VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

SAMOREGENERAČNÍ POVLAKY V STROJÍRENSKÝCH APLIKACÍCH

SELF-HEALING COATINGS IN ENGINEERING APPLICATIONS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE Vít Žemba

AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE Ing. Michal Michalec, Ph.D.

SUPERVISOR

BRNO 2025

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav konstruování
Student:	**Vít Žemba**
Studijní program:	Základy strojního inženýrství
Studijní obor:	Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce:	**Ing. Michal Michalec, Ph.D.**
Akademický rok:	2024/25

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Samoregenerační povlaky v strojírenských aplikacích

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Samoregenerační povlaky představují revoluční přístup v oblasti tribologie. Tyto povlaky mají pozoruhodnou schopnost se po poškození samy opravit, čímž výrazně prodlužují svou životnost a zachovávají si své ochranné vlastnosti. Tento typ povlaků je aktuálně atraktivním tématem pro výzkum tzv. chytrých materiálů. V praktickém použití mohou tyto povlaky nejen navýšit životnost a efektivitu mechanismů, ale také snížit dopad na životné prostředí. Tato práce si klade za cíl shrnout klíčové poznatky v dané oblasti a představit budoucí trendy samoregeneračních povlaků ve strojírenství.

Typ práce: rešeršně syntetická

Cíle bakalářské práce:

Hlavním cílem práce je zpracování přehledu současného stavu v oblasti samoregeneračních povlaků a vytýčení trendů jejich potenciálního použití ve strojírenských aplikacích.
Dílčí cíle bakalářské práce:
– zpracovat rešerši zaměřenou na chytré materiály ve strojírenství,
– vypracovat přehled samoregeneračních povlaků z dostupné odborné literatury,
– syntetizovat získané poznatky z hlediska obtížnosti výroby, ceny a provozních podmínek,
– zhodnotit potenciál využití samoregeneračních povlaků v průmyslových aplikacích.

Požadované výstupy: průvodní zpráva.
Rozsah práce: cca 27 000 znaků (15 – 20 stran textu bez obrázků).
Časový plán, struktura práce a šablona průvodní zprávy jsou závazné:
https://www.ustavkonstruovani.cz/texty/bakalarske–studium–ukonceni/

Seznam doporučené literatury:

GONG, Hanjun; YU, Chengcheng; ZHANG, Lin; XIE, Guoxin; GUO, Dan et al. Intelligent lubricating materials: A review. Online. Composites. Part B, Engineering. 2020, roč. 202, s. 108450. ISSN 1359-8368.

KIM, Ki Hak; MAI, Hang Nga; HYUN, Dong Choon a LEE, Du Hyeong. New Autonomous Water-Enabled Self-Healing Coating Material with Antibacterial-Agent-Releasing Properties. Online. Pharmaceutics. 2022, roč. 14, č. 5, s. 1005. ISSN 1999-4923.

LI, Haiyan; CUI, Yexiang; WANG, Huaiyuan; ZHU, Yanji a WANG, Baohui. Preparation and application of polysulfone microcapsules containing tung oil in self-healing and self-lubricating epoxy coating. Online. Colloids and surfaces. A, Physicochemical and engineering aspects. 2017, roč. 518, s. 181-187. ISSN 0927-7757.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2024/25

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Martin Hartl, Ph.D. ředitel ústavu	doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D. děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá problematikou samoregeneračních povlaků a jejich potenciálem pro využití ve strojírenské praxi. Díky své schopnosti autonomně zacelovat defekty vzniklé provozním opotřebením strojírenských součástí proto vykazují velký potenciál z hlediska snížení nákladů spojených s údržbou, prodloužení životnosti součástí a omezení environmentálních dopadů. Práce představuje přehledovou studii zaměřenou na principy fungování těchto systémů a rozbor konkrétních příkladů z odborné literatury. Na základě provedené analýzy byly porovnány různé typy samoregeneračních povlaků z hlediska jejich regenerační schopnosti, adheze, odolnosti vůči korozi a technologické náročnosti. Z výsledků vyplývá, že ačkoli žádný z popsaných systémů zatím nesplňuje všechny požadavky pro širší nasazení v průmyslu, většina z nich vykazují slibné parametry pro specifické aplikace. Práce zároveň poukazuje na hlavní překážky, které brání širšímu využití těchto materiálů, a navrhuje směry dalšího vývoje.

KLÍČOVÁ SLOVA

Samoregenerační povlaky, chytré povlaky, samoregenerace, chytré materiály

ABSTRACT

This bachelor thesis focuses on self-healing coatings and their potential applications in mechanical engineering. Due to their ability to autonomously repair defects caused by operational wear of mechanical components, these coatings demonstrate significant potential for reducing maintenance costs, extending component lifespan, and minimizing environmental impact. The thesis presents a review study aimed at explaining the functional principles of these systems and analyzing specific examples from scientific literature. Based on the conducted analysis, various types of self-healing coatings are compared in terms of their healing efficiency, adhesion, corrosion resistance, and technological complexity. The findings indicate that although none of the described systems currently meet all the criteria for widespread industrial adoption, most exhibit promising characteristics for specific applications. The thesis also identifies the main obstacles to broader implementation of these materials and proposes directions for future research.

KEYWORDS

Self-healing coatings, smart coatings, self-healing, intelligent materials

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ŽEMBA, Vít. *Samoregenerační povlaky v strojírenských aplikacích*. Online, bakalářská práce. Michal MICHALEC (vedoucí práce). Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2025. Dostupné z: https://www.vut.cz/studenti/zavprace/detail/165842. [cit. 2025-03-09].

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych rád poděkoval Ing. Michalu Michalecovi, Ph.D. za odborné vedení a užitečné rady při psaní bakalářské práce. Dále bych chtěl poděkovat své rodině za plnou podporu při mém studiu.

PROHLÁŠENÍ AUTORA O PŮVODNOSTI PRÁCE

Prohlašuji, že diplomovou práci jsem vypracoval samostatně, pod odborným vedením Ing. Michala Michalece, Ph.D. Současně prohlašuji, že všechny zdroje obrazových a textových informací, ze kterých jsem čerpal, jsou řádně citovány v seznamu použitých zdrojů.

…….

Podpis autora

OBSAH

1 ÚVOD 12

2 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE 13

2.1 Analýza problému 13

2.2 Cíl práce 13

3 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ 14

3.1 Ochranné povlaky 14

3.2 Chytré materiály 15

3.2.1 Druhy chytrých materiálů 15

3.2.2 Principy mechanizmů chytrých materiálů 16

3.3 Chytré povlaky 19

3.3.1 Definice chytrých povlaků 19

3.3.2 Typy chytrých povlaků a jejich principy 19

3.4 Samoregenerační povlaky 22

3.4.1 Klasifikace regeneračních mechanismů 23

3.4.2 Způsoby nanášení samoregeneračních povlaků 25

3.4.3 Provozní a aplikační podmínky 27

3.4.4 Popis měřených parametrů a metod hodnocení 28

3.4.5 Rozbor studií samoregeneračních povlaků 30

4 DISKUZE 38

4.1 Srovnání parametrů a jejich aplikační význam 39

4.2 Aplikace ve strojírenských sférách 42

4.3 Budoucí vývoj a perspektivy 45

5 ZÁVĚR 46

6 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ 47

7 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN 50

7.1 Použité zkratky 50

8 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ 51

9 SEZNAM TABULEK 53

1 ÚVOD

Celosvětovým trendem ve strojírenství je v současnosti snaha o zvýšení efektivity výroby, snižování nákladů na údržbu strojů a zařízení a prodlužování jejich životnosti. Z těchto důvodů se stále častěji využívají speciální ochranné vrstvy schopné aktivně reagovat na vznikající poškození. Mezi nejperspektivnější z těchto řešení patří samoregenerační povlaky, které mají schopnost automaticky zacelit drobná poškození povrchu bez nutnosti vnějšího zásahu. Jejich hlavní výhodou je nejen prodloužení životnosti komponent, ale také potenciální snížení provozních nákladů díky nižší potřebě oprav a údržby. Přestože tyto materiály představují velký potenciál, jejich širšímu uplatnění v praxi může bránit technologická náročnost výroby, která je často spojena s použitím specifických surovin či pokročilými syntetickými postupy. Tato skutečnost se následně promítá do vyšších pořizovacích nákladů, což může být limitujícím faktorem pro jejich nasazení v běžném provozu.

Běžné ochranné vrstvy používané ve strojírenství mají často omezenou životnost, a pokud dojde k jejich poškození, je nutná pravidelná údržba či výměna. To má za následek častější odstávky strojů, vyšší náklady a komplikace v provozu. Zavedení samoregeneračních technologií proto představuje významnou inovaci umožňující snížit počet nutných servisních zásahů a prodloužit intervaly mezi nimi. Díky prodloužení životnosti komponent a menší potřebě pravidelných oprav mají tyto povlaky také potenciál redukovat množství odpadu, což může vést ke snížení negativního dopadu na životní prostředí.

2 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE

2.1 Analýza problému

Samoregenerační povlaky reagují na aktuální potřebu moderního průmyslu prodlužovat životnost strojních součástí a snižovat náklady spojené s jejich údržbou. Tradiční ochranné vrstvy mají omezenou schopnost odolávat dlouhodobému mechanickému a chemickému namáhání, a jejich poškození často vede k nutnosti nákladných oprav nebo výměn. Samoregenerační technologie, které umožňují automatické zacelení drobných defektů bez vnějšího zásahu, se proto jeví jako velmi perspektivní řešení. Jejich praktické zavedení do výroby je však podmíněno detailním porozuměním jejich vlastnostem, účinnosti a vhodnosti pro jednotlivé aplikace. Kromě technického hlediska je však důležité brát v úvahu také ekonomickou stránku těchto řešení – výroba samoregeneračních materiálů je často složitější a nákladnější než u běžných povlaků, což může omezit jejich praktické uplatnění, zejména v méně náročných provozech.

2.2 Cíl práce

Cílem bakalářské práce je zpracování přehledové studie zaměřené na samoregenerační povlaky a jejich potenciální využití ve strojírenství. Práce si klade za úkol objasnit principy fungování těchto materiálů, představit jejich základní typy, popsat mechanismy samoregenerace a následně zhodnotit aplikační potenciál na konkrétních příkladech.

3 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

Zajištění dlouhodobé životnosti součástí je ve strojírenství důležitým požadavkem k minimalizaci nákladů na údržbu, plynulému chodu výroby a zvýšení celkové spolehlivosti zařízení. Technické součásti jsou běžně vystavovány nepříznivým podmínkám, což postupně vede k jejich degradaci. Aby se těmto nepříznivým jevům předešlo, využívají se různé formy povrchové ochrany. Mezi nejčastěji používané metody patří aplikace ochranných povlaků, jako jsou nátěry, galvanické vrstvy nebo plazmové nástřiky. Povlaky představují v mnoha ohledech nejvhodnější řešení díky své ekonomické výhodnosti, dostupnosti a technické jednoduchosti.

3.1 Ochranné povlaky

Ochranný povlak [1] je vrstva materiálu, která se nanáší na povrch a tím vytváří funkční bariéru mezi součástí a okolním prostředím. Tato vrstva pak brání korozi, akumulaci usazenin a redukuje mechanické či chemické opotřebení způsobené činiteli, jako jsou vlhkost, teplotní cykly či UV záření. Výsledkem je zvýšená stabilita, odolnost a celková životnost komponent, na které jsou tyto povlaky nanášeny.

Obr. 3-1 Nanášení protikorozního povlaku na tlakovou nádobu [2]

I přes široké využití a technologickou dostupnost vykazují konvenční ochranné povlaky omezenou schopnost odolávat dlouhodobému působení nepříznivých vlivů. Vzhledem k jejich pasivnímu charakteru dochází postupem času ke vzniku poruch, což následně vyžaduje jejich opravu či celkovou výměnu. Tato omezení vedla k intenzivnímu zkoumání nových přístupů, které by umožnily lepší přizpůsobení ochranné vrstvy konkrétním podmínkám. Jedním ze směrů, který si v tomto ohledu získal rostoucí pozornost, je využití tzv. chytrých materiálů schopných samostatně reagovat na změny vnějšího prostředí a tím hlouběji rozšiřovat funkce ochranných povlaků [3].

3.2 Chytré materiály

Chytré materiály představují skupinu materiálů, které mají schopnost aktivně reagovat na změny vnějšího prostředí, a to prostřednictvím změn svých fyzikálních či chemických vlastností. Mezi aktivační podněty patří například změna teploty, tlaku, elektrického nebo magnetického pole, vlhkosti či pH. V reakci na tyto změny mohou chytré materiály měnit svůj tvar, tuhost, elektrickou vodivost nebo jiné materiálové charakteristiky[4]. Od běžných (pasivních) technických materiálů se odlišují především tím, že kombinují funkce senzoru a aktuátoru – tedy schopnost detekce i zpětné akce. V oblasti vývoje inteligentních systémů a adaptivních konstrukcí je jim proto věnována stále větší pozornost [5].

Ve strojírenství nabízejí chytré materiály výrazný potenciál především tam, kde je vyžadována provozní adaptabilita, samodiagnostika nebo snížení nároků na externí řízení. Lze je uplatnit například při konstrukci komponent schopných reagovat na teplotní změny, potlačovat vibrace nebo se samočinně přizpůsobovat měnícím se zatěžovacím podmínkám. Jejich význam dále roste s rozvojem trendů jako je Průmysl 4.0, automatizace a prediktivní údržba [5].

3.2.1 Druhy chytrých materiálů

Chytré materiály lze klasifikovat různými způsoby, například podle typu odezvy, funkce nebo oblasti použití. Gong a kol.[4] však navrhují dělení podle složení na tři hlavní skupiny: kovové, anorganické a polymerní chytré materiály.

Kovové chytré materiály

Kovové chytré materiály zahrnují slitiny, které vykazují aktivní odezvu na změny prostředí, nejčastěji na teplotu nebo mechanické namáhání. Nejčastěji zastoupenou skupinou jsou shape-memory alloys (SMA) [4], které se po předchozí deformaci dokážou opakovaně vracet do svého původního tvaru. Tato schopnost je využívána v technických i medicínských aplikacích, kde je požadována opakovatelná tvarová přizpůsobivost. Nejznámějšími zástupci jsou slitiny na bázi niklu a titanu, označované souhrnně jako Nitinol [5, 6].

