90	12,16					2,19					
28 T		12,41	2581,15	8,32					0,90					
29 T		12,71	2748,45	8,65					1,15					
30 T		12,23	1970,80	6,45					0,68					
31 T	35	12,69	2987,55	9,42	8,92	2,31	25,89	-27,97	1,20	1,48	0,62	42,07	-1,64	ACFP
32 T		12,96	2806,75	8,66					1,93					
33 T		12,98	1821,25	5,61					0,70					
34 T		13,00	2115,80	6,51					0,76					
35 T		12,48	3605,10	11,55					2,30					
36 T		12,50	3670,10	11,74					1,96					
37 T	42	12,49	2428,45	7,78	8,97	0,93	10,32	-27,53	0,71	1,22	0,26	20,94	-1,89	ACFP
38 T		12,83	2619,30	8,17					1,12					
39 T		12,11	2668,00	8,81					1,26					
40 T		12,86	3227,55	10,04					1,47					
41 T		12,96	2821,15	8,71					1,36					
42 T		12,32	3180,00	10,32					1,42					

Vzorek vyřazen - odlehlá hodnota

Příloha 5 – Tabulka výstupních hodnot destruktivní zkoušky pevnosti – Transparentní epoxidové lepidlo

vzorek číslo	čas v degrační komoře [dnů]	kontrola délky překryvu [mm]	síla FH [N]	mez pevnosti [MPa]	průměr meze pevnosti [MPa]	směrodatná odchylka meze pevnosti [MPa]	variální koeficient meze pevnosti [%]	pokles pevnosti vůči etalonu [%]	deformace AB [%]	Průměr deformace [%]	Směrodatná odchylka deformace [%]	variální koeficient deformace [%]	Rozdíl deformace vůči etalonu [%]	Typ porušení spoje
10	0	12,49	4411,45	14,13	13,27	0,83	6,22	transparentního lepidla	3,35	3,55	0,19	5,37	etalon	ACFP
20		13,74	4543,30	13,23					3,78					
30		13,35	4840,20	14,50					3,79					
40		13,15	4221,80	12,84					3,30					
50		13,72	4128,50	12,04					3,49					
60		12,87	4153,40	12,91					3,58					
70	mikroskop													
80	7	12,49	2885,00	9,24	7,25	1,42	19,54	-45,39	1,53	1,07	0,31	29,24	-2,48	ACFP
90		12,33	2160,35	7,01					1,06					
100		12,62	2807,80	8,90					1,41					
110		12,63	1659,90	5,26					0,81					
120		12,70	2206,60	6,95					0,95					
130		12,73	1953,15	6,14					0,65					
140	mikroskop													
150	14	12,42	1331,75	4,29	6,23	1,59	25,53	-53,10	0,56	0,87	0,29	33,58	-2,68	ACFP
160		12,37	2381,50	7,70					1,01					
170		12,45	2381,55	7,65					0,96					
180		11,98	1541,30	5,15					0,70					
190		12,24	1391,25	4,55					0,59					
200		12,40	2485,95	8,02					1,40					
210	mikroskop													
220	21	12,30	1123,45	3,65	3,93	0,31	7,90	-70,37	0,36	0,45	0,09	20,54	-3,10	ACFP
230		12,70	1114,85	3,51					0,32					
240		12,54	1380,15	4,40					0,55					
250		12,68	1202,65	3,79					0,39					
260		12,28	1290,40	4,20					0,54					
270		11,93	1204,00	4,04					0,51					
280	mikroskop													
290	28	12,74	1452,15	4,56	5,10	0,59	11,64	-61,59	0,46	0,64	0,13	20,95	-2,91	ACFP
300		11,71	1638,30	5,60					0,59					
310		12,68	1624,45	5,12					0,63					
320		12,56	1712,50	5,45					0,65					
330		12,93	1323,15	4,09					0,58					
340		13,82	1990,20	5,76					0,90					
350	mikroskop													
360	35	12,91	1393,35	4,32	4,51	1,42	31,41	-66,02	0,35	0,66	0,37	56,56	-2,89	ACFP
370		13,07	1137,00	3,48					0,45					
380		13,53	2511,85	7,43					1,44					
390		13,18	1458,50	4,43					0,49					
400		13,05	962,80	2,95					0,45					
410		12,61	1406,75	4,46					0,78					
420	mikroskop													
430	42	12,75	1061,15	3,33	4,17	0,88	21,12	-68,59	0,50	0,47	0,06	13,56	-3,08	ACFP
440		12,64	1145,85	3,63					0,44					
450		12,38	1196,25	3,87					0,47					
460		13,18	1535,10	4,66					0,42					
470		12,33	1821,50	5,91					0,60					
480		12,07	1094,65	3,63					0,41					
490	mikroskop													

Příloha 6 - Tabulka výstupních hodnot destruktivní zkoušky pevnosti – Epoxidové lepidlo s obsahem oceli

vzorek číslo	čas v degrační komoře [dnů]	kontrola délky překryvu [mm]	síla FH [N]	mez pevnosti [MPa]	průměr meze pevnosti [MPa]	směrodatná odchylka meze pevnosti [MPa]	variální koeficient meze pevnosti [%]	pokles pevnosti vůči etalonu [%]	deformace AB [%]	Průměr deformace [%]	Směrodatná odchylka deformace [%]	variální koeficient deformace [%]	Rozdíl deformace vůči etalonu [%]	Typ porušení spoje
1 H	0	13,01	4803,90	14,77	13,90	0,53	3,82	etalon transparentního lepidla	4,36	3,58	0,40	11,13	etalon transparentního lepidla	ACFP
2 H		12,71	4250,30	13,38					3,61					
3 H		13,05	4357,80	13,36					3,05					
4 H		12,85	4603,10	14,33					3,52					
5 H		12,72	4294,10	13,50					3,59					
6 H		12,67	4456,60	14,07					3,34					
7 H	7	12,36	1832,70	5,93	7,43	1,01	13,55	-46,53	0,98	1,20	0,26	21,30	-2,38	ACFP
8 H		12,77	2586,55	8,10					1,56					
9 H		12,65	2488,45	7,87					1,15					
10 H		12,35	2738,00	8,87					1,49					
11 H		12,62	2352,50	7,46					1,20					
12 H		12,29	1956,50	6,37					0,84					
13 H	14	12,67	1869,55	5,90	6,01	0,77	12,90	-56,79	0,97	1,05	0,20	18,83	-2,53	ACFP
14 H		12,55	1911,35	6,09					0,82					
15 H		12,41	1410,95	4,55					0,80					
16 H		12,53	1835,45	5,86					1,19					
17 H		12,80	2108,25	6,59					1,21					
18 H		12,30	2168,85	7,05					1,31					
19 H	21	12,55	1139,80	3,63	4,76	0,81	16,96	-65,75	0,59	0,63	0,10	15,95	-2,95	ACFP
20 H		12,95	1623,55	5,01					0,60					
21 H		12,66	1450,70	4,58					0,57					
22 H		12,53	1327,55	4,24					0,53					
23 H		12,79	2003,50	6,27					0,84					
24 H		12,55	1516,10	4,83					0,65					
25 H	28	12,57	1860,90	5,92	4,76	0,85	17,90	-65,77	0,56	0,51	0,06	10,98	-3,07	ACFP
26 H		12,19	1765,10	5,79					0,59					
27 H		12,51	1346,65	4,31					0,44					
28 H		13,45	1395,70	4,15					0,51					
29 H		13,24	1584,25	4,79					0,44					
30 H		12,71	1141,70	3,59					0,51					
31 H	35	13,26	2415,80	7,29	5,27	1,26	23,95	-62,12	1,09	0,70	0,22	31,89	-2,88	ACFP
32 H		12,83	2045,55	6,38					0,82					
33 H		12,91	1714,90	5,31					0,76					
34 H		12,70	1145,60	3,61					0,49					
35 H		12,83	1317,30	4,11					0,58					
36 H		13,07	1602,15	4,90					0,44					
37 H	42	13,01	1302,85	4,01	3,90	0,35	8,87	-71,94	0,49	0,48	0,07	14,97	-3,10	ACFP
38 H		12,66	1324,45	4,18					0,41					
39 H		12,83	1364,60	4,25					0,54					
40 H		12,50	1269,10	4,06					0,36					
41 H		12,30	1004,95	3,27					0,56					
42 H		12,94	1173,25	3,63					0,52					
43 H	49 H	13,01	1302,85	4,01	3,90	0,35	8,87	-71,94	0,49	0,48	0,07	14,97	-3,10	ACFP
44 H		12,66	1324,45	4,18					0,41					
45 H		12,83	1364,60	4,25					0,54					
46 H		12,50	1269,10	4,06					0,36					
47 H		12,30	1004,95	3,27					0,56					
48 H		12,94	1173,25	3,63					0,52					

Příloha 7 - Tabulka výstupních hodnot destruktivní zkoušky pevnosti – Epoxidové lepidlo s obsahem hliníku

Časová osa	Hodnoty	Prognóza	Dolní hranice spolehlivosti	Horní hranice spolehlivosti
0	12,378869			
7	12,28416			
14	8,8266616			
21	10,011207			
28	9,8060634			
35	8,916932			
42	8,9711584	8,97115844	8,97	8,97
49		8,11988865	6,20	10,04
56		7,54671272	5,62	9,47
63		6,97353679	5,04	8,91
70		6,40036086	4,45	8,35
77		5,82718493	3,87	7,79
84		5,254009	3,29	7,22
91		4,68083307	2,70	6,66
98		4,10765714	2,12	6,10
105		3,53448121	1,53	5,53
112		2,96130528	0,95	4,97
119		2,38812935	0,37	4,41
126		1,81495342	-0,22	3,85
133		1,24177749	-0,80	3,29
140		0,66860156	-1,39	2,72
147		0,09542563	-1,97	2,16
154		-0,4777503	-2,56	1,60
161		-1,0509262	-3,14	1,04
168		-1,6241022	-3,73	0,48
170		-1,7878667	-3,89	0,32

