

Česká zemědělská univerzita v Praze
Technická fakulta
Katedra materiálu a strojírenské technologie

**Využití kapilární metody NDT pro
automobilový průmysl a optimalizace vodního
odpadového hospodářství kapilárních linek**

Diplomová práce

Vedoucí práce: Ing. Petr Hrabě, Ph.D.

Autor práce: Bc. Martin Khun

PRAHA 2014

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Katedra materiálu a strojírenské technologie

Technická fakulta

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Khun Martin

Silniční a městská automobilová doprava

Název práce

Využití kapilární metody NDT pro automobilový průmysl a optimalizaci vodního odpadového hospodářství kapilárních linek

Anglický název

Application of the penetrant NDT methods for the automotive industry and optimization of the waste water treatment of the penetrant lines

Cíle práce

Shromáždit literární podklady o kapilárních metodách NDT využívaných v automobilovém průmyslu. Vyhodnocení vlivu teploty a typu penetrantu na jeho smytelnost. Návrh systému vodního odpadového hospodářství pro vodou smytný penetrant a suchou vývojku velkokapacitní PT linky v automobilovém průmyslu.

Metodika

Současný stav řešeného problému (literární rešerše), cíle práce a metody jejího vypracování, výsledky experimentů a jejich diskuze, závěry a přínos práce.

Osnova práce

1. Úvod
2. Cíle práce a metodika
3. Kapilární metody NDT a jejich použití pro automobilový průmysl
4. Vodní a odpadové hospodářství kapilárních linek
5. Experimentální zkoušky
6. Návrh systému pro vodou smytný penetrant a suchou vývojku pro velkokapacitní PT linky v automobilovém průmyslu
7. Závěr
8. Seznam použité literatury

Rozsah textové části

60

Klíčová slova

Nedestruktivní zkoušky, kapilární metoda, penetrant

Doporučené zdroje informací

BROŽEK, M.: Strojírenská technologie - návody na cvičení. Praha, Editpress, s.r.o., 1998, 72 s.

FAKTOROVÁ, D.: Utilization of microwaves in material defect investigation. Acta Technica CSAV, 2010. Vol. 53, No. 1, s. 17 - 27.

HÁJEK, K., ŠIKULA, J.: New Highly Sensitive Variant of Nonlinear Ultrasound Spectroscopy for Non-destructive Testing. Advances in Military Technology, 2010, Vol. 4, Issue 1, s. 15 - 22.

JILES, C., D.: Introduction to the of materials evaluation. Boca Raton, CRC Press, 2008, 280 s.

KOBEČ, B. a kol.: Nedestruktivní zkoušení materiálů a konstrukcí. Brno, Akademické nakladatelství CERM, 2008, 571 s.

KOŘENSKÁ, M., MANYCHOVÁ, M.: New possibilities of non-destructive testing of ceramic specimen integrity. Ceramics-Silikáty, 2010, Vol. 54, Issue 1, s. 72 - 77.

KUNDU, T.: Ultrasonic nondestructive evaluation: engineering and geological material characterization. Boca Raton, CRC Press, 2004, 832 s.

Časopisy: Strojírenská technologie, MM průmyslové spektrum, TM Svařování - dělení - spojování materiálů, Technik.

Firemní literatura: katalogy, prospekty.

Vedoucí práce

Hrabě Petr, Ing., Ph.D.

Termín zadání

listopad 2012

Termín odevzdání

duben 2014

Elektronicky schváleno dne 27.3.2014

prof. Ing. Milan Brožek, CSc.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 27.3.2014

prof. Ing. Vladimír Jurča, CSc.

Děkan fakulty

Prohlašuji, že svoji diplomovou práci jsem vypracoval samostatně pouze s použitím pramenů a literatury uvedených v seznamu citované literatury.

Podpis:.....

Využití kapilární metody NDT pro automobilový průmysl a optimalizace vodního odpadového hospodářství kapilárních linek

Abstrakt:

Zadáním této diplomové práce je optimalizace kapilárních linek pro automobilový průmysl ve třech oblastech - snížení výnosu penetrantu, úpravě expozičních časů a optimalizaci vodního odpadového hospodářství těchto linek. Experimenty byla prokázána možnost pozitivního ovlivnění výnosu penetrantu změnou jeho viskozity, kdy změna vyjádřená změnou teploty o 10 °C přinesla snížení výnosu penetrantu o 1,5 g na 1 m². Byla též ověřena možnost zkrácení expozičních časů kapilární linky, kdy normou doporučené 10 minutové expoziční časy byly zkráceny na 8 minut se zachováním dostatečné citlivosti zkušebnímu systému na zjistitelnost vad. Zkrácení expozičních (udávajících) časů umožňuje zrychlení taktu kapilární linky, čili zvýšení kapacity. Důležitým výstupem bylo prokázání výhodnosti a návratnosti užití metody ultrafiltrace nad stále dominujícím čištěním pomocí aktivního uhlí, kdy návratnost investice do ultrafiltrace byla v případě linky použité v tomto experimentu po druhém roce srovnatelná s náklady na aktivní uhlí.