Anorganické chytré materiály

Do této skupiny patří materiály, které reagují na mechanické nebo elektromagnetické podněty. Typickými zástupci jsou piezoelektrické a magnetostrikční materiály a také magnetoreologické kapaliny. Jejich vlastnosti umožňují aktivní interakci s okolím například změnou tvaru, tuhosti nebo dalších fyzikálních. Tyto materiály se často využívají v oblasti snímání, tlumení vibrací a řízení pohybu v technických systémech. [5, 6].

Polymerní chytré materiály

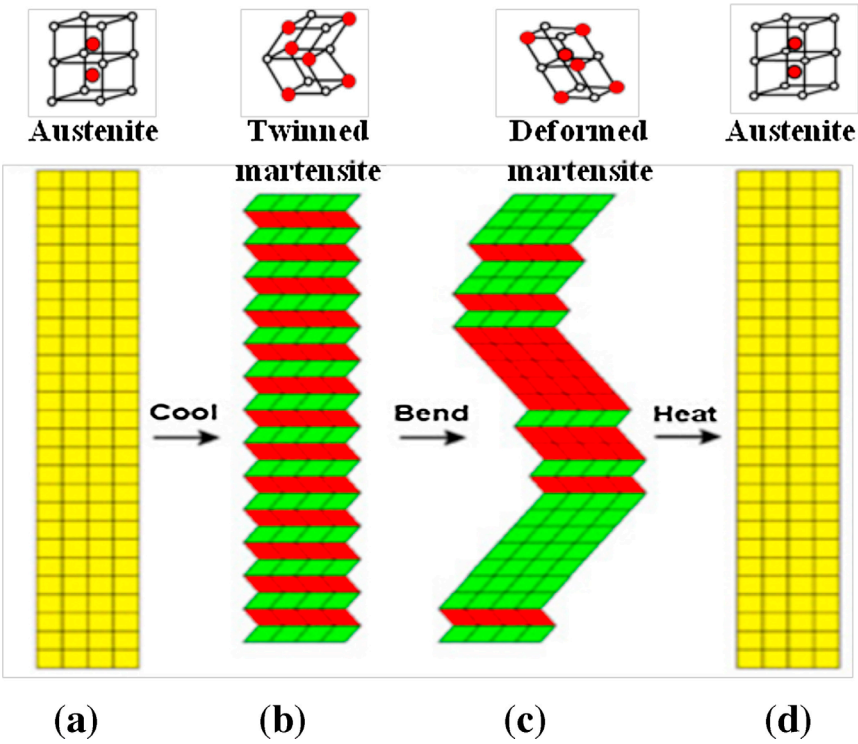
Mezi polymerní chytré materiály patří zejména elektroaktivní a stimuli-responzivní polymery. Elektroaktivní polymery (EAP) mění svůj tvar nebo velikost při působení elektrického napětí. Využívají se například v oblasti měkké robotiky, kde slouží jako umělé svaly schopné napodobovat přirozený pohyb. Stimuli-responzivní polymery upravují své vlastnosti v závislosti na vnějších podmínkách, jako je teplota, pH, světlo nebo vlhkost. Tyto materiály se zkoumají především v souvislosti s adaptivními technologiemi a biomedicínou, kde mohou reagovat na změny prostředí řízeným způsobem [4, 5].

3.2.2 Principy mechanizmů chytrých materiálů

Reakce chytrých materiálů na vnější podněty je umožněna specifickými fyzikálními nebo chemickými mechanizmy, které probíhají na úrovni jejich struktury. Tyto mechanizmy jsou vyvolávány různými typy stimulů, jako je teplota, elektrické či magnetické pole, mechanické zatížení nebo změny chemického prostředí [6].

Teplotní stimulace

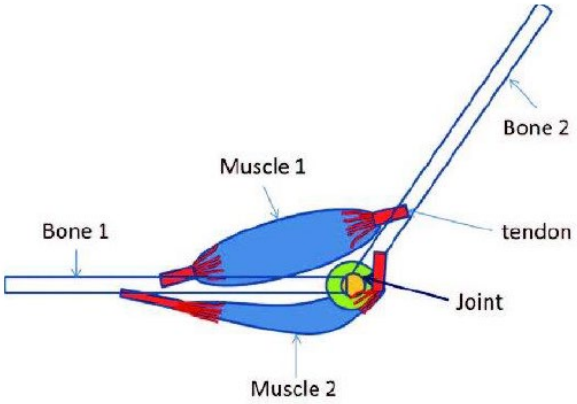
Změna teploty v některých pevných látkách vyvolává krystalografickou transformaci mezi dvěma pevnými fázemi. Při ochlazení dochází ke vzniku martenzitické struktury, která je mechanicky deformovatelná. Zahřátím se materiál přemění zpět na austenitickou fázi a obnoví původní tvar. Tento mechanismus je charakteristický pro slitiny na bázi niklu a titanu a tvoří takzvaný shape-memory effect [6].



Obr. 3-2 Schéma shape-memory efektu [7]

Elektrická stimulace

Působení elektrického pole může u některých chytrých materiálu způsobit změny v jejich vnitřní struktuře. V elektroaktivních polymerech dochází ke změně tvaru nebo objemu v důsledku elektrostrikce nebo pohybu iontů [5]. Tento mechanismus umožňuje materiálu reagovat deformací na intenzitu elektrického pole. U elektroreologických kapalin způsobuje elektrické pole uspořádání částic do struktur, které mění viskózní vlastnosti [6].



Obr. 3-3 Ilustrace umělých svalů v aplikaci robotické paže za použití EAP [5]

Magnetická stimulace

Působení magnetického pole může u materiálu, jako je kobaltnatý ferit, vyvolat změnu tvaru nebo mechanických vlastností. U magnetostrikčních materiálů dochází ke změně délky nebo objemu v důsledku vnitřních změn v magnetické struktuře materiálu. Tento jev je vratný a závisí na intenzitě magnetického pole. U magnetoreologických kapalin vede magnetické pole k vnitřnímu uspořádání částic, čímž se kapalina zpevní, a s tím vzroste její viskozita [6].

Mechanická stimulace

Některé chytré materiály reagují na mechanické působení tím, že v nich vzniká elektrický náboj. Tento jev se nazývá přímý piezoelektrický efekt a je typický pro materiály, které jsou schopny přeměnit mechanickou energii na elektrickou. Piezoelektrické aktuátory přeměňují elektrické signály na mechanický pohyb, což se dá využít například k nastavování optických zrcadel, čoček a různých automobilových součástí [6].

3.3 Chytré povlaky

Konvenční ochranné povlaky, jak bylo uvedeno v kapitole 3.1, slouží především jako pasivní bariéra mezi povrchem technických součástí a okolním prostředím. Jejich schopnost dlouhodobé ochrany je však omezená, zejména při mechanickém poškození nebo změnách provozních podmínek. Současný vývoj proto směřuje ke kombinaci ochranné funkce s aktivními vlastnostmi, které umožňují autonomní reakce na okolní vlivy. Významným krokem tímto směrem je využití principů chytrých materiálů, které byly popsány v předchozí kapitole. Integrací těchto aktivních složek do povlakových matric vznikají tzv. chytré povlaky, které jsou schopné detekovat poškození, měnit své vlastnosti podle okolních podmínek nebo iniciovat samoregenerační procesy.

3.3.1 Definice chytrých povlaků

Chytré povlaky představují inovativní ochranné vrstvy, které doplňují pasivní bariéru o novou škálu funkčních schopností. Tyto vrstvy dokážou samostatně reagovat na změny okolního prostředí a vykazovat funkční odezvy na specifické podněty bez nutnosti vnějšího zásahu [8].

Mezi typické odezvy patří například:

- signalizace poškození například změnou vzhledu či elektrických vlastností
- samoregenerace mechanického poškození
- řízené uvolňování inhibitorů koroze v závislosti na změně pH nebo vlhkosti
- změna smáčivosti nebo jiných povrchových vlastností.

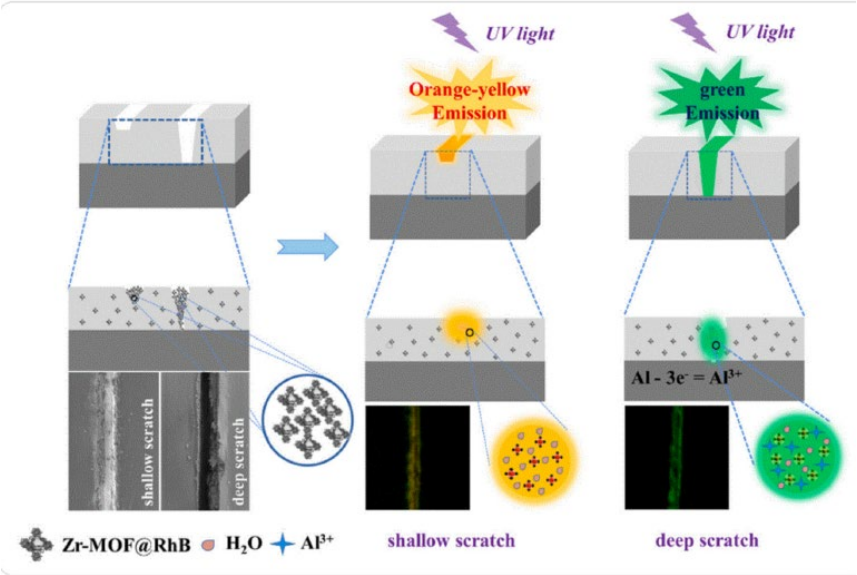
K dosažení těchto vlastností dochází díky integraci mechanizmů chytrých materiálů nebo funkčních struktur, jako jsou mikrokapsle či nosiče inhibitorů, do klasické povlakové matrice, zpravidla polymerní, keramické nebo kompozitní. Výsledkem je vícevrstvý systém, který povrch nejen chrání, ale také aktivně reaguje na poškození a v některých případech se dokáže samostatně opravit [9].

3.3.2 Typy chytrých povlaků a jejich principy

Chytré povlaky se dají rozdělit podle funkce, kterou vykonávají v reakci na konkrétní podnět. Mezi nejčastější patří signalizační systémy, vrstvy s řízeným uvolňováním inhibitorů, samočisticí a samoregenerační povlaky. Každý typ využívá odlišný technický přístup k dosažení požadovaného účinku, jako je například použití mikrokapslí, elektroaktivních složek nebo polymerních struktur s proměnnými vlastnostmi.

Signalizační povlaky

Signalizační povlaky slouží k detekci a indikaci vzniku povrchových poruch, nejčastěji pomocí změny barvy. Do povlaku jsou zabudovány látky, které typicky reagují na změnu pH. Při poškození se tyto látky uvolní a vizuálně označí narušené místo. Příkladem jsou kapsle obsahující thymolovou modř nebo fenolftalein, jejichž barevná odezva slouží ke snadné detekci poruch [8].



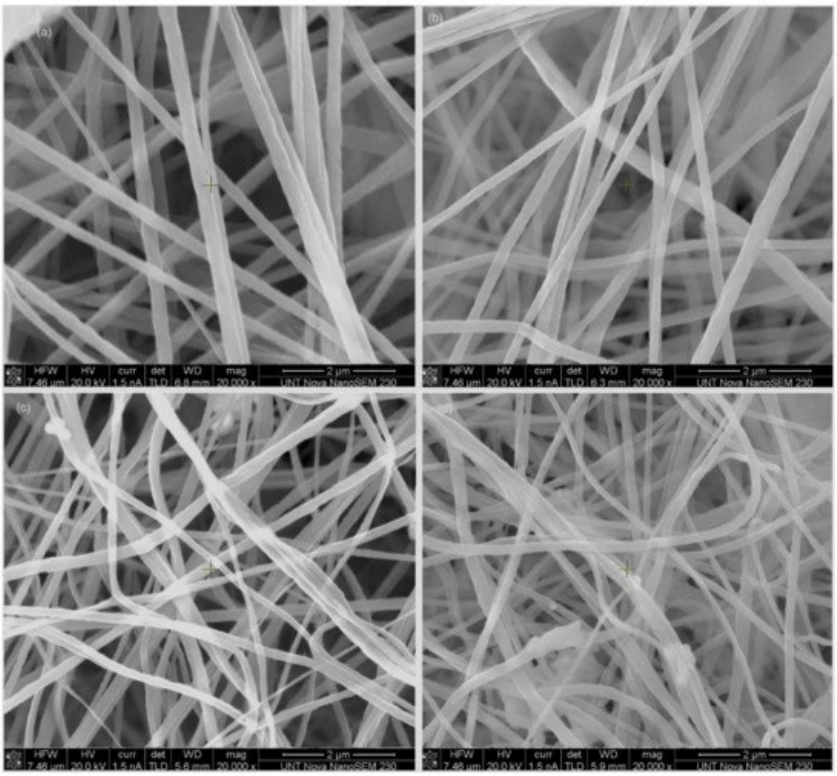
Obr. 3-4 Schéma chytrého povlaku umožňujícího rozeznat a signalizovat různé hloubky trhlin [8]

Samočisticí povlaky

Samočisticí systémy zabraňují ulpívání nečistot, vody nebo organických látek na povrchu. Existují dva hlavní principy: superhydrofobní efekt a fotokatalytická aktivita. Superhydrofobní vrstvy využívají kombinaci nízké povrchové energie a mikrotexturovaného povrchu, který minimalizuje kontakt vody s povlakem. Fotokatalytické povlaky (často s obsahem TiO_2) rozkládají organické látky pod vlivem UV záření [9].

Senzorově integrované povlaky

Jedná se o povlaky, ve kterých jsou integrovány senzorické jednotky schopné sledovat specifické fyzikální nebo chemické parametry. Tyto systémy mohou poskytovat informace například o teplotě, napětí, nebo vývoji koroze v reálném čase a umožňují tak aktivní diagnostiku bez nutnosti demontáže zařízení. Senzorické komponenty mohou být založeny na elektroaktivních prvcích, změně impedance nebo optické odezvě [8]. Příkladem takového řešení je zakomponování polyvinylfluoridových vláken, které jsou schopny detekovat korozi, do povlakové matrice [10].