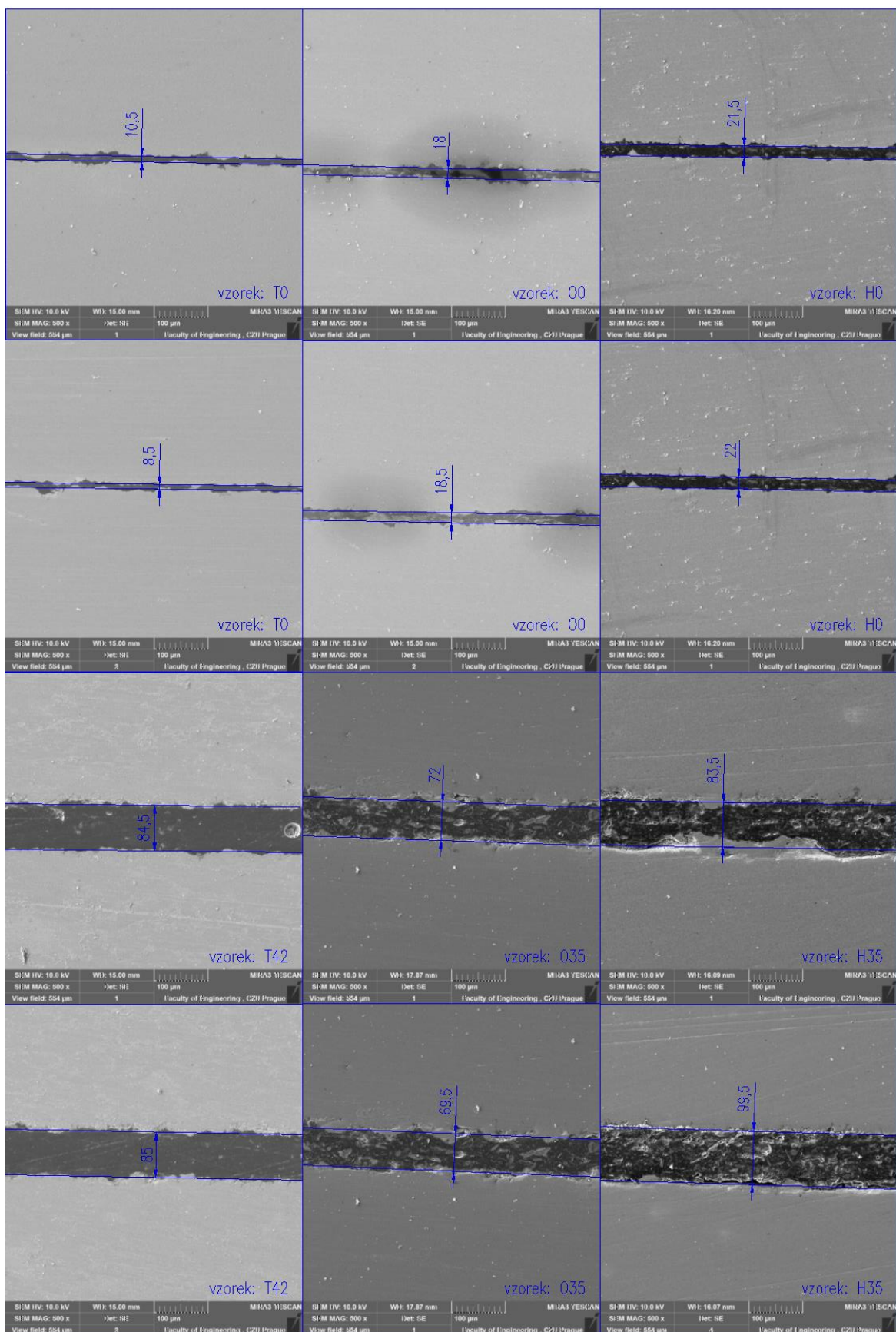
Příloha 8 - Tabulka prognózy trendu pevnosti transparentního epoxidového lepidla

Časová osa	Hodnoty	Prognóza	Dolní hranice spolehlivosti	Horní hranice spolehlivosti
0	13,274018			
7	7,2485726			
14	6,2255852			
21	3,9335358			
28	5,0979119			
35	4,5104509			
42	4,1693374	4,16933738	4,17	4,17
49		2,85997828	-1,28	7,00
56		1,64650121	-3,93	7,22
63		0,43302414	-6,28	7,15
70		-0,7804529	-8,47	6,91

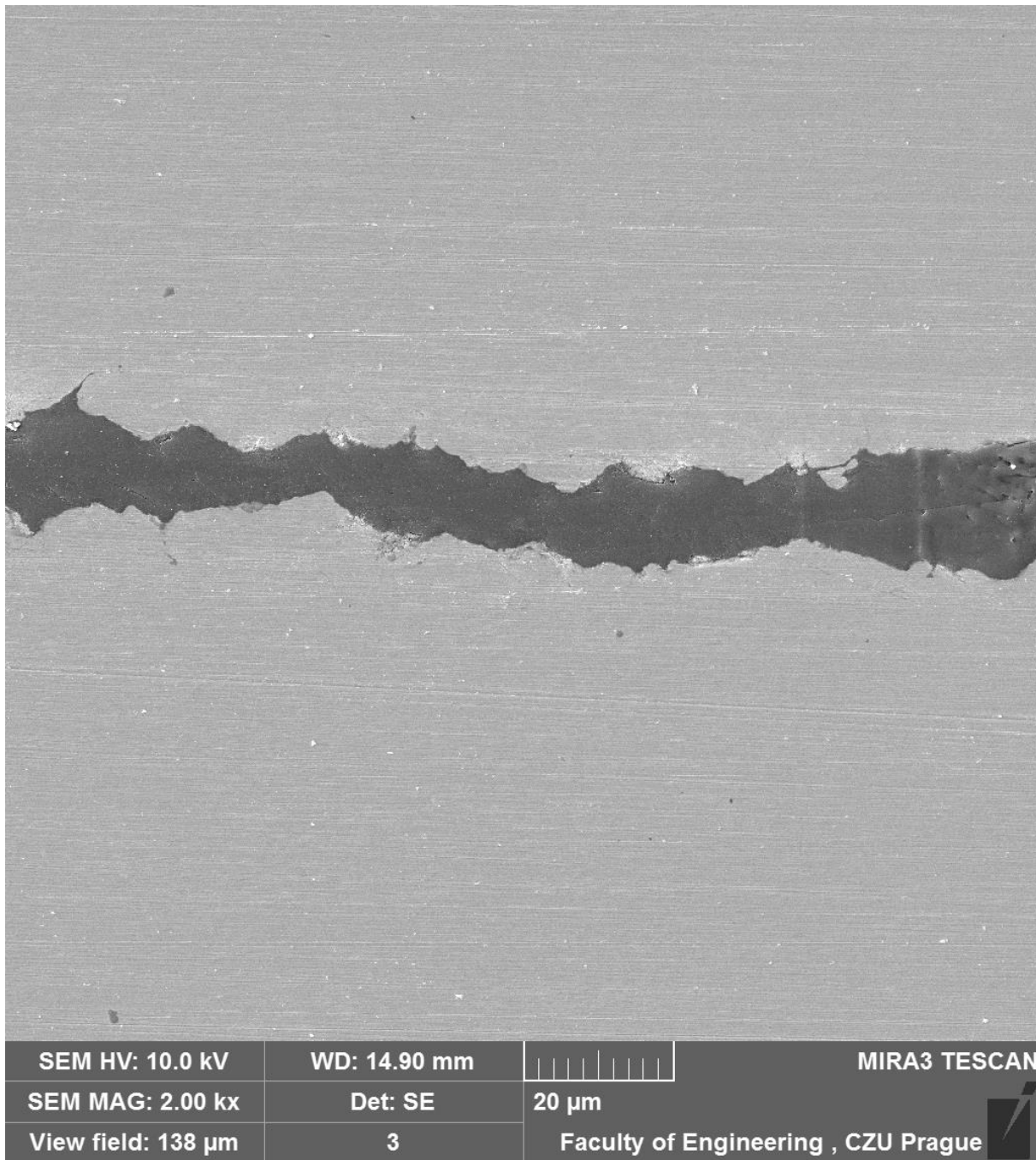
Příloha 9 - Tabulka prognózy trendu pevnosti epoxidového lepidla s obsahem oceli

Časová osa	Hodnoty	Prognóza	Dolní hranice spolehlivosti	Horní hranice spolehlivosti
0	13,900883			
7	7,4323093			
14	6,0071424			
21	4,7612063			
28	4,7582708			
35	5,2661157			
42	3,9001261	3,90012612	3,90	3,90
49		2,61680153	-1,62	6,86
56		1,34333762	-4,36	7,05
63		0,0698737	-6,80	6,94
70		-1,2035902	-9,07	6,66

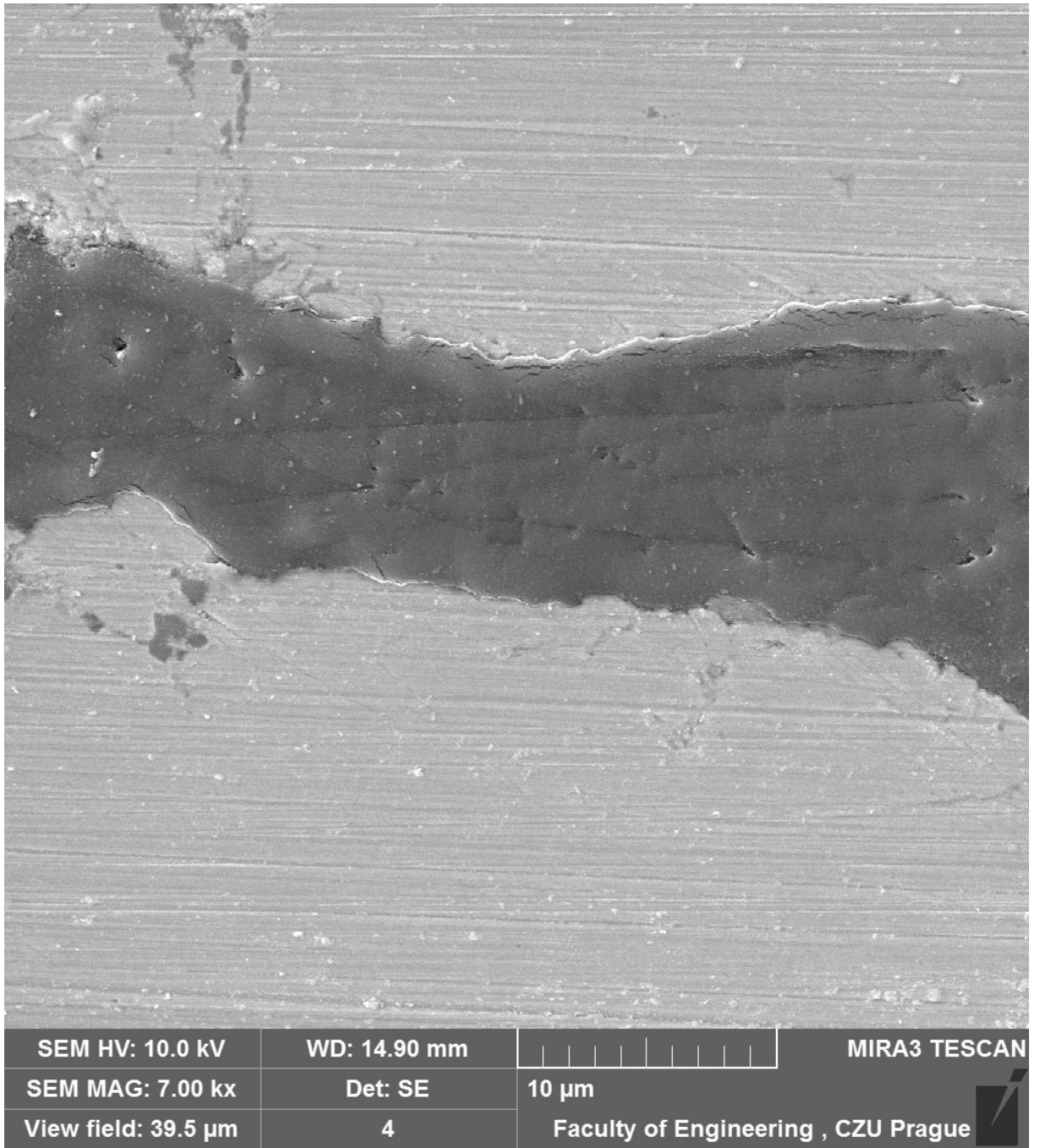
Příloha 10 - Tabulka prognózy trendu pevnosti epoxidového lepidla s obsahem hliníku