Klíčová slova: nedestruktivní zkoušky, kapilární metoda, penetrant

Application of the penetrant NDT methods for the automotive industry and optimization of the waste water treatment of the penetrant lines

Summary:

The subject of this dissertation is the optimization of the penetrant lines for the automotive industry in three areas – reduction of penetrant take out excess, adjustment of exposure times and optimization of the waste water management of these lines. The experiments proved the possibility of a positive influence on penetrant take out by adjusting its viscosity, when the change showed by the altering of the temperature by 10 °C led to the reduction of the amount of the penetrant by 1,5 g per 1m². The possibility of the shortening of exposure times of the penetrant lines was also verified, when recommended exposure times (10 minutes) were shortened to 8 minutes while a sufficient

sensitivity of the test system for defect detection was maintained. A shortening of exposure times enables acceleration of the penetrant line's cycle and so the increase of its capacity. The important outcome was proving the favourableness and returnability of the ultrafiltration technique over the ever-popular purification through activated carbon. This financially-comparable benefit was achieved after the second year of usage.

Key words: nondestructive testing, penetrant testing, penetrant

Tímto bych chtěl poděkovat řediteli společnosti ATG s.r.o. Ing. Zbyňkovi Zavadilovi, jenž mi umožnil uskutečnění této diplomové práce včetně odborných konzultací. Také bych chtěl poděkovat vedoucímu práce v této firmě Ing. Jakobovi Hořejšímu, za jeho cenné rady a pomoc při řešení. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Tomášovi Zavadilovi, Ing. Jiřímu Cieslarovi a vedoucímu na katedře ČZU Ing. Petru Hraběti Ph.D., kteří mi též pomohli v různých fázích tvorby diplomové práce.

Obsah

1	Úvod.....	1
2	Cíle práce a metodika.....	3
2.1	Cíle práce	3
2.2	Metodika	3
3	Kapilární metody NDT a jejich použití pro automobilový průmysl	5
3.1	Princip kapilární metody.....	5
3.2	Fyzikální základy	6
3.2.1	Povrchové napětí	6
3.2.2	Krajový úhel	6
3.2.3	Kapilarita	7
3.2.4	Viskozita.....	7
3.3	Historie kapilární metody	8
3.4	Kapilární linky	8
3.5	Příprava a předčištění.....	9
3.5.1	Mechanické předčištění	9
3.5.2	Chemické předčištění	10
3.6	Zkušební systémy	10
3.7	Nanesení penetrantu.....	11
3.8	Odstranění přebytku penetrantu.....	13
3.9	Nanesení vývojky	14
3.10	Prohlížení.....	15
3.11	Konečné čištění.....	16
3.12	Citlivost kapilární metody	16
3.12.1	Typ I	16
3.12.2	Typ II.....	17

3.12.3	Hliníková měrka	18
3.12.4	Výrobek s „přirozenou“ vadou	18
3.13	Techniky snížení výnosu penetrantu do oplachové vody	19
3.14	Normy v automobilovém průmyslu	19
3.15	NDT v automobilový průmyslu	20
4	Vodní a odpadové hospodářství kapilárních linek	21
4.1	Otevřený systém oplachové vody	21
4.2	Uzavřený systém oplachové vody	22
4.2.1	V uzavřeném okruhu je nutno splnit následující podmínky	22
4.3	Možnosti čištění oplachové vody v uzavřeném okruhu.....	23
4.3.1	Rozředění penetrantu	23
4.3.2	Aktivní uhlí.....	23
4.3.3	Koagulace a flokulace	27
4.3.4	Ultrafiltrace.....	29
4.3.5	Reverzní osmóza	30
4.3.6	Fotokatalytické čištění oplachové vody	31
4.3.7	Ozonizace	32
4.4	Dezinfekce vody	33
4.5	Shrnutí čištění odpadové vody.....	33
4.6	Odůvodnění experimentů.....	35
5	Experimentální zkoušky	37
5.1	Výnos a okap penetrantu v závislosti na viskozitě a čase.....	37
5.1.1	Postup měření	37
5.1.2	Počáteční podmínky	39
5.1.3	Použitá měřidla	40
5.1.4	Výsledky.....	40