Obr. 3-5 Mikroskopické záběry polyvinylfluoridových vláken [10]

Samoregenerační povlaky

Samoregenerační povlaky představují speciální kategorii chytrých povlaků, jelikož mají schopnost autonomně opravovat vzniklé poškození bez nutnosti vnějšího zásahu. Právě tato schopnost samostatné obnovy, která eliminuje nutnost častých kontrol či oprav, činí samoregenerační povlaky jedním z nejperspektivnějších řešení v oblasti moderní povrchové ochrany – a to jak z hlediska ekonomického, tak z hlediska provozní spolehlivosti. Podrobný popis principů, provedení, využitelnosti a rizik je obsahem následující kapitoly 3.4.

3.4 Samoregenerační povlaky

Hlavním přínosem samoregeneračních povlaků (SRP) je schopnost eliminovat nebo omezit šíření defektu a obnovit původní vlastnosti povrchu [11]. Inspirací pro vývoj těchto materiálů jsou biologické systémy, jako například lidská kůže nebo kosti, které se po poškození přirozeně regenerují. Tento koncept byl přenesen do oblasti materiálového inženýrství s cílem napodobit přirozené regenerační mechanismy i v technických aplikacích[12].

Na rozdíl od pasivních systémů, které po poškození ztrácejí svou funkčnost, SRP fungují jako aktivní ochranné prvky. Jsou schopny opravit vzniklé mikrotrhliny nebo jiné poruchy a tím výrazně prodloužit životnost povlaku i samotné součásti. V oblasti strojírenství jsou proto považovány za jeden z nejperspektivnějších směrů vývoje povrchové ochrany. Nabízejí konkrétní přínosy v několika klíčových oblastech:

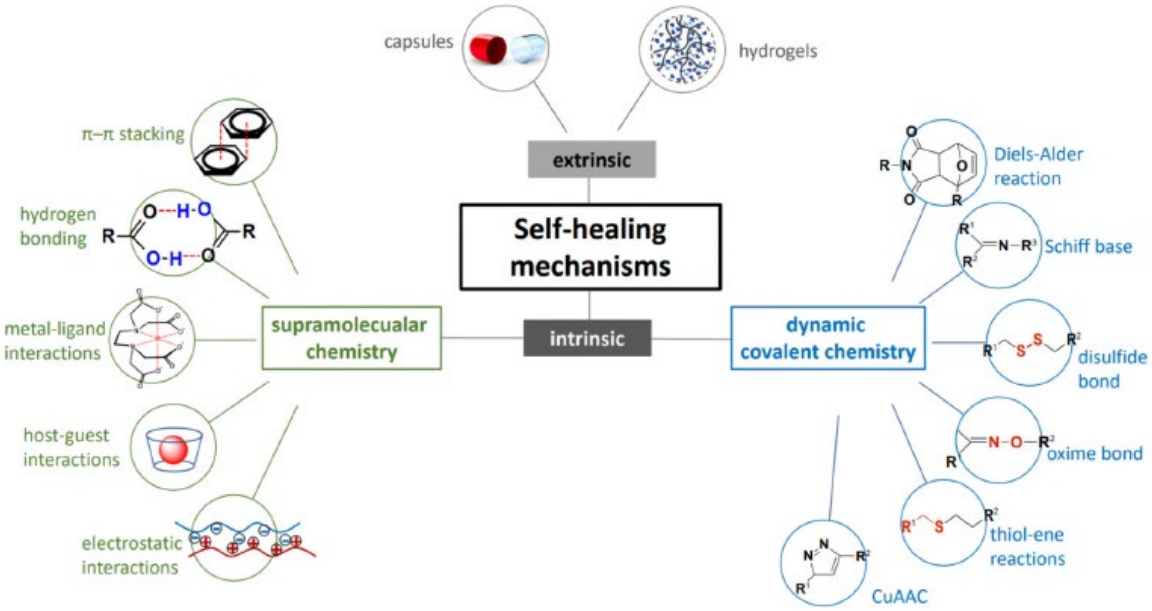
- **Provozní spolehlivost**: SRP snižují riziko kritického selhání díky schopnosti zacelit mikrotrhliny ještě před jejich rozšířením [13]
- **Ekonomika provozu**: Méně častá údržba a prodloužené servisní intervaly znamenají nižší provozní náklady [9]
- **Udržitelnost**: Delší životnost vrstev a menší spotřeba náhradních materiálů přináší pozitivní environmentální dopad [9]

Obr. 3-6 Diagram zobrazující budoucí vývoj trhu se samoregeneračními povlaky [8]

Přes tyto výhody čelí SRP také určitým výzvám. Patří mezi ně především vyšší pořizovací náklady, složitější návrh a syntéza, a omezená univerzálnost systémů – většina systémů je navržena pro specifické podmínky a není snadno přenositelná do jiných aplikací [14].

3.4.1 Klasifikace regeneračních mechanismů

Mechanismus samoregenerace v ochranných povlacích lze obecně rozdělit do dvou hlavních kategorií – extrinsický (vnější) a intrinsický (vnitřní). Toto členění vychází z rozdílu, zda je regenerační proces založen na přidané regenerační složce, nebo je integrovaný přímo v materiálové struktuře povlaku.

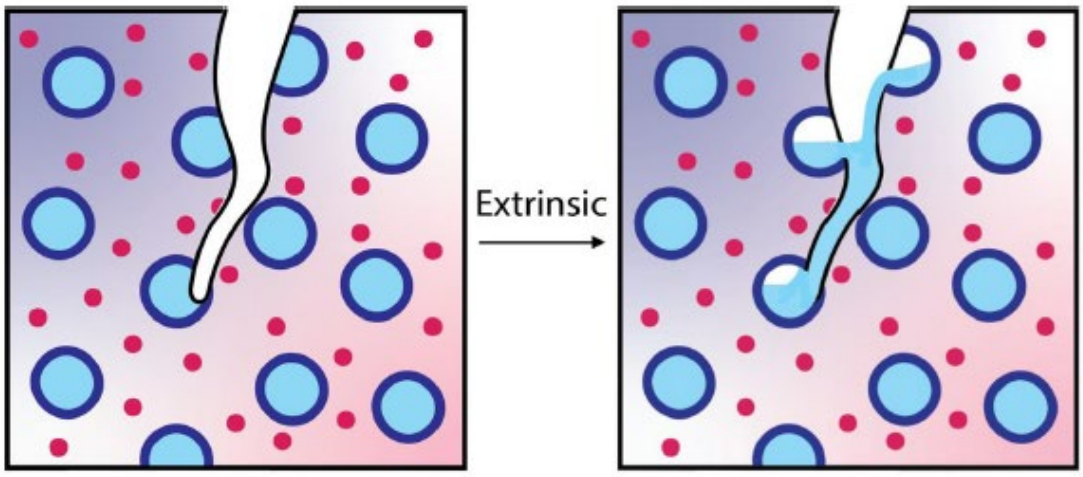


Obr. 3-7 Schéma rozdělení samoregeneračních mechanismů [8]

Extrinsické mechanismy

Extrinsické samoregenerační systémy [1] využívají mikrokapsle nebo hydrogelové nosiče, které obsahují regenerační prvek. Při narušení povlaku dojde k prasknutí kapsle nebo deformaci nosiče, čímž se regenerační činidlo uvolní a zaplní vzniklou trhlinu. Následně dochází k polymeraci nebo jiné chemické reakci, která obnoví celistvost vrstvy.

Výhodou těchto mechanismů je technologická jednoduchost a možnost cíleného návrhu. Jsou však typické svou jednorázovou funkcí – kapsle se po prasknutí již neobnoví. Postupně se objevují i pokročilejší návrhy, které dané omezení řeší. Například vícekomorové kapsle umožňují vícestupňovou reakci, zatímco mikrožilné systémy obsahují kanálky, které lze opakovaně doplňovat regenerační látkou. Tyto koncepty se však zatím nacházejí převážně ve fázi laboratorního výzkumu [11, 14].



Obr. 3-8 Ilustrační schéma extrinsického samoregeneračního mechanismu [14]

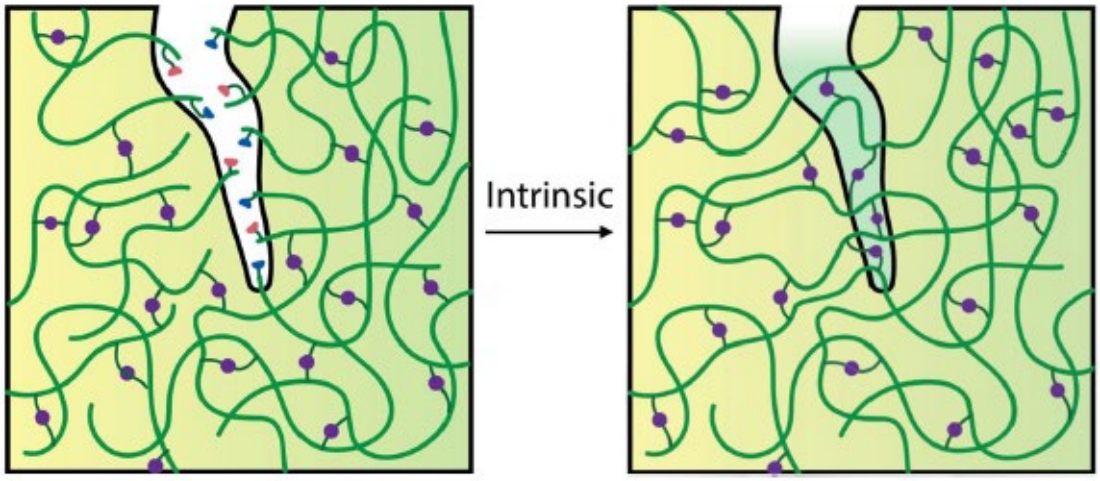
Intrinsické regenerační mechanismy

U intrinsických systémů je regenerační schopnost zabudována přímo do chemické nebo fyzikální struktury samotného materiálu. Tyto systémy využívají reverzibilní chemické vazby nebo supramolekulární interakce, které lze aktivovat specifickými podmínkami, například teplem, UV zářením nebo změnou pH [14].

Příklady intrinsických mechanizmů: [15, 16]

- **Diels–Alder reakce** – vratná chemická vazba aktivovaná teplem
- **Disulfidové můstky** – obnovitelné za pomoci UV záření nebo mírného zahřátí
- **Vodíkové vazby** – slabé, ale vysoce reverzibilní interakce
- **π–π stacking** – interakce mezi aromatickými skupinami umožňující tepelně aktivované propojení polymerních řetězců
- **Metal-ligandové vazby** – samoregenerační účinek založený na přechodném navázání kovových částic na organické sloučeniny, využívané např. u antikorozních povlaků

Intrinsické systémy umožňují vícenásobnou regeneraci a bývají vhodné pro aplikace, kde dochází k opakovanému zatěžování povlaku. Na druhou stranu bývají náročnější na syntézu a vyžadují kontrolované prostředí pro správnou aktivaci [16].



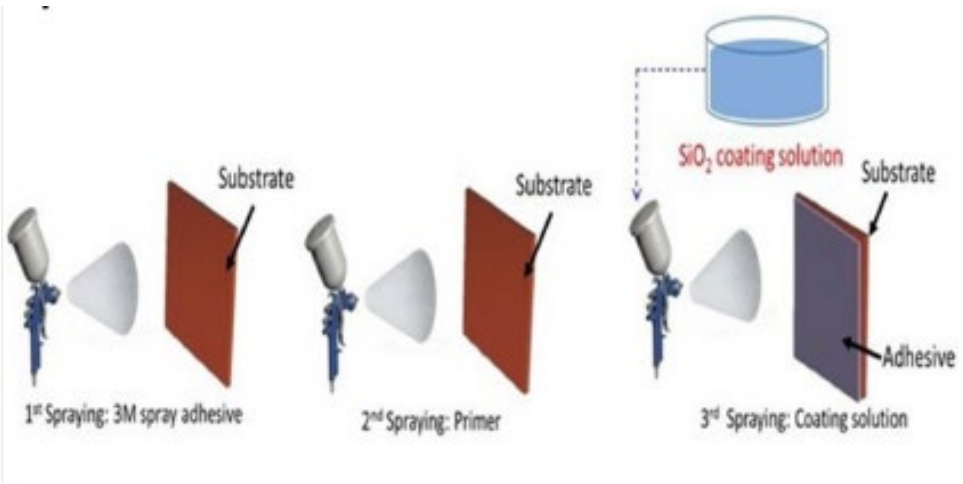
Obr. 3-9 Ilustrační schéma intrinsického samoregeneračního mechanismu [14]

3.4.2 Způsoby nanášení samoregeneračních povlaků

Klíčovým požadavkem nanesení SRP na povrch součástí je volba správného postupu, který zajistí rovnoměrné rozložení funkčních složek v povlaku, kompatibilitu se substrátem a zachování strukturální integrity samoregeneračních prvků.

Stříkání

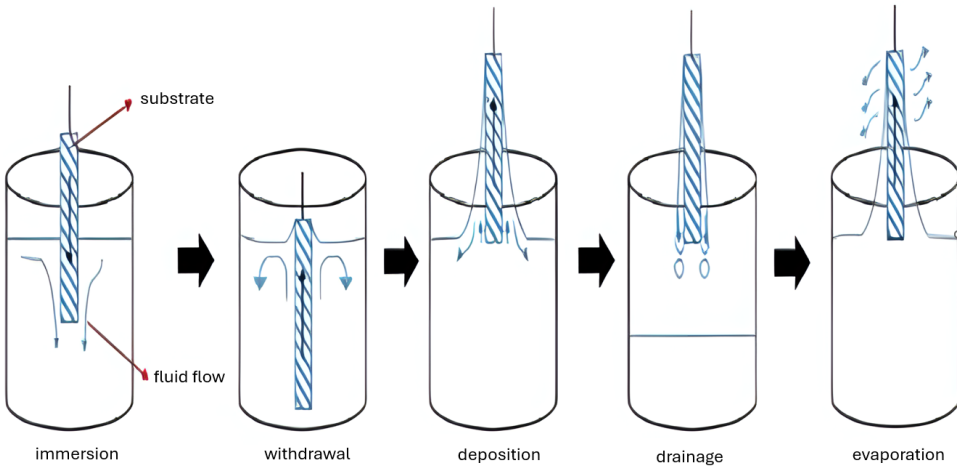
Stříkání se používá při aplikaci na složitější geometrie nebo větší plochy. Tato metoda je průmyslově dobře zavedená a umožňuje efektivní pokrytí i při vyšší viskozitě směsi, pokud je dobře přizpůsobena složení a typu použité matrice . V případě SRP je třeba zohlednit velikost kapslí či složení směsi, protože vysoký obsah dispergovaných částic může ovlivnit smáčivost přilnavost vrstvy.