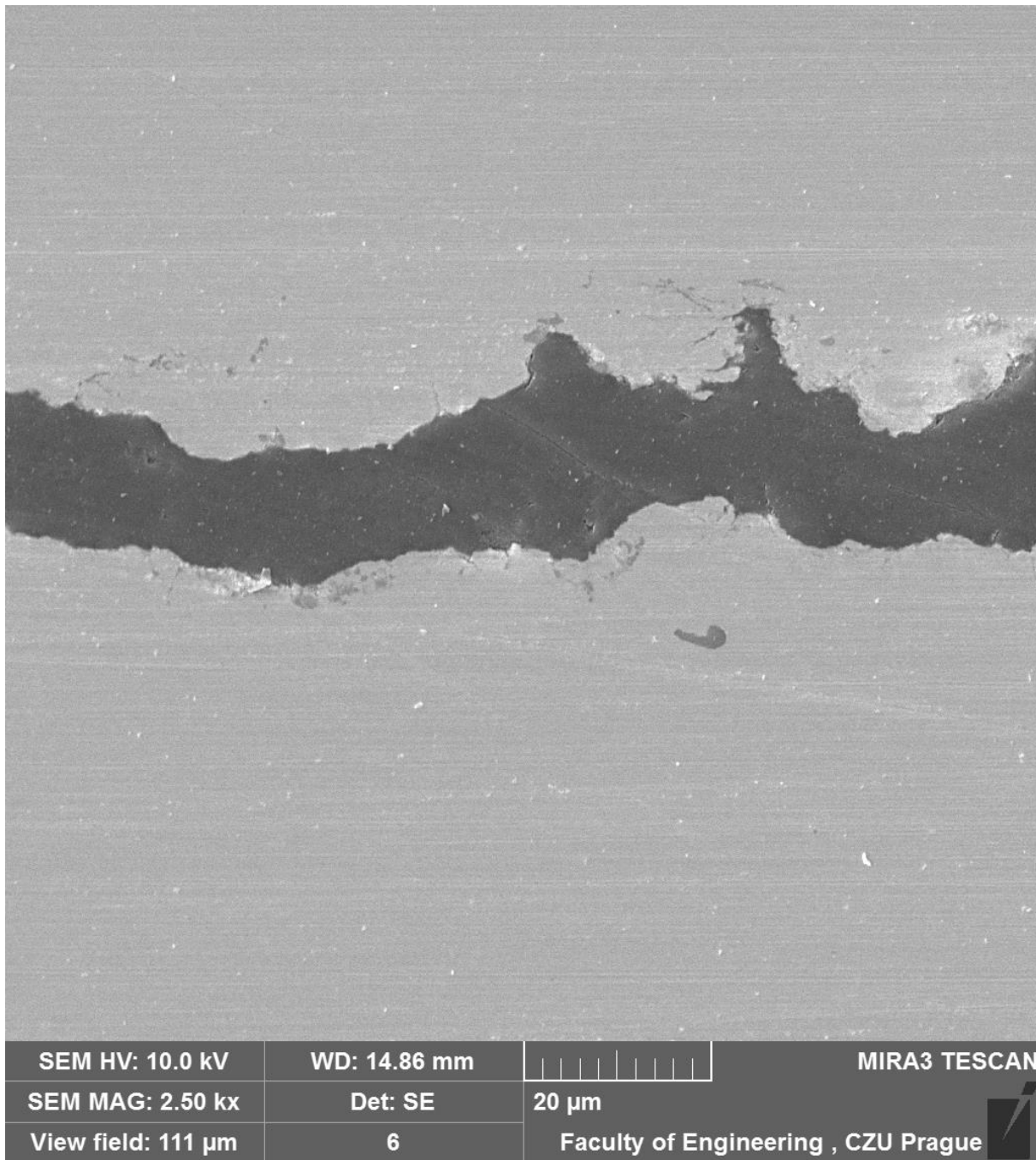
Příloha 11 - Měření tloušťky vrstvy lepidla zkoumaných vzorků



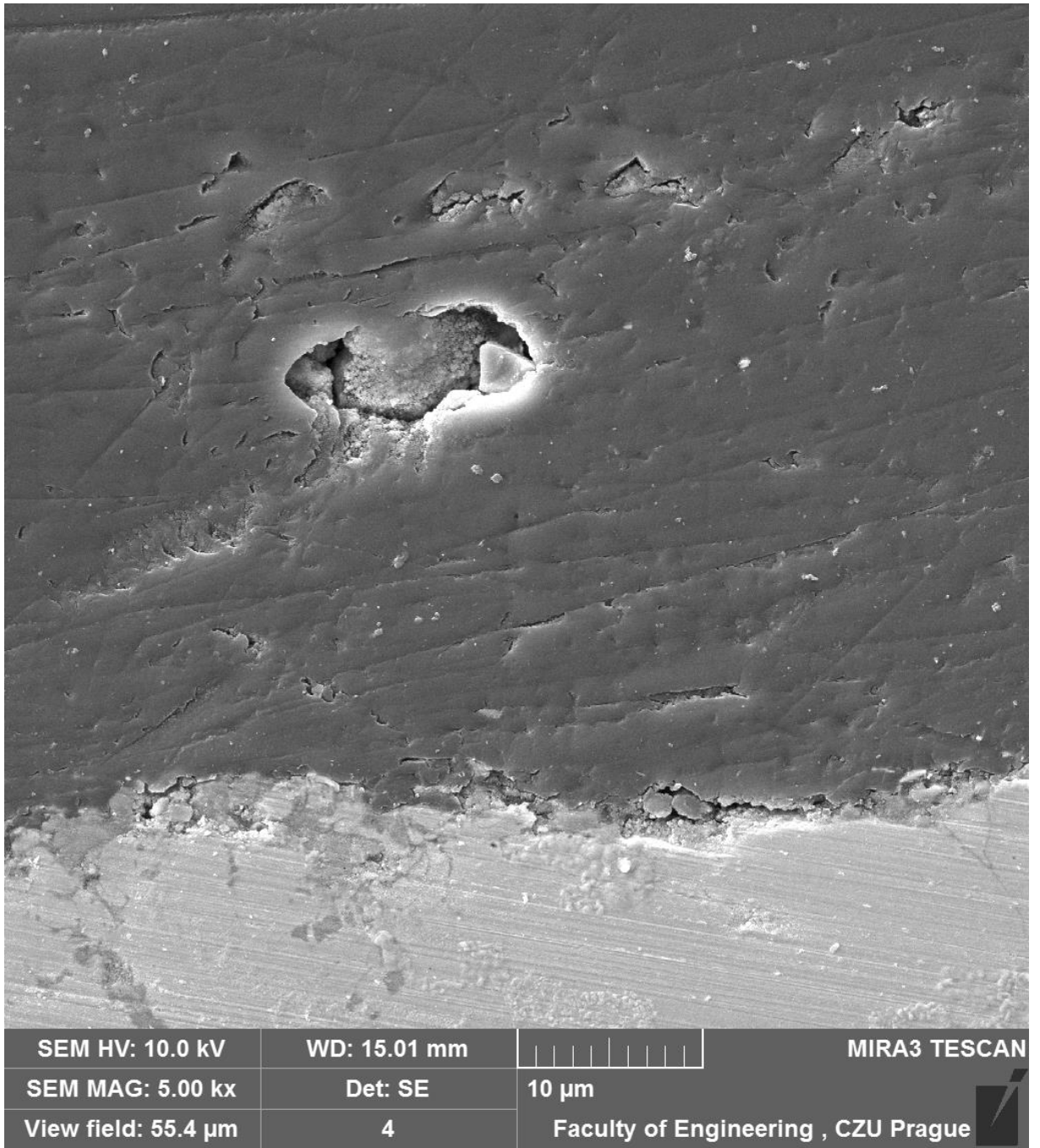
Příloha 12 - Nedegradovaný vzorek „0 T“, snímek č.2



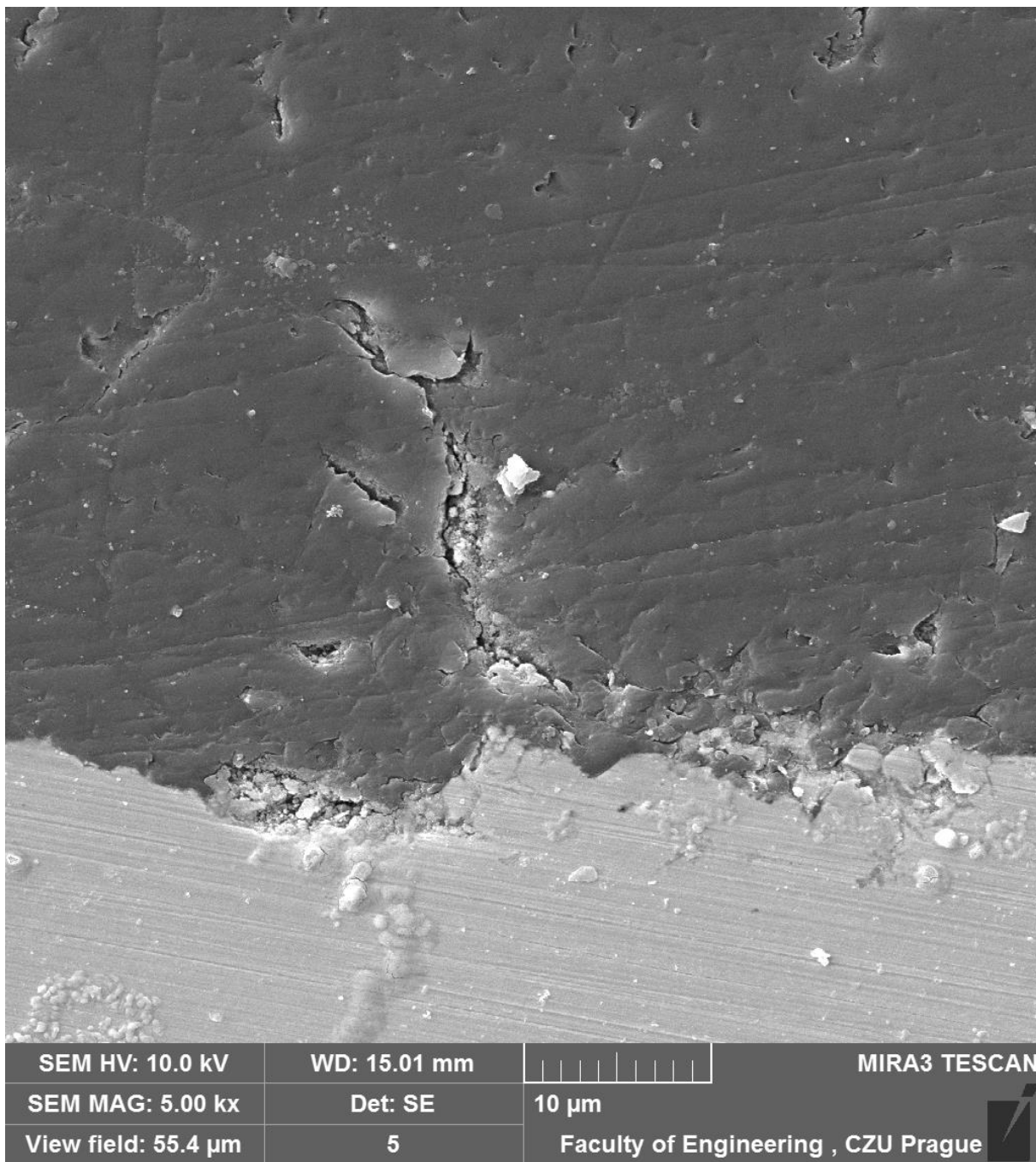
Příloha 13 - Nedegradovaný vzorek „0 T“, snímek č.3