Obr. 3-10 Schéma třífázového stříkového nanášení povlaku na chráněný materiál [12]

Namáčení

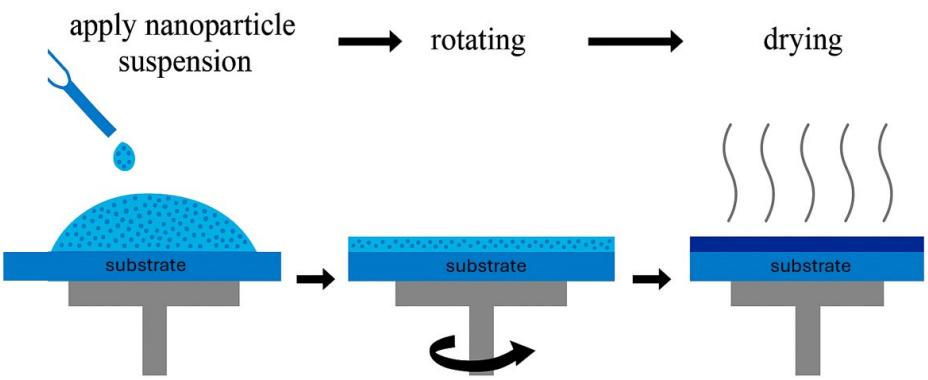
Metoda namáčení [12] se používá, pokud je cílem nanést polymerní matrici, obsahující mikrokapsle nebo funkční nanočástice na součást, za podmínek, které nezpůsobí jejich poškození. Výhodou tohoto postupu je schopnost vytvořit vrstvu s relativně rovnoměrným rozložením kapslí a kontrolovanou tloušťkou, což je klíčové pro efektivní fungování samoregeneračního mechanismu. Tato metoda je obzvláště vhodná pro tenké vrstvy na geometricky jednodušších součástech, kde nehrozí narušení rozložení aktivních složek mechanickým namáháním.



Obr. 3-11 Schéma jednotlivých kroků nanášecí metody [12]

Rotační nanášení

Nanášení rotací [12] se používá především tehdy, pokud je cílem vytvořit velmi tenké a rovnoměrné vrstvy s vysokou optickou nebo elektrochemickou citlivostí. Typicky se jedná o aplikace v laboratorním měřítku, kde se testují polymerní systémy s mikrokapslemi nebo vrstvenými strukturami. Omezením této techniky je, že je vhodná pouze pro ploché substráty malých rozměrů a že vysoké otáčky mohou ovlivnit distribuci těžších částic v matrici.



Obr. 3-12 Schéma nanášení samoregeneračního povlaku rotací [12]

3.4.3 Provozní a aplikační podmínky

Efektivní fungování samoregeneračních povlaků v reálných aplikacích závisí nejen na zvoleném typu regeneračního mechanismu a způsobu aplikace, ale také na podmínkách, ve kterých je daný systém používán. Kromě vlivu prostředí je nutné zohlednit interakci povlaku s podkladem, teplotní stabilitu materiálu, případně mechanické zatížení během provozu. V této části jsou shrnuty klíčové faktory, které je nutné při návrhu SRP zohlednit z hlediska praktického použití.

Teplota a stabilita polymerní matrice

U polymerních matric běžně využívaných v SRP, jako jsou polyuretany, PMMA nebo epoxidové pryskyřice, se teplota skelného přechodu (Tg) obvykle pohybuje v rozmezí 60 až 160 °C v závislosti na chemickém složení polymeru a míře zasíťování. Překročení této teploty při aplikaci nebo v provozu může vést k narušení struktury vrstvy nebo poklesu její funkčnosti. Například u povlaků využívajících Diels–Alder síťování bylo pozorováno, že vystavení teplotám nad 120 °C vedlo k rozkladu vratných vazeb, deformaci vrstvy a poklesu její ochranné schopnosti [13, 14].

Povrchová přilnavost k chráněnému povrchu

Zajištění dostatečné adheze mezi polymerní matricí a povrchem chráněné součásti je jedním z klíčových technických požadavků při návrhu samoregeneračních povlaků. Kovové podklady, jako je ocel nebo hliník, mají často nízkou povrchovou energii. V extrémních provozních podmínkách může dojít k selhání rozhraní, jak ukazují například experimenty s epoxidovými povlaky, které po ponoření do hlubokovodního prostředí ztratily až 72,9 % přilnavosti [16]. Tento problém lze částečně zmírnit použitím mikrokapslí, které zvyšují soudržnost vrstvy a omezují prostup korozních částic. Z hlediska preventivních opatření je obecně doporučována důkladná mechanická a chemická úprava povrchu před aplikací nátěru, například pomocí abrazivního tryskání, sol-gel technik nebo elektrochemických metod, které mohou výrazně zlepšit navázání polymerní vrstvy na chráněný povrch [17].

Vliv prostředí

Samoregenerační schopnost povlaků může být výrazně ovlivněna podmínkami prostředí, ve kterém jsou tyto materiály nasazeny. Faktory jako je vlhkost, UV záření, teplota či změny pH mohou nejen ovlivnit rychlost reakce, ale i samotnou aktivaci regeneračního mechanismu. Přítomnost těchto podmínek v provozním prostředí proto zásadně ovlivňuje účinnost a spolehlivost celého systému. Při návrhu samoregeneračních vrstev je nutné zohlednit nejen typ stimulace, ale i stabilitu regeneračních složek vůči dlouhodobému působení vlhkosti, teplotních cyklů a korozních médií [17].

3.4.4 Popis měřených parametrů a metod hodnocení

V této podkapitole jsou shrnuty klíčové parametry a metody experimentů, kterých bylo využito ve studiích pro vyhodnocení vlastností SRP. Jejich porovnání je základem následné diskuze a celkového zhodnocení výkonnosti systémů.

Regenerační účinnost

Regenerační účinnost vyjadřuje schopnost povlaku znovu obnovit své původní vlastnosti po poškození. Sleduje se zejména míra zacelení defektů, obnovení protikorozní funkce a případně další mechanické vlastnosti povlaku.

Elektrochemická impedanční spektroskopie (EIS) a impedance

Metoda EIS [12] je nejčastěji používaným nástrojem pro hodnocení samoregeneračních povlaků. Využívá sinusové střídavé napětí o proměnné frekvenci a měří odezvu systému ve formě impedance. V případě SRP se obvykle sleduje hodnota impedance při nízké frekvenci (např. 0.01 Hz), která odráží schopnost povlaku bránit průniku iontů a tím chránit kovový podklad před korozí. Vyšší hodnota impedance značí lepší korozní odolnost a kvalitnější bariérový efekt. Zvýšení impedance po regeneraci je také považováno za nepřímý důkaz zacelení defektu a obnovení ochranné funkce.

Test v solné mlze (Salt Spray Test – SST)

SST [12] je zrychlená korozní zkouška využívaná pro srovnání odolnosti povlaku. Vzorky jsou vystaveny působení jemné mlhy z 3,5% roztoku NaCl při zvýšené teplotě. Často se před testem mechanicky naruší (např. škrábnutím ve tvaru „X“), aby se simulovalo reálné poškození. U samoregeneračních povlaků se sleduje, zda povrch omezuje šíření koroze i po defektu, případně jak rychle se obnoví jeho ochranná funkce.

Lokální elektrochemická impedanční spektroskopie (LEIS)

LEIS [12] je variantou klasické EIS metody, která umožňuje sledovat impedanční změny v konkrétní oblasti povrchu. Měření se provádí pomocí mikroelektrody, která snímá změny proudu nad povrchem vzorku. Díky tomu lze velmi přesně sledovat vývoj regenerace v místě defektu, což u EIS není možné.

Kontaktní úhel

Kontaktní úhel vody [18] slouží k určení míry smáčivosti povrchu povlaku. Pokud tento úhel přesahuje 150°, povlak vykazuje superhydrofobní charakter.

Adheze

Adhezní pevnost [19] představuje míru soudružnosti mezi povlakem a chráněným povrchem. Výše adheze se stanovuje prostřednictvím zkoušek zahrnujících smykovou zátěž či odtrhové testy.

Teplota skelného přechodu (Tg)

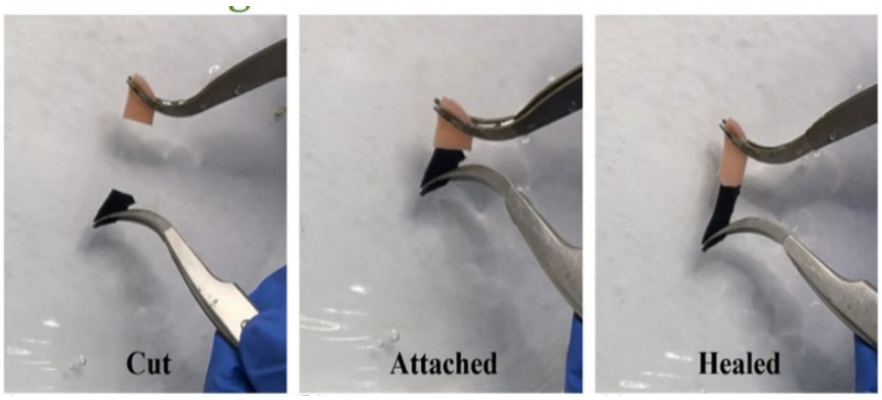
Tg [20] je teplota, při které se mění struktura polymeru z křehké na pružnou. Nad touto hranicí u některých SRP dochází ke zvýšení pohyblivosti polymerních řetězců, což má za následek zacelení defektů povlaku.

3.4.5 Rozbor studií samoregeneračních povlaků

Tato podkapitola slouží jako přehled nejaktuálnějších samoregeneračních systémů popsaných v odborné literatuře. U každého materiálu jsou uvedeny dostupné informace o jeho složení, typu regeneračního mechanismu, případně způsobu aktivace, a především konkrétní naměřené nebo popsané vlastnosti, které byly získány experimentálním testováním. Význam jednotlivých měřených parametrů, stejně jako stručný popis použitých měřicích metod, bude uveden v následujících částech práce. Cílem této kapitoly je proto především shromáždit reálná data, která budou dále využita při porovnávání vlastností jednotlivých samoregeneračních povlaků.

Super adhesive, self-healing elastomer based on synergistic dual dynamic interactions for corrosion-resistant coatings
J. Ma, X. Pang, Z. Chen, L. Du, P. Qiu (2025)

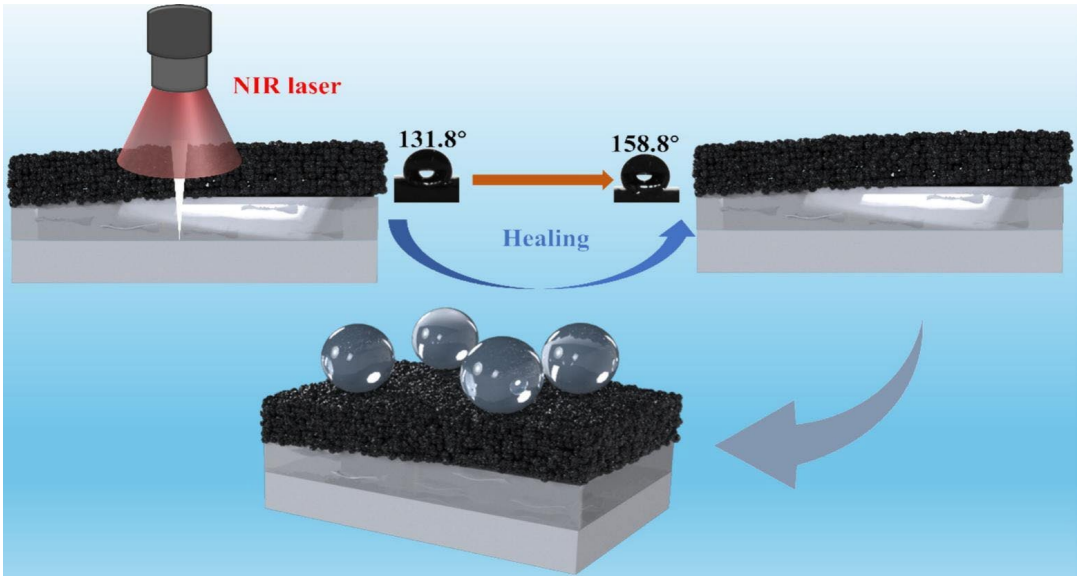
Studie [19] se zaměřuje na intrinsicky samoregenerační systém PDMS-SS1/UPy1, který kombinuje disulfidové a vodíkové vazby v jedné polymerní matrici. Povlak byl nanesen na uhlíkovou ocel S235 v tloušťce přibližně 100 µm. Syntéza probíhá ve dvou krocích, za použití organických rozpouštědel, řízené atmosféry a zahřívání na 60 °C. Celkový čas přípravy přesahuje 12 hodin. Nanášení na substrát probíhá manuálně, následné vytvrzení trvá několik dní při laboratorní teplotě. Regenerační účinnost dosahuje > 92.86 % při 90 °C, zatímco při 30 °C byla účinnost 71.43 %. Vizuální regenerace škrábance probíhá během několika vteřin, což bylo doloženo optickou mikroskopií. Regenerace je funkční i ve vodním prostředí, a to při ponechání vzorku pod vodou po dobu 24 hodin, i když bez přesně kvantifikovaného výsledku. Adheze povlaku činí 0,85 MPa. Kontaktní úhel vody se po 14 dnech v 3.5 % NaCl změnil z 92° na 88°, což ukazuje stabilní smáčivost. Korozní odolnost byla hodnocena metodou EIS. Počáteční impedance činila $2.54\times10^{9}\ \Omega\cdot cm^{2}$, po 70 dnech expozice v NaCl roztoku klesla na $9.33\times10^{6}\ \Omega\cdot cm^{2}$. Povlak zároveň odolal 720 hodinám v solné mlze bez viditelné degradace.