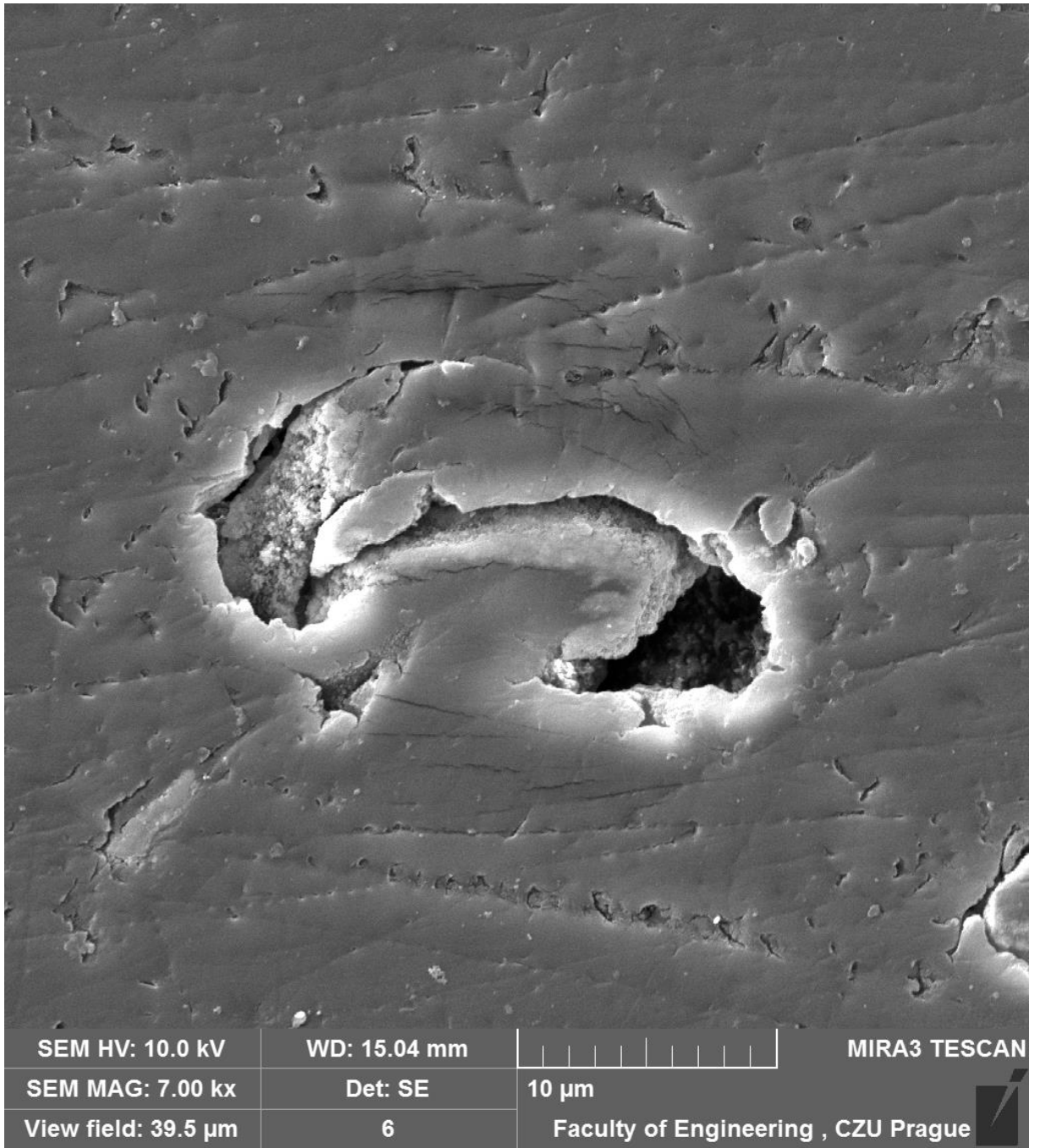
Příloha 14 - Nedegradovaný vzorek „0 T“, snímek č.4



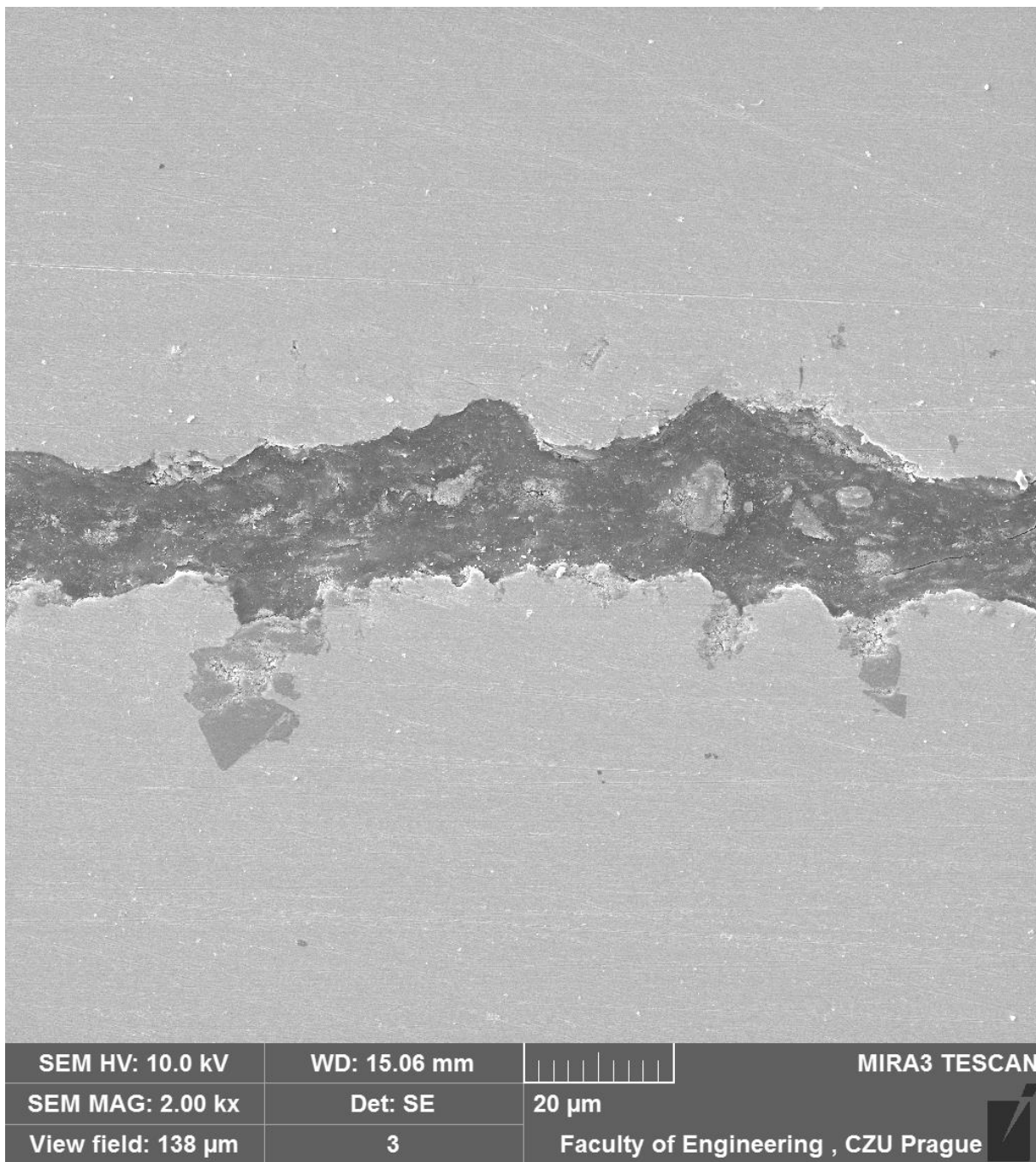
Příloha 15 - Degradovaný vzorek „42 T“, snímek č.2



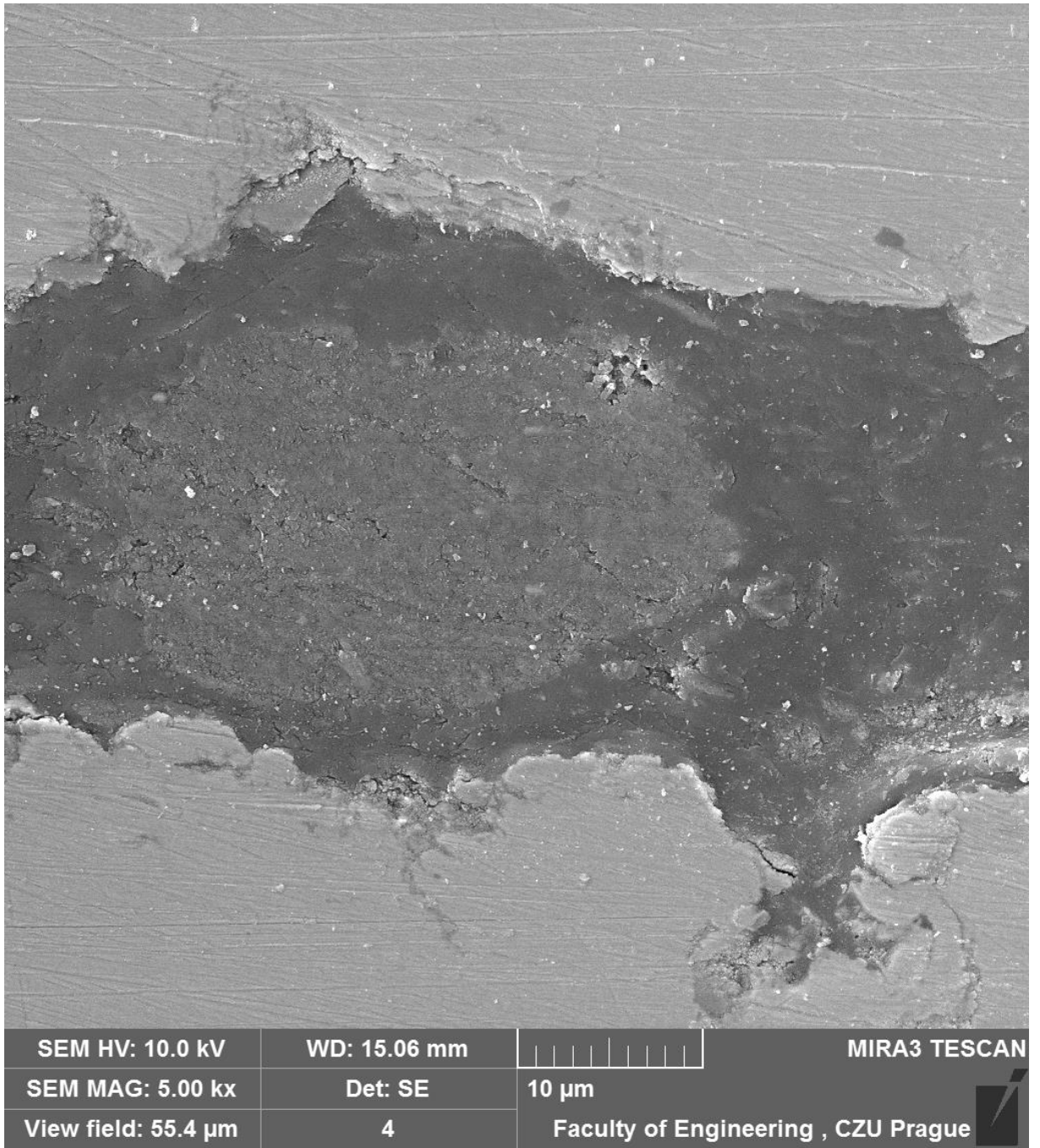
Příloha 16 - Degradovaný vzorek „42 T“, snímek č.3