Obr. 3-13 Regenerační proces povlaku PDMS-SS1/UPy1 [19]

Self-healing superhydrophobic anti-corrosion coating with dual photo-thermal and pH response for effective anti-icing and de-icing
P. Yu, Z. Yu, K. Liao, S. Xia, K. Li, J. Chen, X. Zhang (2025)

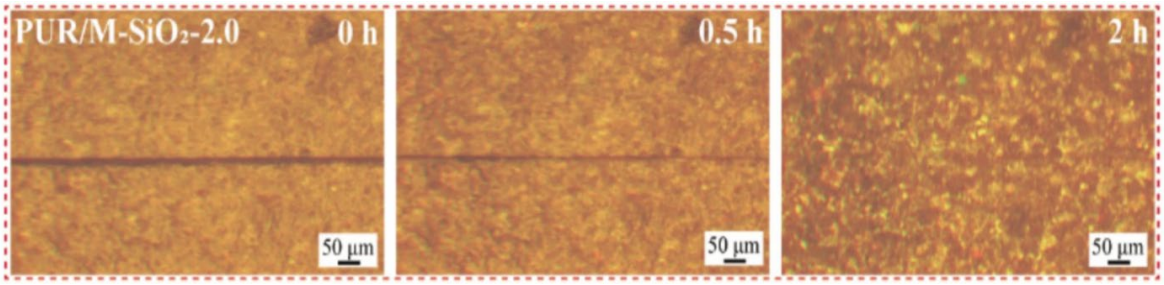
Studie [18] popisuje dvouvrstvý extrinsický samoregenerační povlak MZT/SMP-MZSA, který funguje skrze uvolňování inhibitorů na bázi pH a fototermální aktivaci pomocí NIR záření. Spodní ochranná vrstva obsahuje funkční vrstevnatý materiál a modifikované kovo-organické částice, horní vrstva je tvořena polymery s pamětí tvaru. Syntéza povlaku zahrnuje chemickou úpravu a leptání materiálů, vakuové sušení a vrstvení dvou povlakových složek. Nanášení probíhá štětcem (spodní vrstva) a stříkáním (vrchní vrstva), které potom následuje vytvrzením při 60 °C a 80 °C. Regenerační schopnost byla potvrzena opticky, kdy škrábanec byl zcela zacelen do jedné minuty po ozáření NIR světlem. Samoregenerace je možná i v kyselém prostředí. Impedance měřená metodou EIS dosahovala po 40 dnech v 3,5 % NaCl hodnoty $4{,}47\times10^{9}\ \Omega\cdot cm^{2}$. Vyznačuje se vysokou mechanickou pevností – pevnost v tahu dosáhla až 24,86 MPa a adheze činila 8,7 MPa. Povrchová úprava dosahovala superhydrofobních vlastností s kontaktním úhlem 159,3°.



Obr. 3-14 Schéma regeneračního procesu povlaku MZT/SMP-MZSA včetně vytyčení superhydrofobního povrchu [18]

Rapid UV-curable constructing rosin-based superhydrophobic composite coatings with self-healing properties and multifunctional protective performance
S. Xu, C. Fan, S. Zhu, D. Huang, J. Xu, Y. Yang, J. Li, D. Yan, J. Liu (2025)

Studie [21] popisuje samoregenerační kompozitní povlak, který je tvořen polymerní matricí s modifikovanými nanočásticemi SiO_2. Práce neuvádí žádné specifické označení pro tento povlak, proto bude v této práci pro lepší přehlednost označen jako R-PUR-SiO_2. Povrch vykazuje kromě samoregenerační schopnosti také superhydrofobní charakter. Příprava povlaku probíhá nanesením kapalné směsi na bázi polyuretanu a SiO_2 částic, které se následně vytvrzují UV zářením po dobu 1 minuty. Před nanesením se částice chemicky upravují pro lepší kompatibilitu s polymerem. Proces nevyžaduje speciální atmosféru. Regenerace povlaku po poškození byla vizualně kompletní po 2 hodinách při zahřátí na 80 °C. Obnovuje se jak struktura, tak i smáčivost – kontaktní úhel vody se zvýšil ze 144.4° na 156,8°. Korozní odolnost byla potvrzena elektrochemickým měřením v 3,5 % NaCl. Impedance dosáhla $5{,}7\times10^5$ Ω·cm² po 5 dnech expozice. Materiál vykazoval pevnost v tahu 28,9 MPa a vysokou houževnatost, což ukazuje na jeho schopnost snášet mechanické zatížení bez náhlého porušení.

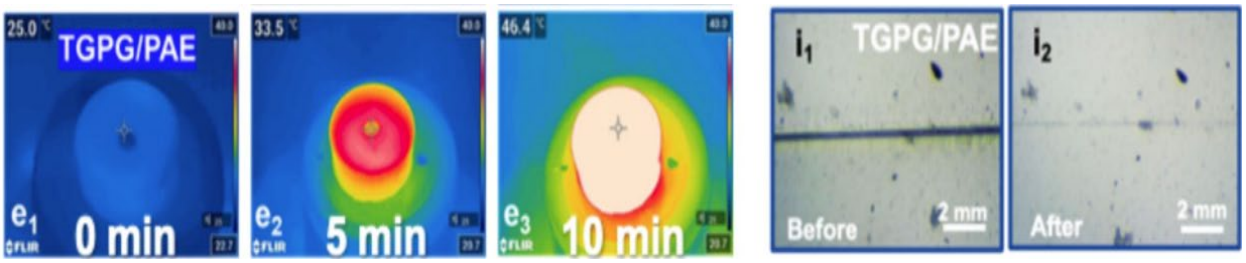


Obr. 3-15 Mikroskopická dokumentace regenerace povlaku R-PUR-SiO_2 [21]

Bio-Based Self-Healing Anti-Corrosion Coating with gel microspheres via One-Step In-Situ Crosslinking

Y. Liu, M. Zhang, J. Liu, H. Zuo, Q. Yuan, Z. Wang, Z. Lu, H. Wang (2025)

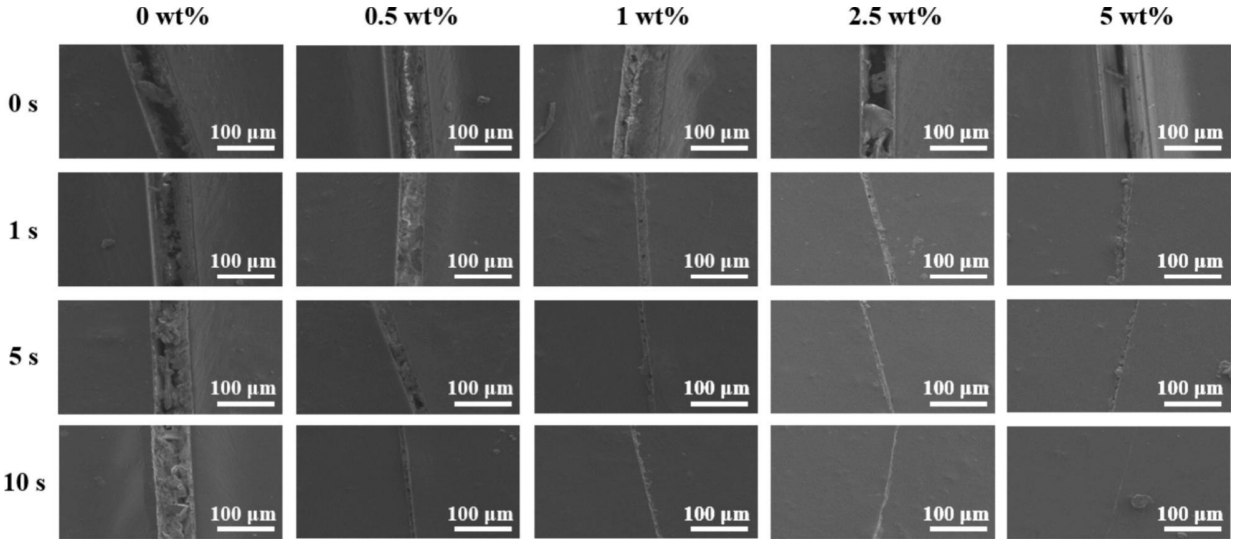
Studie [22] popisuje samoregenerační antikorozní povlak TGPG/PAE, který kombinuje flexibilní polymerní matrici s jemně rozptýlenými gelovými mikročásticemi. Povrch je navržen tak, aby reagoval na zvýšenou teplotu – například přímým ohřevem nebo pomocí infračerveného záření. Příprava povlaku probíhá v jednom kroku, kdy se aktivní složky mísí přímo do polymerní směsi a nanášejí na kovový substrát. Vytvrzování probíhalo za pokojové teploty, výsledná tloušťka vrstvy dosahuje přibližně 80 µm. Regenerace poškození nastává při zahřátí nad teplotu ~46 °C. Poškrábaná oblast se zacelila během 10 minut při ozáření NIR světlem. Po regeneraci nebyly ve vrstvě patrné žádné trhliny nebo defekty. Korozní odolnost byla ověřena metodou EIS v 3,5 % NaCl. Povlak dosáhl impedance přes $5\times10^9\ \Omega\cdot cm^2$. Adheze po 168 hodinách v kondenzační komoře dosáhla až 7 MPa. Povlak dosahoval pevnosti v tahu až 2,8 MPa.



Obr. 3-16 Regenerace povlaku TGPG/PAE vlivem zahřátí NIR světlem [22]

Photothermal self-healing and anti-corrosion water-borne coatings based on phytic acid-doped polyaniline
J. Liu, W. Lin, R. Liu, J. Luo (2025)

Studie [23] popisuje samoregenerační povlak, jehož aktivní složku tvoří kompozit PA/PANI. Povlak využívá fototermální účinek – při ozáření infračerveným světlem dochází k zahřátí materiálu nad teplotu skelného přechodu, čímž se aktivuje regenerační proces. Příprava povlaku zahrnuje rozptýlení aktivní složky v běžné epoxidové matrici. Povrch byl nanesen na ocel a vytvrzen při 70 °C. Tloušťka vrstvy dosahovala přibližně 98 µm. Při regeneračním procesu se trhlina zacelila během 5–10 sekund při ozáření NIR světlem, kdy nejlepší výsledek prokázalo obsažení 5 hm.% aktivní složky. Povrchová struktura se obnovila beze stop poškození. Korozní odolnost byla potvrzena pomocí EIS. Po 28 dnech ve 3,5 % NaCl zůstala impedance nad $1\times10^9\ \Omega\cdot cm^2$. Po regeneraci poškozeného vzorku impedance opět vzrostla na $2{,}19\times10^9\ \Omega\cdot cm^2$. V testu solné mlhy (500 h) nebyla pozorována žádná koroze. Adheze dosáhla největší hodnoty 4,97 MPa při 0,5 hm.%. U 5hm.% to je 1,2 MPa.

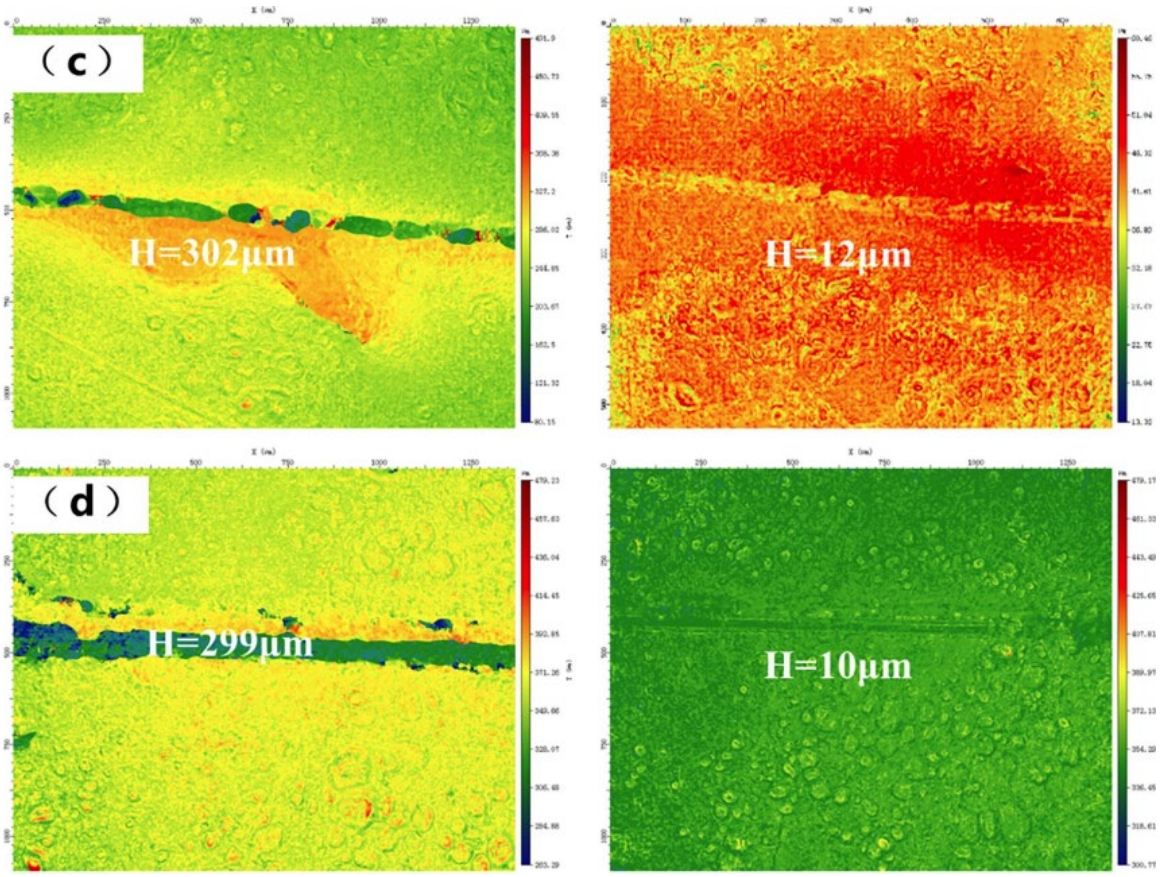


Obr. 3-17 Mikroskopická dokumentace regeneračního procesu povlaku při různém obsahu kompozitu PA/PANI [23]