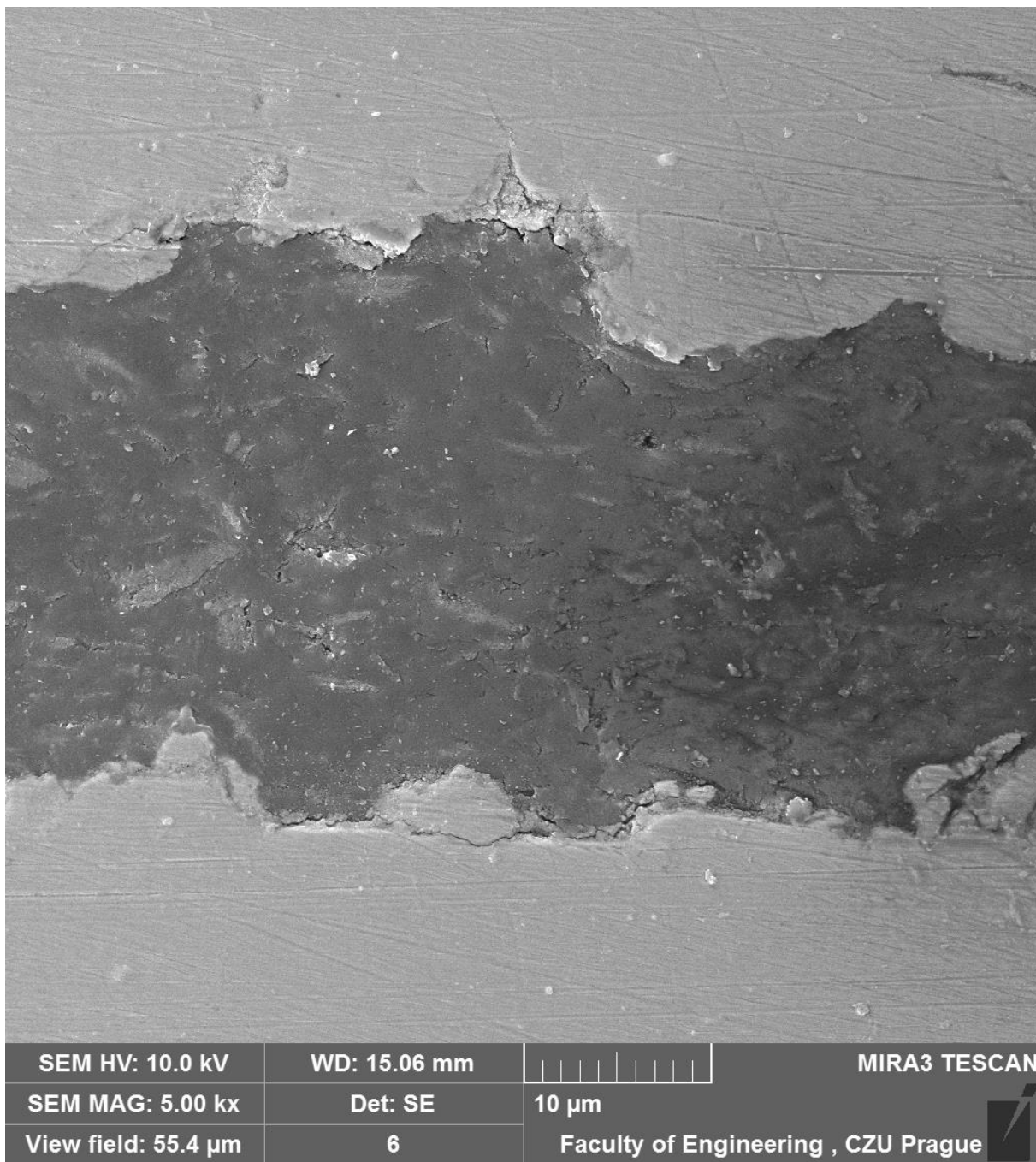
Příloha 17 - Degradovaný vzorek „42 T“, snímek č.4



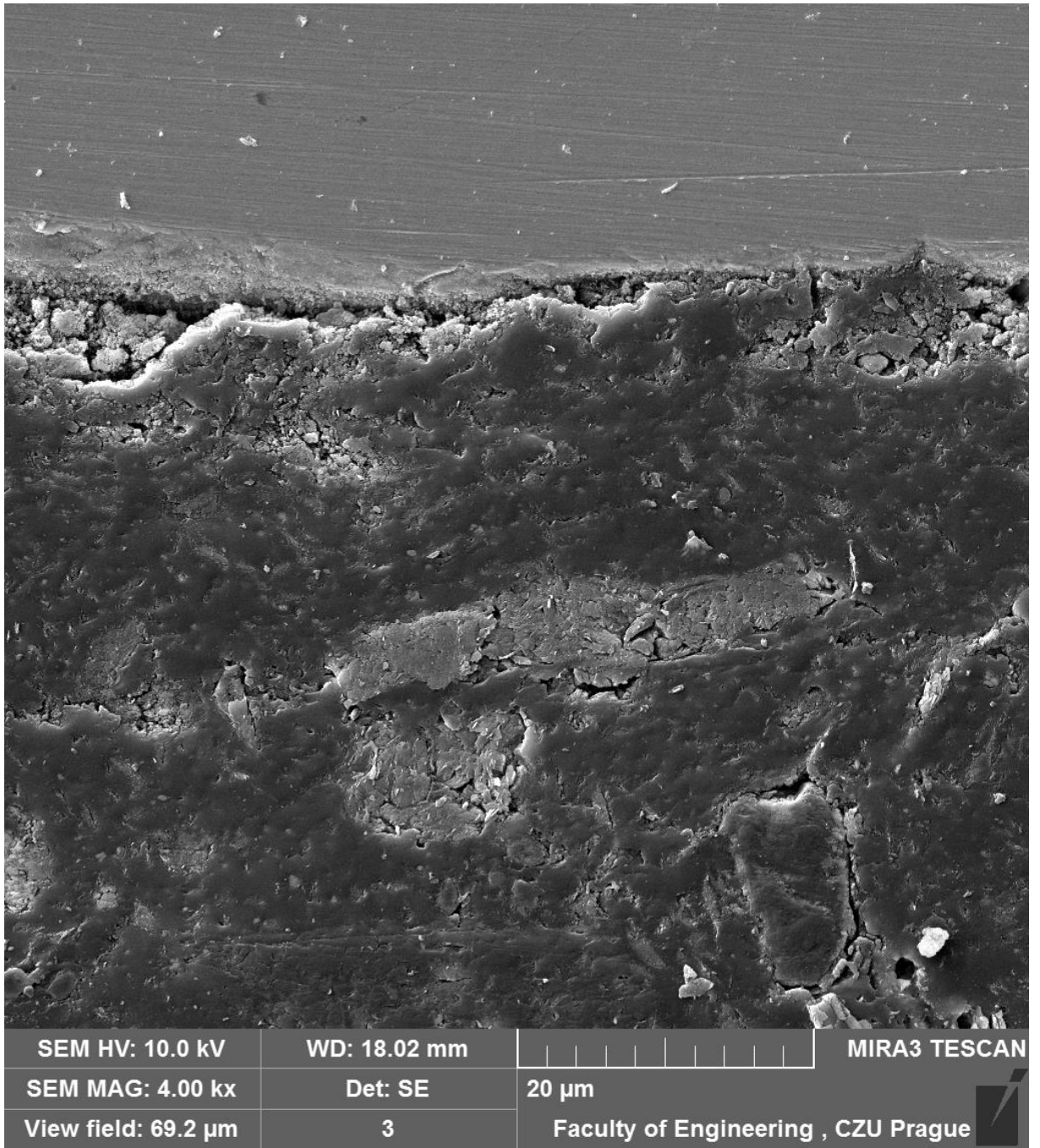
Příloha 18 - Nedegradovaný vzorek „0 O“, snímek č.2



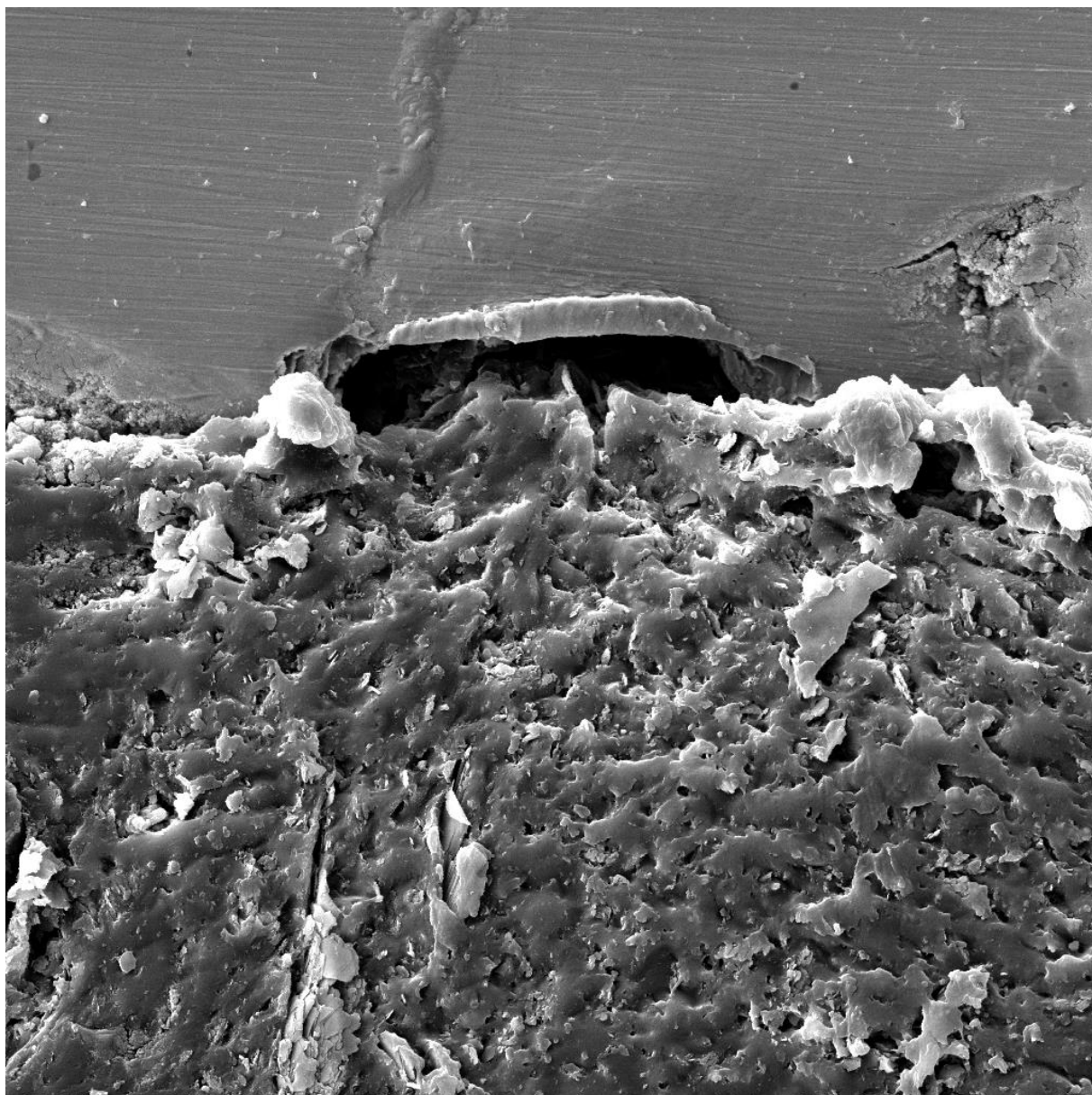
Příloha 19 - Nedegradovaný vzorek „0 O“, snímek č.3





Příloha 20 - Nedegradovaný vzorek „0 O“, snímek č.4

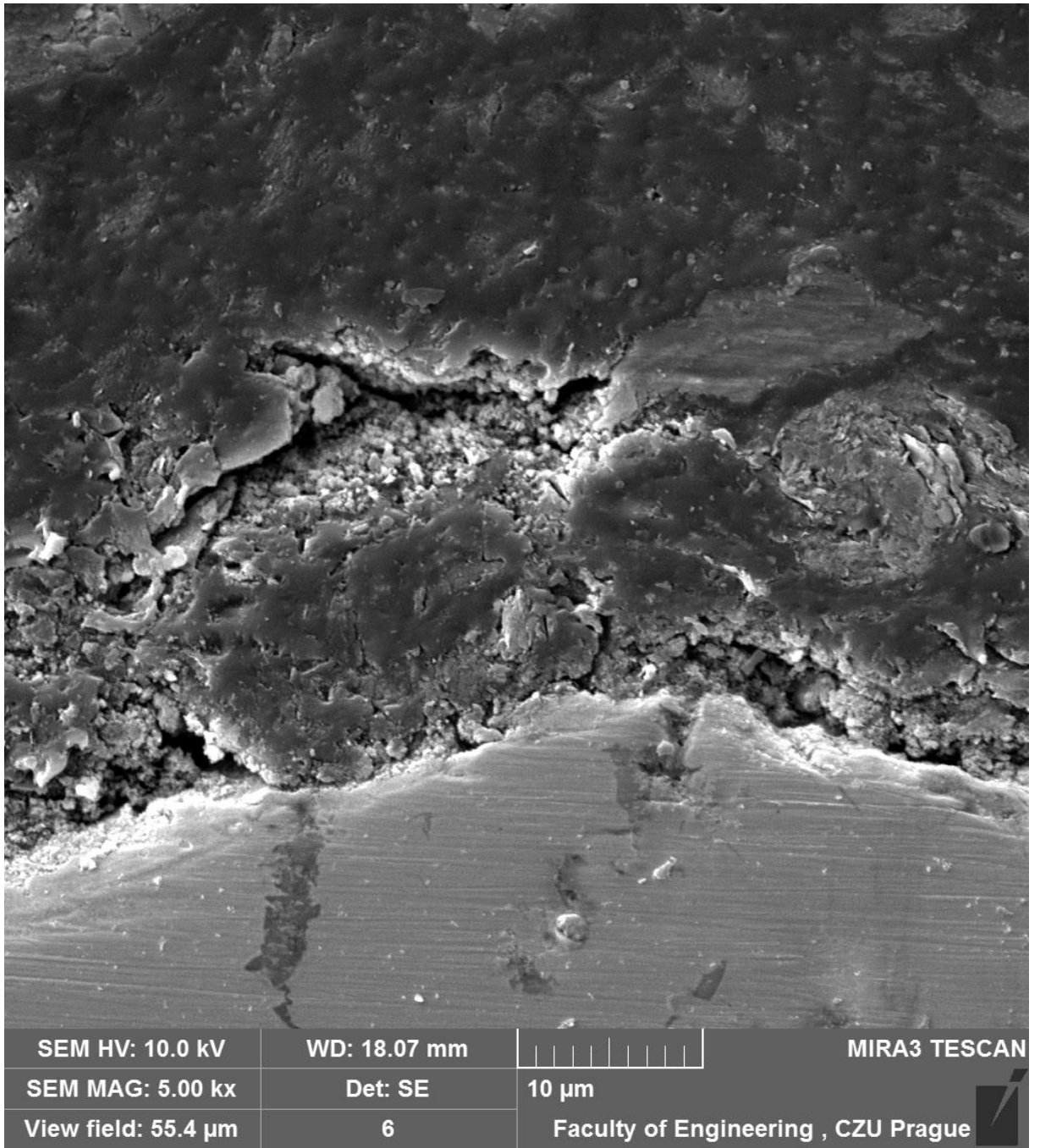


Příloha 21 - Degradovaný vzorek „35 O“, snímek č.2

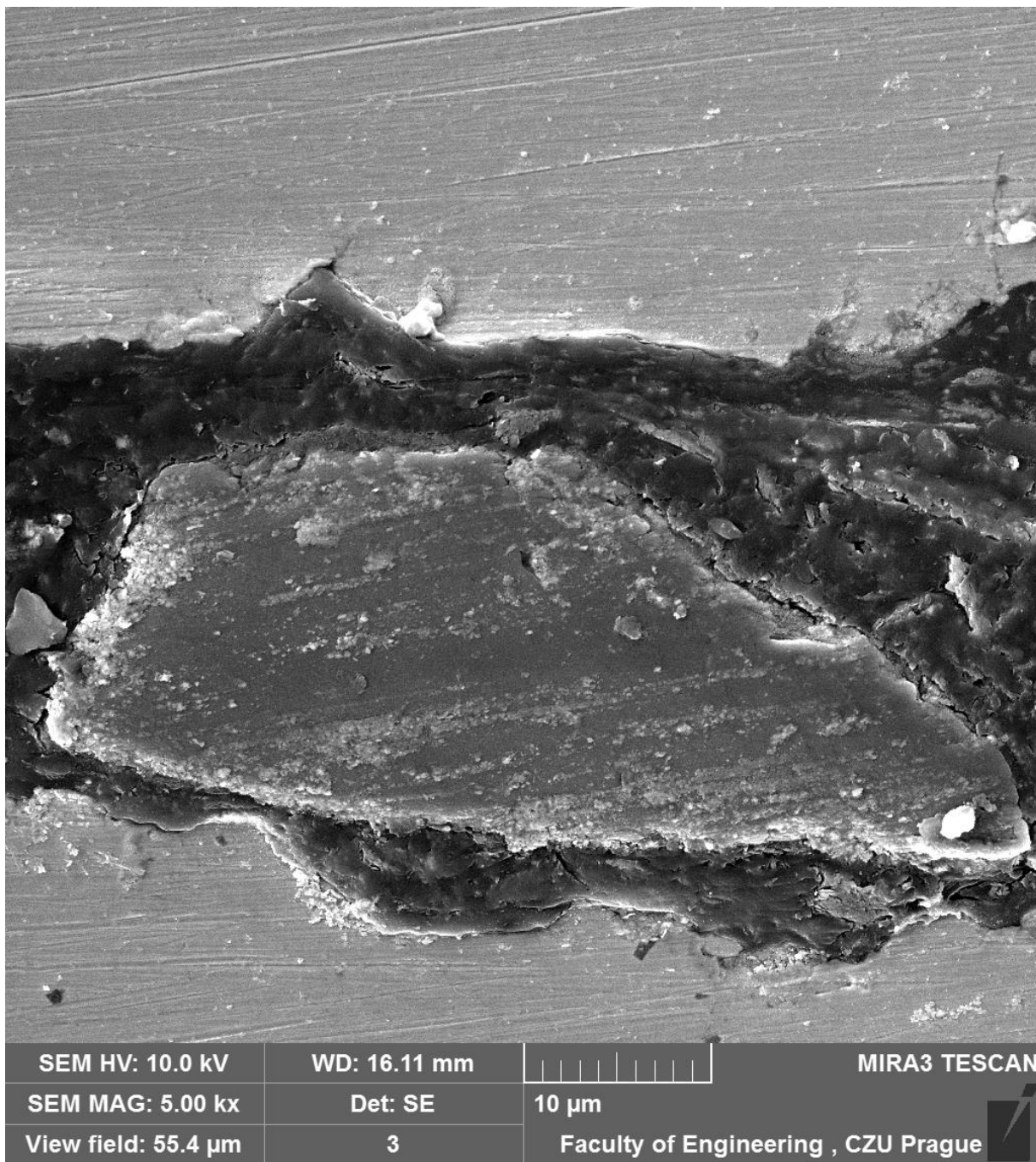


SEM HV: 10.0 kV	WD: 18.07 mm		MIRA3 TESCAN
SEM MAG: 5.00 kx	Det: SE	10 μ m	
View field: 55.4 μ m	5	Faculty of Engineering , CZU Prague	