Multifunctional self-healing coatings with orderly distributed microcapsules aligned by magnetic field

Z. Bi, F. Gao, M. Liu, R. Zhang, R. Liu, G. Cui, J. Xu (2022)

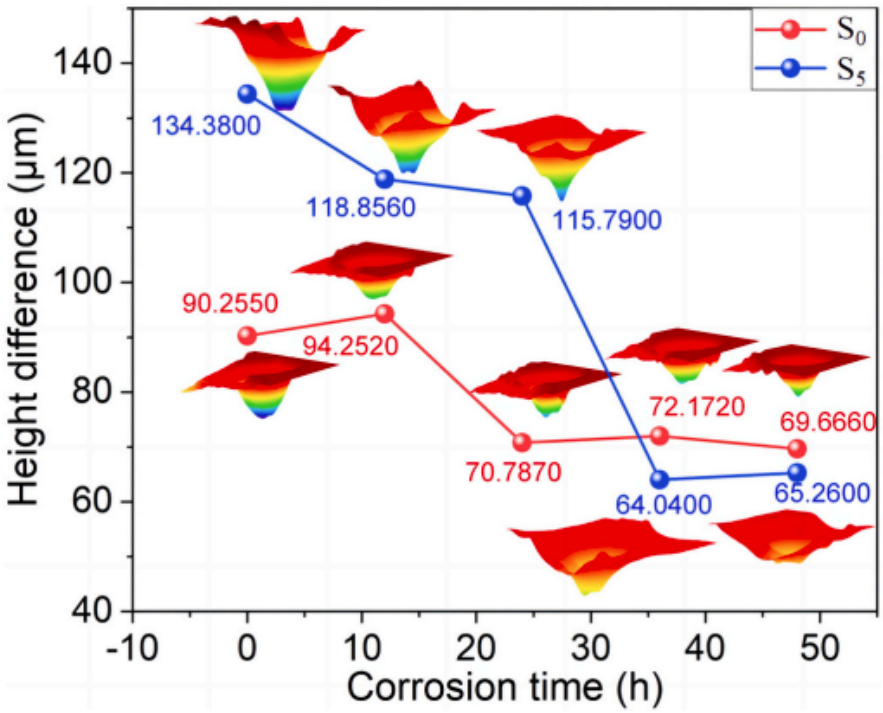
Studie [24] popisuje samoregenerační povlak, který kombinuje benzotriazol s rovnoměrně uspořádanými mikrokapslemi obsahující lněný olej. Mikrokapsle jsou ve vrstvě uspořádány pomocí magnetického pole. Příprava povlaku proběhla smícháním 15 hm. % kapslí do epoxidové matrice, která byla následně nanesena na kovový povrch. Povlak při tomto složení vykazuje >92% regenerační účinnosti. Vyšší obsah kapslí zlepšuje regenerační schopnost povlaku, ale zároveň vede ke vzniku porézní struktury, což negativně ovlivňuje korozní odolnost a přilnavost vrstvy k podkladu. Tloušťka vrstvy byla přibližně 400 µm. Po 48 hodinách došlo k téměř úplnému zacelení umělých škrábanců hlubokých 300 µm. Korozní odolnost byla ověřena pomocí EIS a testu ve slané mlze. Impedance povlaku dosáhla hodnoty $1{,}6\times10^{6}\ \Omega\cdot cm^{2}$ po 48 hodinách v 3,5 % NaCl.



Obr. 3-18 Mikroskopická dokumentace regenerace defektu s obsahem c) 15 hm.% funkční složky, a d) 20 hm.% funkční složky [24]

A smart self-healing coating utilizing pH-responsive dual nanocontainers for corrosion protection of aluminum alloy
J. Du, H. Wang, Z. Wang, X. Li, H. Song (2024)

Studie [25] popisuje extrinsický samoregenerační povlak S_5 určený pro ochranu hliníkových slitin, který využívá pH-responzivní dvojici nanonosičů, jež jsou rozptýleny v polymerní matrici. Povlak byl vytvořen ve třech krocích: nejprve se na povrch nanesla tenká základní vrstva s pomocí chitosanu, poté se přidaly mikročástice s aktivní látkou, a nakonec byla aplikována ochranná vrstva, která byla za tepla slisována. Tloušťka suchého povlaku činí přibližně 14 µm. Regenerace byla testována na uměle vytvořeném kuželovém defektu o průměru 1000 µm a hloubce 100 µm. Po expozici v 3,5 % NaCl došlo k výraznému zacelení – hloubka defektu klesla z 134,4 µm na 65,3 µm během 48 hodin. Obnova byla potvrzena metodou LEIS a 3D mikroskopií. Impedance v místě poškození vzrostla z $1{,}21\times10^4$ na $2{,}09\times10^4$ Ω·cm². Povrch vykazoval znatelné zacelení už po 24 hodinách. Dlouhodobá korozní odolnost byla ověřena metodou EIS po 30 dnech expozice. Povlak si udržel impedanci v řádu 10^5 Ω·cm², zatímco referenční vzorek bez ochrany korodoval již během prvních 48 hodin.



Obr. 3-19 Regenerace defektu povlaku S_5 [25]

4 DISKUZE

Analyzované samoregenrační povlaky vykazují znatelné rozdíly ve způsobu aktivace, rychlosti regeneračního procesu i v celkové schopnosti obnovit ochrannou funkci po poškození. V některých případech dochází k zacelení téměř okamžitě, jinde tento proces trvá i několik desítek hodin. Výsledné hodnoty impedance, mechanických vlastností a dalších sledovaných parametrů pak přímo ovlivňují možnosti praktického využití těchto systémů.

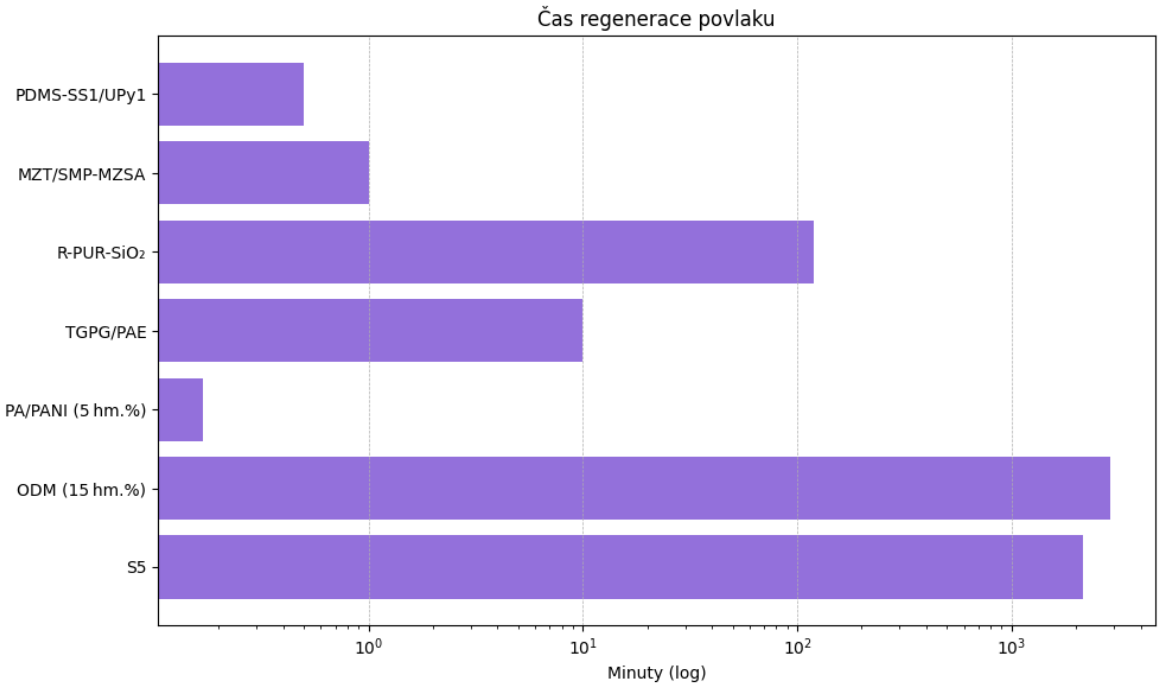
Tab. 4.1 – Přehled parametrů analyzovaných SRP

Studie	**Označení povlaku**	**Tloušťka profilu [µm]**	**Regenerace**	**Regenerační účinnost [%]**	**Impedance [Ω·cm²]**	**Adheze [MPa]**	**Způsob aktivace**
[19]	PDMS-SS1/UPy1	100	90 °C / několik vteřin	>92.86	$9{,}33\times10^{6}$	0,85	zahřívání
[18]	MZT/SMP-MZSA	N/A	1 min	vizuálně kompletní	$4{,}47\times10^{9}$	8,7	NIR záření, změna pH
[21]	R-PUR-SiO_2	50	80 °C / 2 h	vizuálně kompletní	$5{,}7\times10^{5}$	N/A	zahřívání
[22]	TGPG/PAE	80	~46 °C / 10 min	vizuálně kompletní	8×10^{9}	5-7	NIR záření
[23]	PA/PANI (5 hm.%)	98	78 °C / 5-10 s	>95	$2{,}19\times10^{9}$	1,16	NIR záření
[24]	ODM (15 hm.%)	400	48 h	>92	$1{,}6\times10^{6}$	N/A	mechanické poškození
[25]	S5	14	laboratorní teplota / 36–48 h	~48	$2{,}09\times10^{4}$	N/A	pH

4.1 Srovnání parametrů a jejich aplikační význam

Regenerace

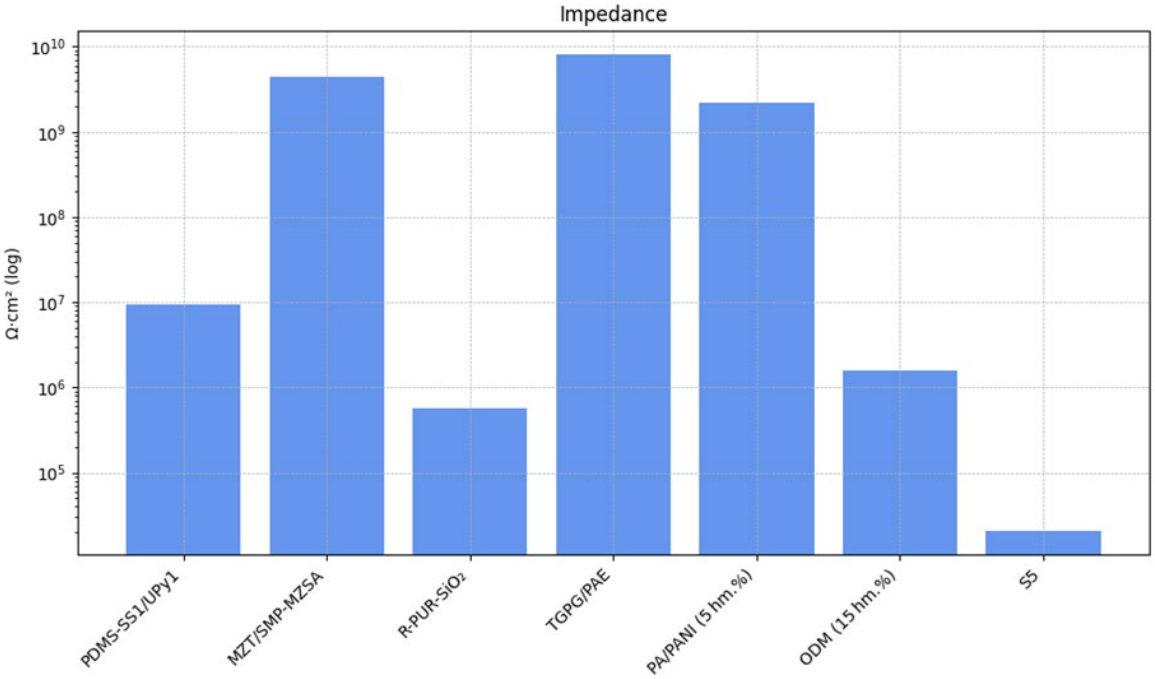
Jedním z hlavních kritérií při hodnocení SRP je schopnost zacelit poškození. Rychlost regenerace se mezi jednotlivými systémy výrazně liší. Nejrychlejší obnovu vykazují intrinsické systémy jako PA/PANI a PDMS-SS1/UPy1, kde dochází k zacelení v řádu několika sekund až desítek sekund po zahřátí. Takové vlastnosti jsou vhodné tam, kde dochází k opakovanému nebo drobnému mechanickému poškození. Naproti tomu u extrinsického systému ODM trvá regenerace výrazně déle – podle údajů až 48 hodin. Tento přístup lépe vyhovuje prostředí, kde není vyžadována okamžitá obnova funkce povlaku a je akceptovatelná delší doba odezvy.



Obr. 4-1 Časy regenerace defektu analyzovaných SRP

Impedance

Z hlediska korozní odolnosti dosahují nejvyšších hodnot impedance vícevrstvé systémy TGPG/PAE a MZT/SMP-MZSA. Hodnoty v řádu $10^9\ \Omega\cdot cm^2$ potvrzují velmi dobré bariérové vlastnosti i při narušení vrstvy. Oba materiály využívají polymerní matrici s funkčními složkami a aktivují se pomocí NIR záření. Výsledné vrstvy jsou efektivní, ale jejich příprava je složitější a technologicky náročnější. Naproti tomu systém S_5 založený na modifikované epoxidové matrici vykazuje impedanci pouze v rozsahu 10^4–$10^5\ \Omega\cdot cm^2$. Jeho výhodou je jednodušší aplikace a využití běžných podmínek, avšak ochranný účinek je podstatně nižší.