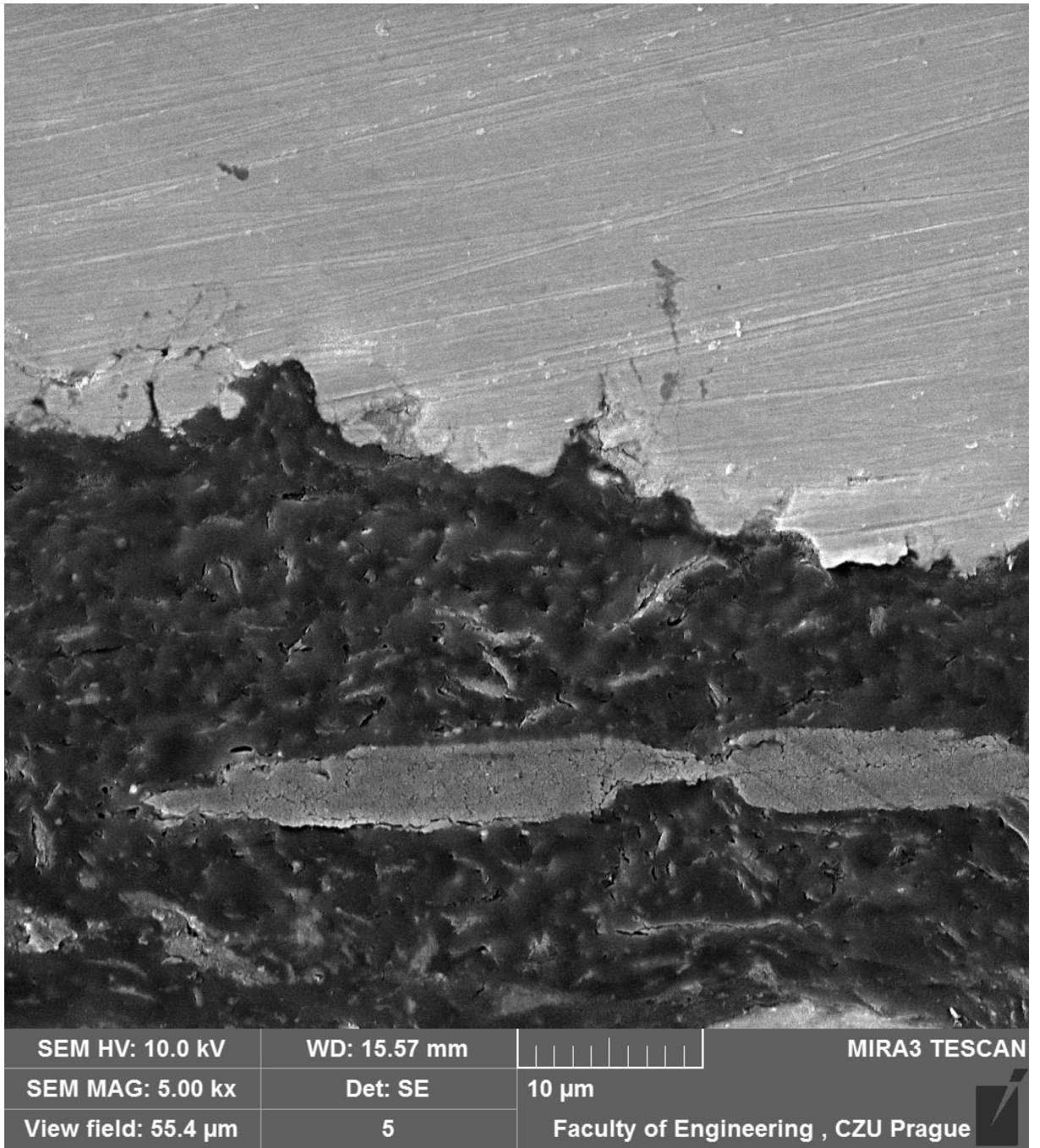
Příloha 22 - Degradovaný vzorek „35 O“, snímek č.3



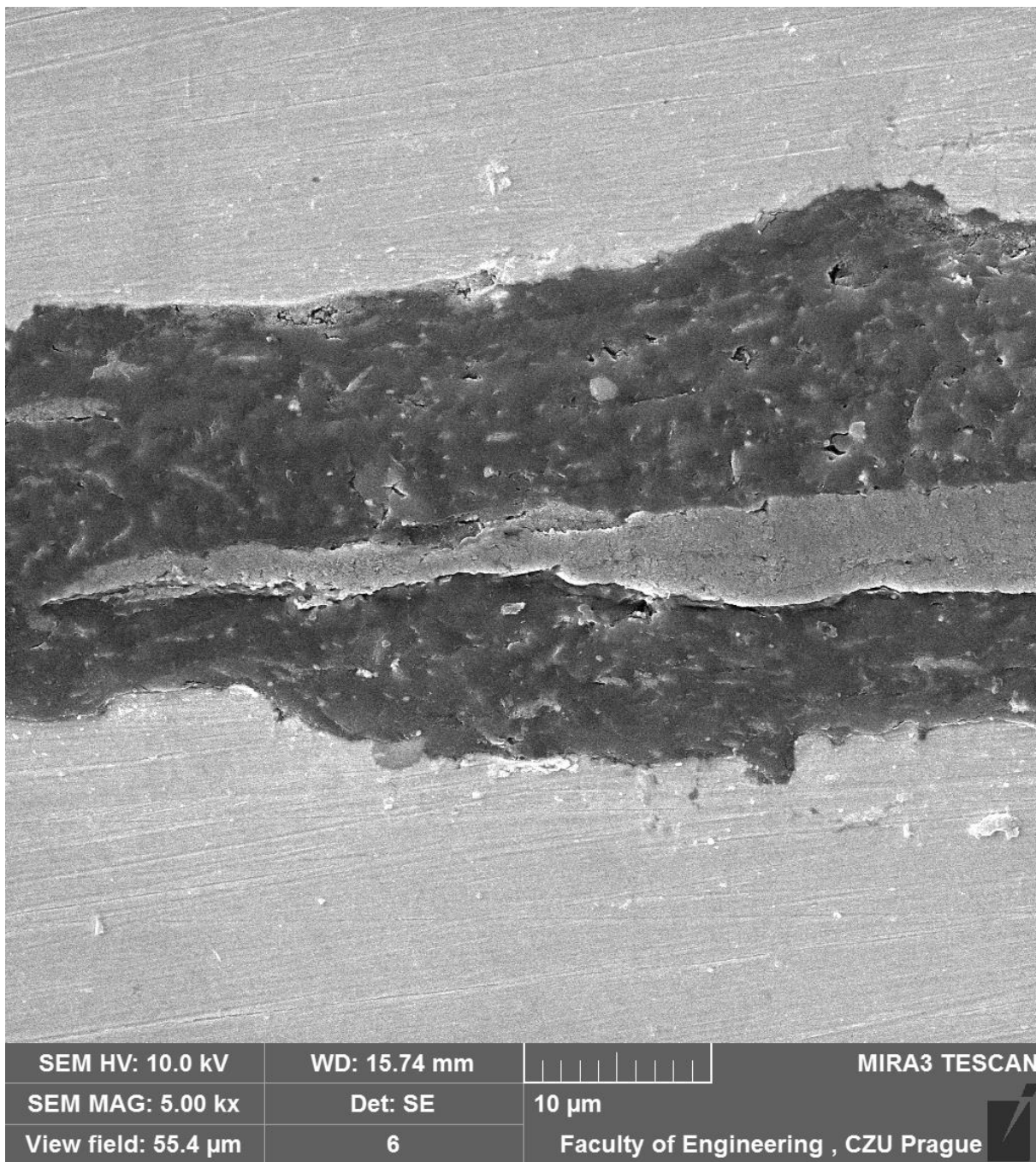
Příloha 23 - Degradovaný vzorek „35 O“, snímek č.4



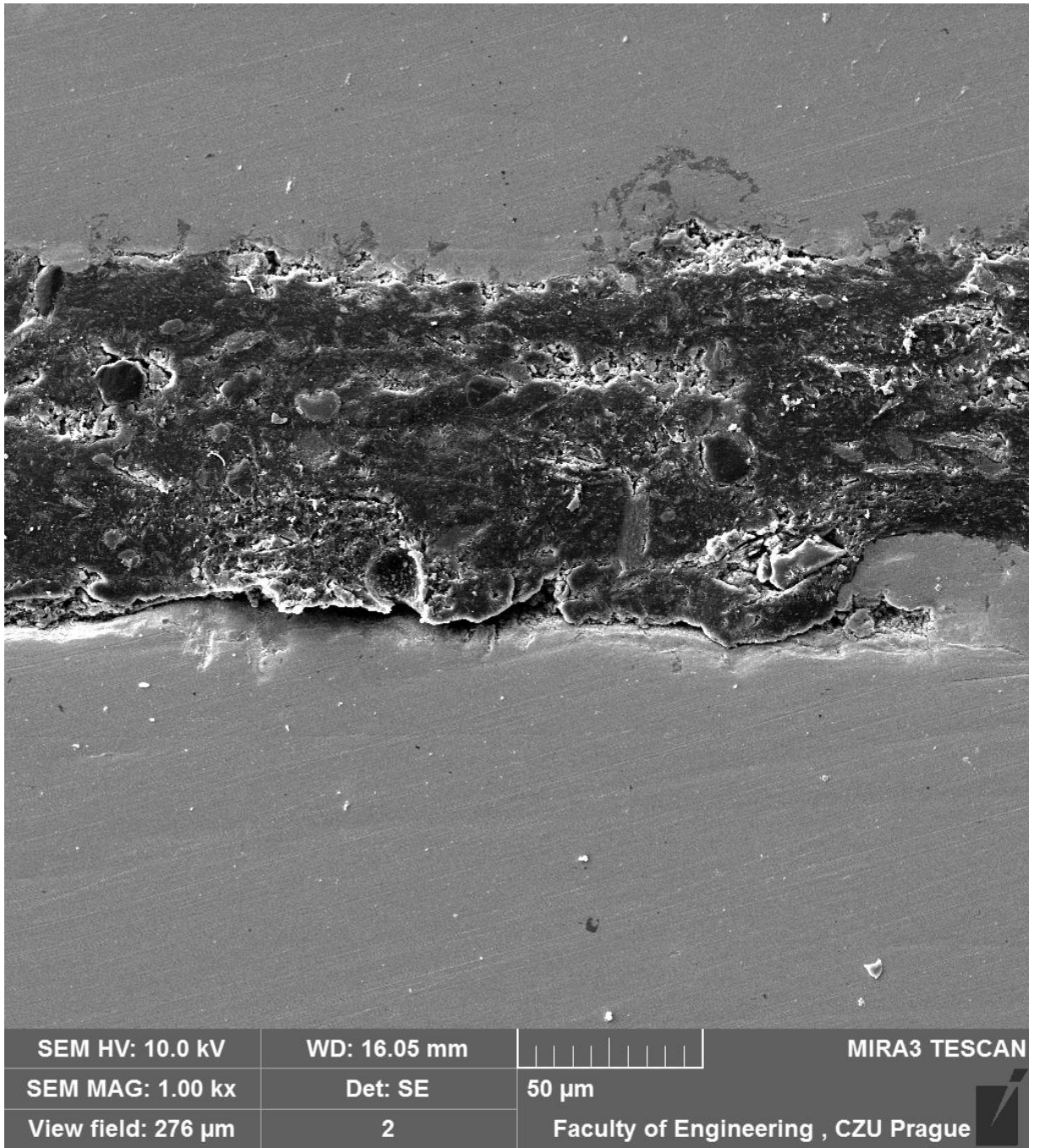
Příloha 24 - Nedegradovaný vzorek „0 H“, snímek č.2



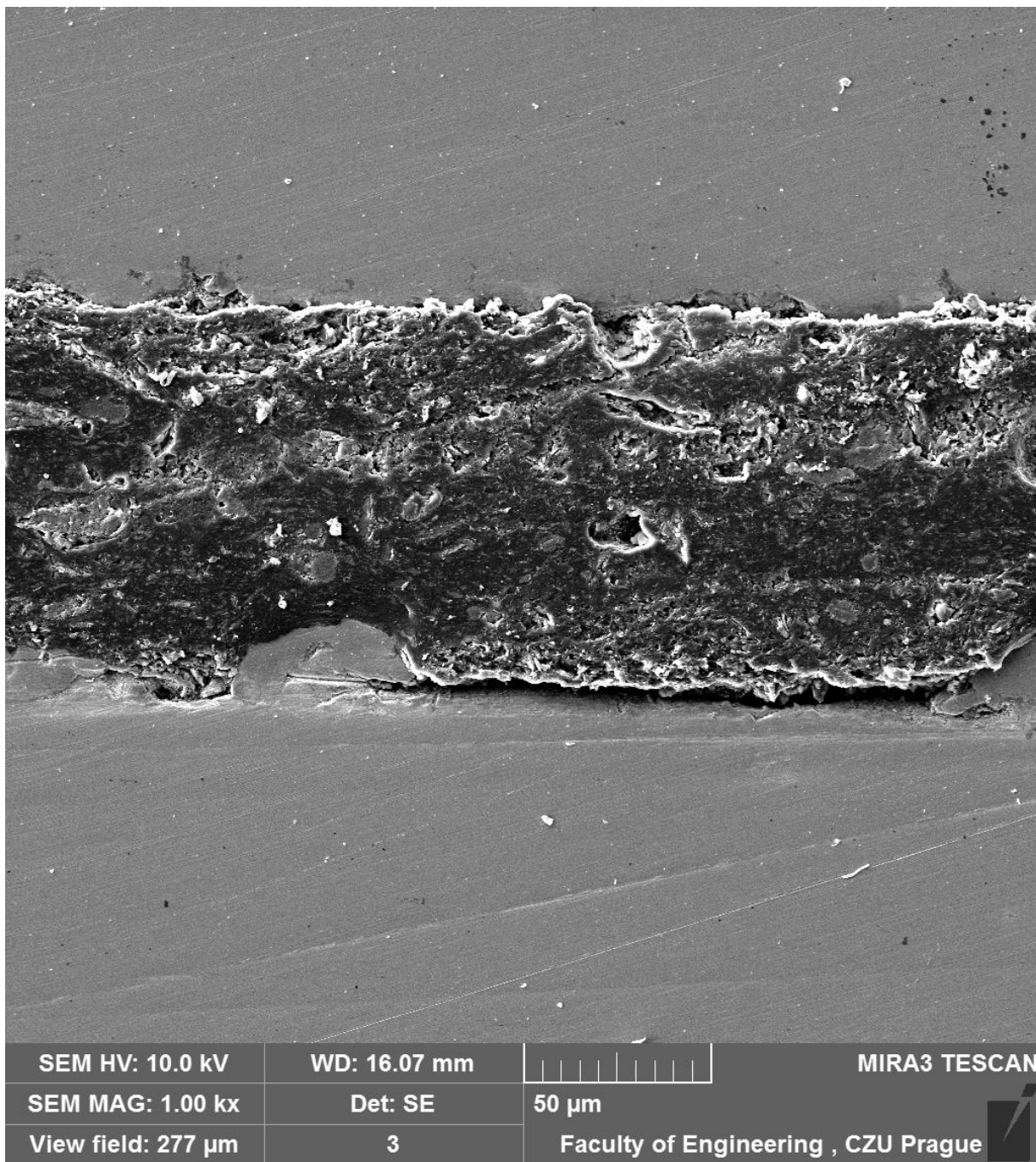
Příloha 25 - Nedegradovaný vzorek „0 H“, snímek č.3



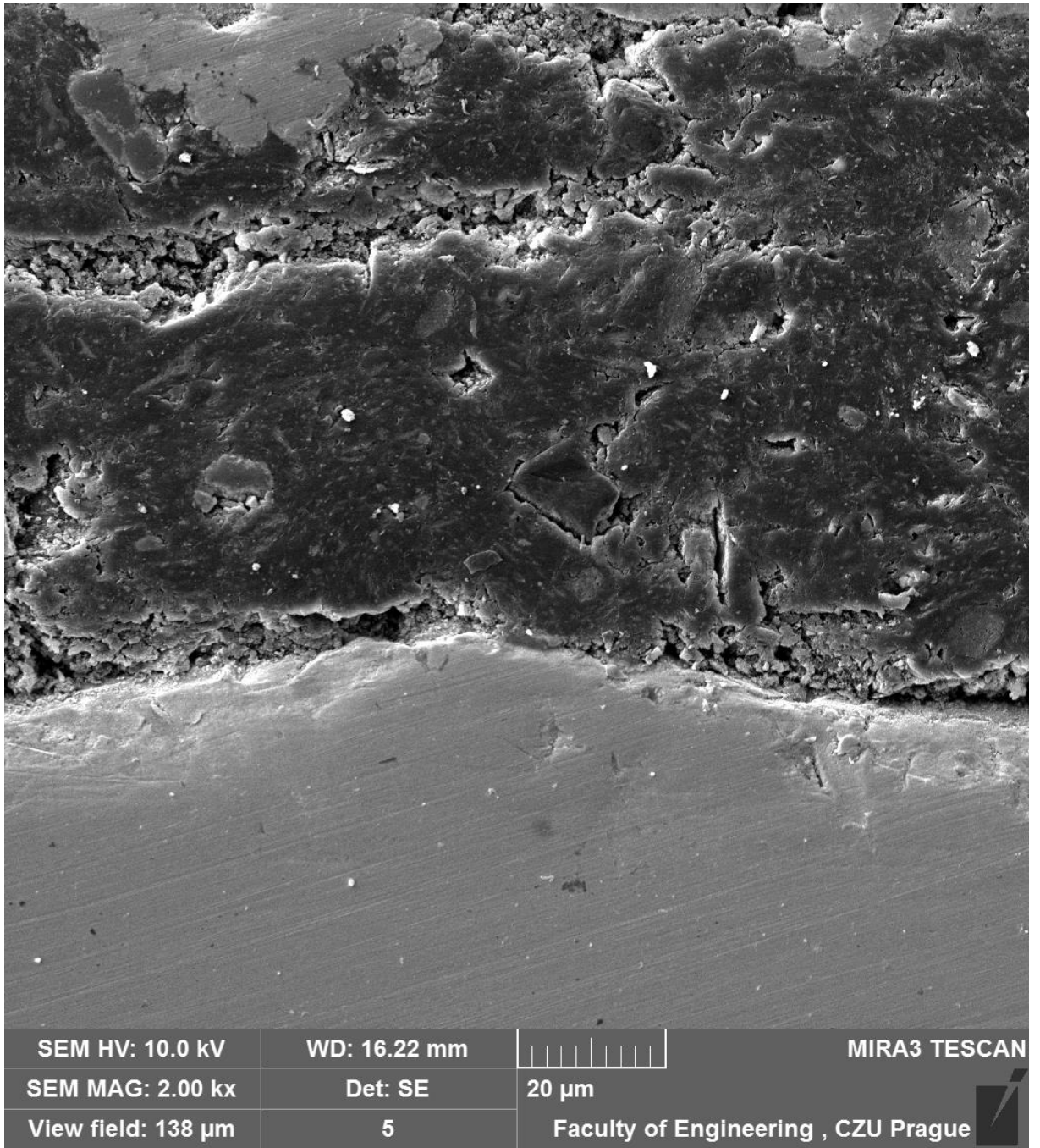
Příloha 26 - Nedegradovaný vzorek „0 H“, snímek č.4



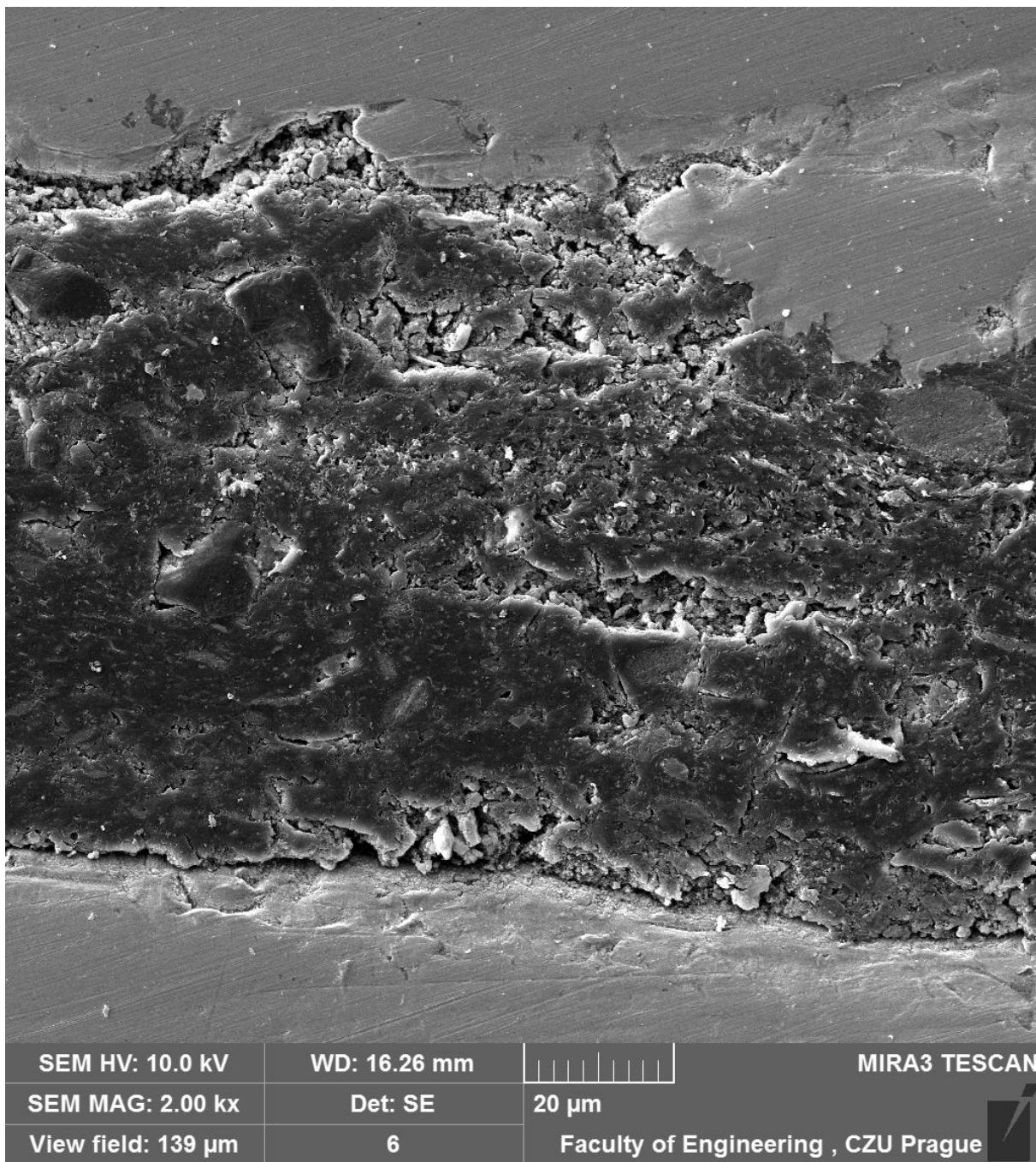
Příloha 27 - Degradovaný vzorek „35 H“, snímek č.2



Příloha 28 - Degradovaný vzorek „35 H“, snímek č.3



Příloha 29 - Degradovaný vzorek „35 H“, snímek č.4



Příloha 30 – Degradovaný vzorek „35 H“, snímek č.5