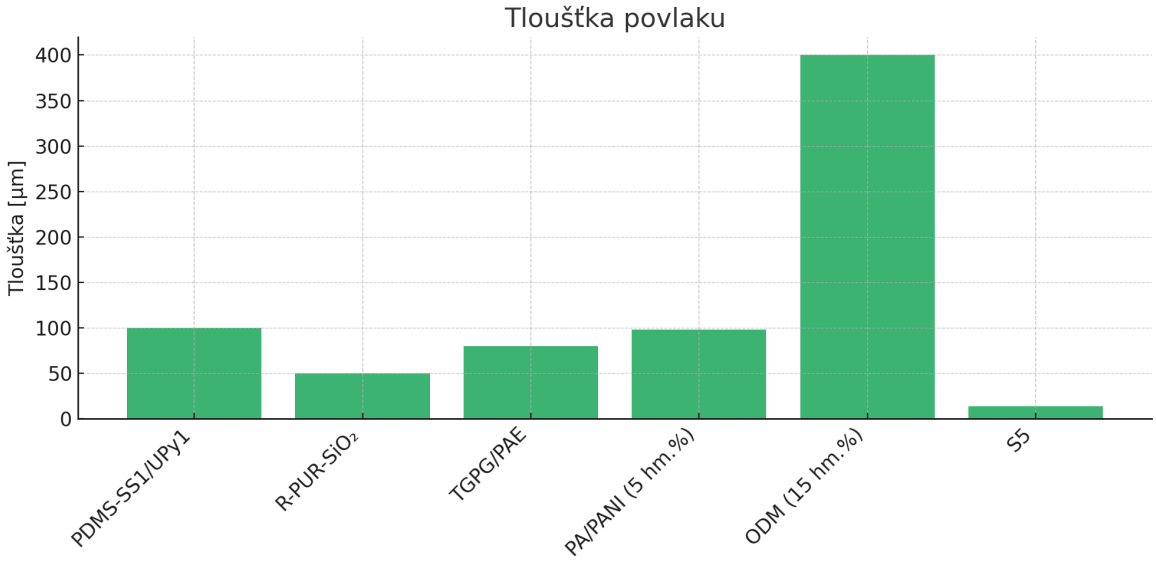
Obr. 4-2 Hodnoty impedance analyzovaných SRP

Adheze

Adhezní vlastnosti se mezi jednotlivými SRP liší. Nejvyšší pevnosti v tahu byly dosaženy u MZT/SMP-MZSA (8,7 MPa) a TGPG/PAE (5–7 MPa), které byly testovány na ocelovém podkladu. Tyto hodnoty odpovídají úrovni běžně používaných technických nátěrů nebo základních lepidel pro kovové spoje, a naznačují tak dostatečně silnou vazbu k podkladu pro praktické použití. Pro představu – u některých plastových dílů, například z materiálů běžně používaných při 3D tisku (ABS, PLA), bývají hodnoty adheze mezi jednotlivými vrstvami nebo vůči jiným materiálům obecně nižší. Oproti tomu PDMS-SS1/UPy1 vykazuje adhezi pouze 0,85 MPa, což odpovídá spíše nenamáhaným součástem.

Tloušťka profilu povlaku

Tloušťka povlaku je důležitá zejména u přesných sestav, kde nesmí dojít k ovlivnění montážních vůlí. Nejnižší tloušťku měl S5 (14 µm), což je vhodné pro aplikace vyžadující velkou přesnost. Většina SRP se pohybuje v rozmezí 50–100 µm (např. TGPG/PAE, R-PUR-SiO_2, PA/PANI), což je stále akceptovatelné i u přesných součástí, jako jsou lícované čepy nebo uložení ložisek. Nejširší profil má ODM (400 µm), který z důvodu větší vrstvy přináší lepší zásobu regenerační látky. To může být na jedné straně limitující u přesně lícovaných částí, ale na druhé straně výhodné například u kluzných ložisek s větší vůlí, kde by povlak mohl při rozběhu a zastavení pomoci snížit opotřebení a prodloužit životnost součásti.



Obr. 4-3 Tloušťka profilu analyzovaných SRP

Technologická náročnost

Velmi důležité je také zohlednit technologickou náročnost jednotlivých SRP, která se liší nejen syntézou, ale i způsobem aplikace a typem požadované aktivace. Systém PA/PANI lze považovat za technologicky přístupnější, protože využívá běžnou epoxidovou matrici, aktivní složka se do ní přímo mísí a nanášení probíhá standardní metodou pomocí rámového aplikátoru. Vytvrzení navíc probíhá za mírných teplotních podmínek, bez nutnosti speciální atmosféry nebo zařízení. Oproti tomu vícevrstvé konstrukce jako TGPG/PAE, MZT/SMP-MZSA nebo S_5 jsou výrazně složitější. Například u S_5 je nutné kombinovat samousazení, máčení, nanášení mikročástic a lisování za tepla. Takový postup vyžaduje přesné řízení každé fáze, více kroků i specifické vybavení. Stejně tak povlak ODM zahrnuje výrobu mikrokapslí a jejich rovnoměrné rozptýlení v matrici, což proces komplikuje nejen technologicky, ale i ekonomicky. Složitější SRP často navíc vyžadují speciální aktivační podmínky (např. NIR záření, změnu pH), které nejsou snadno dosažitelné v běžném provozu nebo se vztahují na velmi konkrétní aplikace. Naproti tomu povlaky aktivované běžným zahřátím mají větší potenciál pro použití bez vnějšího zásahu. Celkově platí, že čím náročnější je syntéza a aplikace SRP, tím více roste nejen jejich výrobní cena, ale i nároky na jejich zavedení do reálných strojírenských podmínek.

4.2 Aplikace ve strojírenských sférách

Na základě zhodnocení vlastností jednotlivých systémů lze odvodit, které povlaky se v současné podobě nejvíce přibližují praktickému využití ve strojírenských aplikacích. Žádný ze zkoumaných povlaků nesplňuje všechny požadavky současně, ale některé vykazují kombinaci parametrů, které z nich dělají kandidáty pro konkrétní sféry použití. Klíčové je posuzovat nejen účinnost ochranné funkce, ale i reálné možnosti aplikace, provozní stabilitu a technologickou náročnost.

PDMS-SS1/UPy1, založený na kombinaci disulfidových a vodíkových vazeb, vykazuje vysokou regenerační účinnost i při nižších teplotách a umožňuje vizuální zacelení povrchu během několika vteřin. Díky odolnosti vůči vlhkosti a dlouhodobé stabilitě v solné mlze (až 720 hodin bez degradace) se jeví jako vhodný pro aplikace v prostředích s výskytem solných aerosolů, jako jsou například pobřežní jeřáby, navíjecí a manipulační systémy v přístavech nebo komponenty offshore větrných elektráren. Povlak je rovněž schopen částečné regenerace i při ponoření do vody, což zvyšuje jeho potenciál pro nasazení v náročných klimatických podmínkách. Slabší adheze (0,85 MPa) omezuje jeho použití na konstrukční části bez přímého přenosu velkých sil – např. ochranné kryty, kabelové vedení nebo pouzdra měřicích zařízení. Mezi omezení patří i vícestupňová syntéza, která vyžaduje organická rozpouštědla, řízené podmínky a následné několikadenní vytvrzování, což může komplikovat použití v sériové výrobě

TGPG/PAE, složený z vícevrstvé matrice s termoaktivním polymerem a grafenovými nanočásticemi, vykazuje nejvyšší korozní odolnost z analyzovaných povlaků a dlouhodobou stabilitu ochranné funkce v laboratorních podmínkách. Díky své pasivní ochranné schopnosti se jeví jako vhodný pro strojírenské aplikace, kde není možná častá údržba a kde je požadována trvalá ochrana proti korozním vlivům. Takové prostředí představují například vnitřní stěny tlakových zásobníků, krytované plochy turbínových bloků nebo vstupní komory průmyslových čerpadel vystavené působení vlhkosti a chemických výparů. Vhodným příkladem jsou i vnitřní výstelky transformátorových skříní, ložiskové domky vysokootáčkových zařízení nebo nosné příruby velkých ocelových konstrukcí v náročném provozním mikroklimatu, které není snadno přístupné pro inspekci či repasi. Přestože hodnota adheze v rozmezí 5–7 MPa odpovídá standardním antikorozním nátěrům, širší uplatnění omezuje složitější vícevrstvá syntéza a nutnost specifických podmínek pro regeneraci, což může být překážkou v běžném průmyslovém nasazení.

PA/PANI je technologicky jednodušší, aplikuje se pomocí běžné epoxidové matrice a aktivuje se teplem. Díky tomu je vhodný pro komponenty, které se během provozu zahřívají, například kryty mechanických částí nebo upevňovací konstrukce v místech se zvýšeným tepelným namáháním. Uplatnit by se mohl například na upevňovacích prvcích motorových jednotek, víkách převodovek nebo koncových štítech elektromotorů, kde dochází ke kontaktu se spojovacím materiálem, ale mechanické zatížení není extrémní. Slabinou systému je proměnlivá adheze v závislosti na koncentraci aktivních složek.

MZT/SMP-MZSA kombinuje dvouvrstvou extrinsickou ochranu s hydrofobními vlastnostmi a vysokou elektrochemickou stabilitou. Díky své odolnosti proti vlhkosti a působení kyselého prostředí se jeví jako vhodný pro aplikace v proměnlivých klimatických podmínkách, například na nosných rámech mobilních elektrocentrál, opláštění rozvaděčových skříní umístěných vně budov nebo na krytech hydraulických agregátů u silniční techniky. Uplatnění lze najít také na horních a bočních krytech čerpadel v provozech chemického nebo potravinářského průmyslu, kde může docházet k úniku agresivních látek nebo kondenzaci uvnitř hal. Mechanické parametry (pevnost v tahu 24,86 MPa, adheze 8,7 MPa) umožňují nasazení povlaku na mírně zatížené konstrukční prvky, jako jsou boční kryty čerpadel a ventilátorů. Omezujícím faktorem zůstává vícefázová syntéza a konkrétní kombinované spuštění regenerace, které komplikují rozšíření do sériového nasazení.

R-PUR-SiO_2 se vyznačuje silně hydrofobním povrchem. Ten lze využít zejména u venkovních konstrukčních prvků nebo ochranných opláštění, kde je cílem omezit ulpívání vody. Typickým případem mohou být různé skříňové celky nebo panely technických zařízení vystavených dešti či kondenzaci, například vnější plášťové díly rámů elektrocentrál, kryty ventilátorových jednotek chladičů nebo ochranná víka rozvodových komor u mobilních kompresorů, kde je prioritou vodoodpudivost a vizuální odolnost vůči znečištění. Naměřená pevnost v tahu činí přibližně 1,4 MPa, což sice neumožňuje nasazení na mechanicky zatěžované díly, ale je dostatečná pro použití na ochranných a krycích prvcích vystavených běžné manipulaci.

S5 byl vyvinut jako samoregenerační povlak určený pro hliníkové slitiny. Povlak je vhodný pro součásti, kde je vyžadována minimální tloušťka vrstvy a dlouhodobá ochrana povrchu, např. víka převodovek, opláštění elektromotorů nebo montážní kryty čerpadel. Tyto díly nejsou obvykle mechanicky namáhané, ale jejich povrch musí zůstat neporušený i při opakované manipulaci. Samoregenerační efekt je založen na tvorbě ochranné vrstvy v místě poškození v důsledku interakce povlaku s okolním prostředím. Povlak vzniká přímou chemickou reakcí při nanášení, bez možnosti přesně kontrolovat mikrostrukturu nebo tloušťku vrstvy, což komplikuje dosažení opakovatelného výsledku při sériové výrobě

ODM má nejvyšší tloušťku profilu a delší dobu regenerace oproti ostatním případům. Uplatnit by se mohl například na rámových konstrukcích zemědělských strojů nebo krytech velkých pohonných jednotek, kde není vyžadována okamžitá obnova poškozené funkce. Jeho funkčnost závisí na přítomnosti mikrokapslí, což z hlediska aplikace řeší problém specifického stimulu, regenerace ale trvá až 48 hodin, což je mnohonásobně vyšší doba oproti ostatním povlakům.

Z analyzovaných systémů se jako nejperspektivnější z hlediska aplikačního využití jeví PDMS-SS1/UPy1, který kombinuje vysokou chemickou odolnost s plně vizuální regenerací povrchu, a TGPG/PAE, jenž nabízí mimořádnou korozní stabilitu i po dlouhodobé expozici ve vlhkém a agresivním prostředí. Oba tyto systémy však zároveň ukazují, jak tenká je hranice mezi laboratorním úspěchem a průmyslovou využitelností – a jak důležité je, aby další vývoj reagoval na požadavky sériové výroby a provozního prostředí, ne pouze na výsledky měřené v kontrolovaných podmínkách.

4.3 Budoucí vývoj a perspektivy

Z provedeného porovnání je zřejmé, že i když všechny z posuzovaných SRP vykazují v určitých směrech slibné vlastnosti, pro běžné nasazení ve strojírenské praxi zatím nejsou vhodné. Nejde přitom jen o jednotlivé materiálové parametry, ale hlavně o omezení spojené se syntézou a aktivací regeneračního procesu povlaku. Systémy jsou totiž zkoumány a navrženy za striktních laboratorních podmínek, které neodrážejí nepředvídatelný charakter strojírenských aplikací.

Smyslem dalšího vývoje by mělo být především zjednodušení syntézy a aktivace. Pokud by bylo možné SRP aplikovat na chráněné součásti v méně krocích a běžně nanášet pouze základními technikami – například máčením, stříkáním nebo jednoduchým nánosem, a zároveň je vytvrzovat za standardních podmínek, výrazně by to zvýšilo šanci na jejich zavedení do praxe. Další výhodou by bylo, pokud by regenerační mechanismus co nejčastěji využíval podněty přirozeně vznikající při provozu – například teplo, které vzniká při běžném chodu zařízení, nebo lokální napětí v místě poškození. Právě tento přístup už některé systémy využívají, ale ne u všech je zatím aktivace takto jednoduše dosažitelná.

Lze tedy říct, že SRP mají reálný technický potenciál, ale aby se staly běžnou součástí průmyslové praxe, musí být vyřešeny klíčové překážky. Především je třeba zaměřit se na technologickou jednoduchost a stabilitu povlaků v dlouhodobém provozu. Pokud se podaří tyto vlastnosti sladit s výrobní realitou, SRP mohou v budoucnu doplnit nebo částečně nahradit klasické ochranné systémy.

5 ZÁVĚR

Tato bakalářská práce se zabývá problematikou samoregeneračních povlaků a jejich potenciálem pro využití ve strojírenské praxi. Cílem bylo vytvořit přehledovou studii zaměřenou na samoregenerační systémy, představit jejich typy a mechanismy a zhodnotit jejich využitelnost na konkrétních příkladech povlaků. V rešeršní části byla zpracována klasifikace chytrých materiálů a jejich regeneračních mechanismů. Dále byly popsány základní typy chytrých povlaků, přičemž hlavní důraz byl kladen na samoregenerační systémy, které do této nadkategorie přímo spadají. Byly rovněž shrnuty faktory ovlivňující jejich funkčnost – od vlivu prostředí po způsob nanášení. Analytická část práce se věnovala srovnání konkrétních typů samoregeneračních povlaků z hlediska jejich regenerační schopnosti, materiálových parametrů a technologické náročnosti. Z výsledků vyplývá, že zatím žádný z popsaných systémů nesplňuje všechny požadavky pro efektivní plošné nasazení v praxi, přesto však některé vykazují slibné vlastnosti pro cílené aplikace. Za nejperspektivnější lze považovat systémy TGPG/PAE a PDMS-SS1/UPy1, které kombinují vysokou chemickou stabilitu, silný korozní odpor nebo schopnost regenerace i v náročných podmínkách. Naopak složitě syntetizovatelné nebo mechanicky málo odolné systémy zůstávají zatím vhodné spíše pro specifické případy s řízeným provozním režimem. Závěrem lze konstatovat, že samoregenerační povlaky představují technologii s významným potenciálem, avšak jejich širší uplatnění v praxi bude podmíněno zejména zjednodušením výrobních postupů, stabilizací regeneračních mechanizmů a možností snadné aktivace v reálných provozních podmínkách. Téma zůstává otevřené dalšímu výzkumu, a to jak v oblasti vývoje nových regeneračních systémů, tak v optimalizaci jejich průmyslové aplikace.

6 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

[1] KHARAJI, Shahin. Self-Healing Coatings. In: *Introduction to Corrosion - Basics and Advances* [online]. B.m.: IntechOpen, 2023. Dostupné z: doi:10.5772/intechopen.109500

[2] ABTREX INDUSTRIES, Inc. Protective Coatings for Steel [online]. [cit. 22. 5. 2025]. Dostupné z: https://abtrex.com/protective-coatings-for-steel/

[3] ZHU, Qiang, Ming Hui CHUA, Pin Jin ONG, Johnathan Joo CHENG LEE, Kang LE OSMUND CHIN, Suxi WANG, Dan KAI, Rong JI, Junhua KONG, Zhaogang DONG, Jianwei XU a Xian Jun LOH. Recent advances in nanotechnology-based functional coatings for the built environment. *Materials Today Advances* [online]. 2022, 15, 100270 [vid. 2025-04-16]. ISSN 2590-0498. Dostupné z: doi:10.1016/J.MTADV.2022.100270

[4] GONG, Hanjun, Chengcheng YU, Lin ZHANG, Guoxin XIE, Dan GUO a Jianbin LUO. Intelligent lubricating materials: A review. *Composites Part B: Engineering* [online]. 2020, 202, 108450. ISSN 13598368. Dostupné z: doi:10.1016/j.compositesb.2020.108450

[5] ABHYUDAY MANGLA. Smart Materials and their Applications in Mechanical Engineering. *Darpan International Research Analysis* [online]. 2024, 12(3), 38–49. ISSN 2321-3094. Dostupné z: doi:10.36676/dira.v12.i3.55

[6] BAHL, Shashi, Himanshu NAGAR, Inderpreet SINGH a Shankar SEHGAL. Smart materials types, properties and applications: A review. *Materials Today: Proceedings* [online]. 2020, 28, 1302–1306. ISSN 22147853. Dostupné z: doi:10.1016/j.matpr.2020.04.505

[7] CHOUDHARY, Nitin a Davinder KAUR. Shape memory alloy thin films and heterostructures for MEMS applications: A review. *Sensors and Actuators A: Physical* [online]. 2016, 242, 162–181. ISSN 09244247. Dostupné z: doi:10.1016/j.sna.2016.02.026

[8] SAJI, Viswanathan S. Smart self-healing and self-reporting coatings – an overview. *Progress in Organic Coatings* [online]. 2025, 205, 109318 [vid. 2025-04-28]. ISSN 0300-9440. Dostupné z: doi:10.1016/J.PORGCOAT.2025.109318

[9] CHEN, Xiaoyi, Bingbing ZHENG, Shujing ZHOU, Chengyang SHI, Yiwei LIANG a Lina HU. Development and Application of Intelligent Coating Technology: A Review. *Coatings* [online]. 2024, 14(5), 597. ISSN 2079-6412. Dostupné z: doi:10.3390/coatings14050597

[10] CHOWDHURY, Tonoy, Nandika D'SOUZA, Yee Hsien HO, Narendra DAHOTRE a Ifana MAHBUB. Embedded Corrosion Sensing with ZnO-PVDF Sensor Textiles. *Sensors* [online]. 2020, 20(11), 3053. ISSN 1424-8220. Dostupné z: doi:10.3390/s20113053

[11] ZHANG, Fan, Pengfei JU, Mengqiu PAN, Dawei ZHANG, Yao HUANG, Guoliang LI a Xiaogang LI. Self-healing mechanisms in smart protective coatings: A review. *Corrosion Science* [online]. 2018, 144, 74–88. ISSN 0010938X. Dostupné z: doi:10.1016/j.corsci.2018.08.005

[12] AHMAD, Shoaib, Sehrish HABIB, Muddasir NAWAZ, R.A. SHAKOOR, Ramazan KAHRAMAN a Talal MOHAMMED AL TAHTAMOUNI. The role of polymeric matrices on the performance of smart self-healing coatings: A review. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry* [online]. 2023, 124, 40–67. ISSN 1226086X. Dostupné z: doi:10.1016/j.jiec.2023.04.024

[13] LI, Bingfan, Shiyu LONG, Manping YANG, Daxin ZHOU, Jiang HAN a Tifeng JIAO. Research progress and challenges of healing mechanism, types, and applications of reversible self-healing anti-corrosion coatings. *Chemical Engineering Science* [online]. 2025, 310, 121498. ISSN 00092509. Dostupné z: doi:10.1016/j.ces.2025.121498

[14] BEACH, Maximilian, Tim DAVEY, Priya SUBRAMANIAN a Georgina SUCH. Self-healing organic coatings – Fundamental chemistry to commercial application. *Progress in Organic Coatings* [online]. 2023, 183, 107759. ISSN 03009440. Dostupné z: doi:10.1016/j.porgcoat.2023.107759

[15] PANAHI, Parisa, Saied Nouri KHORASANI, Rhoda Afriyie MENSAH, Oisik DAS a Rasoul Esmaeely NEISIANY. A review of the characterization methods for self-healing assessment in polymeric coatings. *Progress in Organic Coatings* [online]. 2024, 186, 108055. ISSN 03009440. Dostupné z: doi:10.1016/j.porgcoat.2023.108055

[16] ZENG, Xiaotong, Hui GUO, Hongliang LIU, Cong LIU, Bo FANG, Yuzhu LI, Zhaoliang JIANG a Jie LIU. Self-healing performance and anti-corrosion mechanism of microcapsule-containing epoxy coatings under deep-sea environment. *Progress in Organic Coatings* [online]. 2025, 203, 109176. ISSN 03009440. Dostupné z: doi:10.1016/j.porgcoat.2025.109176

[17] ZHANG, Fan, Pengfei JU, Mengqiu PAN, Dawei ZHANG, Yao HUANG, Guoliang LI a Xiaogang LI. Self-healing mechanisms in smart protective coatings: A review. *Corrosion Science* [online]. 2018, 144, 74–88 [vid. 2025-04-16]. ISSN 0010-938X. Dostupné z: doi:10.1016/J.CORSCI.2018.08.005

[18] YU, Pengao, Zongxue YU, Kexi LIAO, Shuangshuang XIA, Kun LI, Jiao CHEN a Xiuzhu ZHANG. Self-healing superhydrophobic anti-corrosion coating with dual photo-thermal and pH response for effective anti-icing and de-icing. *Applied Surface Science* [online]. 2025, 701, 163295. ISSN 01694332. Dostupné z: doi:10.1016/j.apsusc.2025.163295

[19] MA, Ji, Xinfeng PANG, Zhijie CHEN, Lili DU a Ping QIU. Super adhesive, self-healing elastomer based on synergistic dual dynamic interactions for corrosion-resistant coatings. *Applied Materials Today* [online]. 2025, 44, 102682. ISSN 23529407. Dostupné z: doi:10.1016/j.apmt.2025.102682

[20] MCKEEN, Laurence. Introduction to the physical, mechanical, and thermal properties of plastics and elastomers. In: *The Effect of Long Term Thermal Exposure on Plastics and Elastomers* [online]. B.m.: Elsevier, 2021, s. 35–64. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-323-85436-8.00009-6

[21] XU, Jianben, Zhangyan SHI, Yuedong XING, Wenzhe NIU, Yutao YANG, Xiang XU a Faai ZHANG. Rapid UV-curable constructing rosin-based superhydrophobic composite coatings with self-healing properties for anticorrosion and anti-icing. *Progress in Organic Coatings* [online]. 2025, 205, 109314. ISSN 03009440. Dostupné z: doi:10.1016/j.porgcoat.2025.109314

[22] LIU, Qiang, Jianlin ZHOU, Ziyue SHEN, Ning LI, Shaochun XIE, Bo YOU a Limin WU. Bio-Based Self-Healing Anti-Corrosion coating with gel microspheres via One-Step In-Situ crosslinking. *Journal of Colloid and Interface Science* [online]. 2025, 137795. ISSN 00219797. Dostupné z: doi:10.1016/j.jcis.2025.137795

[23] LIU, Jiangqing, Wei LIN, Ren LIU a Jing LUO. Photothermal self-healing and anti-corrosion water-borne coatings based on phytic acid-doped polyaniline. *Progress in Organic Coatings* [online]. 2025, 204, 109267. ISSN 03009440. Dostupné z: doi:10.1016/j.porgcoat.2025.109267

[24] BI, Zhenxiao, Fangjian GAO, Man LIU, Ruiyu ZHANG, Ruolin LIU, Gan CUI a Jing XU. Multifunctional self-healing coatings with orderly distributed microcapsules aligned by magnetic field. *Chemical Engineering Journal* [online]. 2022, 450, 138250. ISSN 13858947. Dostupné z: doi:10.1016/j.cej.2022.138250

[25] DU, Juan, Hongyu WANG, Zhaolin WANG, Xiangyun LI a Haipeng SONG. A smart self-healing coating utilizing pH-responsive dual nanocontainers for corrosion protection of aluminum alloy. *Surface and Coatings Technology* [online]. 2024, 494, 131305. ISSN 02578972. Dostupné z: doi:10.1016/j.surfcoat.2024.131305

7 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN

7.1 Použité zkratky

UV	Ultrafialové
SMA	Shape-memory alloys
TiO_2	Oxid titaničitý
SRP	Samoregenerační povlak
NaCL	Chlorid sodný
EIS	Elektrochemická impedanční spektroskopie
LEIS	Lokální elektrochemická impedanční spektroskopie
EAP	Elektroaktivní polymer
NIR	Near-infrared

8 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

Obr. 3-1 Nanášení protikorozního povlaku na tlakovou nádobu [2] …….. 14

Obr. 3-2 Schéma shape-memory efektu [7]…….17

Obr. 3-3 Ilustrace umělých svalů v aplikaci robotické paže za použití EAP [5]……18

Obr. 3-4 Schéma chytrého povlaku umožňujícího rozeznat a signalizovat různé hloubky trhlin[8]…….20

Obr. 3-5 Mikroskopické záběry polyvinylfluoridových vláken [10]…….. 21

Obr. 3-6 Diagram zobrazující budoucí vývoj trhu se samoregeneračními povlaky [8]……...22

Obr. 3-7 Schéma rozdělení samoregenarčních mechanismů [8] ……23

Obr. 3-8 Ilustrační schéma extrinsického samoregeneračního mechanismu [14]..……. 24

Obr. 3-9 Ilustrační schéma intrinsického samoregeneračního mechanismu [14]...…….25

Obr. 3-10 Schéma třífázového střikového nanášení povlaku na chráněný materiál [12]…26

Obr. 3-11 Schéma jednotlivých kroků nanášecí metody [12]……. 26

Obr. 3-12 Schéma nanášení samoregeneračního povlaku rotací [12] ……27

Obr. 3-13 Regenerační proces povlaku PDMS-SS1/UPy1 [19]……..31

Obr. 3-14 Schéma regeneračního procesu povlaku MZT/SMP-MZSA včetně vytyčení superhydrofobního povrchu [18] ……32

Obr. 3-15 Mikroskopická dokumentace regenerace povlaku R-PUR-SiO_2 [21]……33

Obr. 3-16 Regenerace povlaku TGPG/PAE vlivem zahřátí NIR světlem [22] …….. 34

Obr. 3-17 Mikroskopická dokumentace regeneračního procesu povlaku při různém obsahu kompozitu PA/PANI [23]……35

Obr. 3-18 Mikroskopická dokumentace regenerace defektu s obsahem c) 15 hm.% funkční složky, a d) 20 hm.% funčkní složky [24] ……36

Obr. 3-19 Regenerace defektu povlaku S5 [25] ..……37

Obr. 4-1 Časy regenerace defektu analyzovaných SRP…….. 39

Obr. 4-1 Hodnoty impedance analyzovaných SRP……. 40

Obr. 4-3 Tloušťka profilu analyzovaných SRP……... 41

9 SEZNAM TABULEK

Tab. 4-1 Přehled parametrů analyzovaných SRP 38