5.1.5	Závěr části experimentů s výnosem/okapem penetrantu.....	46
5.2	Vliv teploty a typu penetrantu na smývatelnost.....	48
5.3	Experimenty pro návrh parametrů kapilární linky.....	48
5.3.1	Citlivost zkušebního systému	48
5.3.2	Výkon sušičky	50
5.4	Shrnutí citlivosti.....	51
6	Návrh systému pro vodou smytlý penetrant a suchou vývojku pro velkokapacitní PT linky v automobilovém průmyslu.....	53
6.1	Návrh kapilární linky	53
6.2	Ekonomické srovnání AC x UF	54
6.3	Výpočet spotřeby penetrantu	55
6.4	Výpočet spotřeby AC.....	57
6.5	Pořizovací finanční náročnost ultrafiltrace	57
6.6	Celková cena provozu ultrafiltrace	58
6.7	Shrnutí nákladů v porovnání AC x UF	58
7	Závěr	61
8	Seznam použité literatury.....	64
	Seznam obrázků.....	66
	Seznam tabulek.....	67
	Použité zkratky	68

1 Úvod

Kapilární metoda (PT) je nejrozšířenější nedestruktivní metodou zkoušení (NDT) pro sériovou kontrolu povrchových vad neferomagnetických polotovarů a výrobků pro automobilový průmysl (AP). Kapacita kontroly na kapilárních linkách určených pro AP dosahuje denně až řádu tisíců kusů, které vyžadují optimalizaci procesu zkoušení a nastavení zařízení k efektivnímu provedení zkoušky.

Během procesu zkoušení dochází k aplikaci velkého množství chemikálií (především penetrantu), které jsou finančně nákladné, zdravotně škodlivé a při chybné aplikaci negativně ovlivňují schopnost vykonání zkoušky. Proto je nezbytně nutné mít vhodně navržené vodní hospodářství dané kapilární linky, aby tyto negativní vlivy byly minimální.

Způsoby čištění odpadové vody u současných kapilárních linek, jako jsou aktivní uhlí (AC), prosté ředění vodou či ultrafiltrace (UF), řeší následek a ne však příčinu kontaminace vody penetrantem. Proto je největší část této práce věnována výnosu penetrantu a způsobům jeho snižování.

Příčinou nadměrného výnosu penetrantu může být jeho nevhodný způsob aplikace, nevhodná viskozita nebo jeho nevhodná doba okapu.

Tato práce se v první části snaží ověřit a kvantifikovat vliv viskozity na míru výnosu penetrantu. Změna doby okapu by mohla mít negativní vliv na výnos penetrantu a ne/výhody různých způsobů aplikace penetrantu jsou již prokázány. Pokud se ukáže tento vliv jako relevantní řešení optimalizace kapilární linky, pokusím se navrhnout kapilární linku s ohledem na zjištěnou závislost. Součástí řešení optimalizace vodního hospodářství by mělo být finanční srovnání dvou způsobů čištění oplachové odpadové vody. Druhá část práce je zaměřena na snížení celkové délky cyklu kapilární linky. Snížení lze realizovat celkem 3 způsoby:

- a) Technologicky (optimalizací konstrukce),
- b) fyzikálně (optimalizací časů – penetrace, okap, expozice),
- c) organizačně (optimalizací procesů).

Rozsah takového úkolu převyšuje možnosti jedné diplomové práce, proto se její druhá část zaměřuje výhradně na minimalizaci expozičních časů při zachování stejné citlivosti zkušebního systému a zjistitelnosti vad.

Za pozitivní výsledek práce lze považovat experimentálně prokázaný a měřitelný vliv viskozity na množství vneseného penetrantu, nákladové porovnání aktivního uhlí s ultrafiltračním zařízením pro čištění odpadové oplachové vody z kapilární linky a současně prokázaní možnosti zkrácení expozičních časů.

Výsledkem této práce by měl být návrh optimalizované kapilární linky, která bude mít snížený výnos penetrantu a snížený celkový čas cyklu linky bez negativního vlivu na citlivost zkušebního systému a stav odpadového hospodářství.

Tato práce může v případě úspěšného splnění jejích cílů sloužit jako podklad pro optimalizaci kapilárních linek v procesu návrhu a výroby zařízení pro automobilový průmysl.

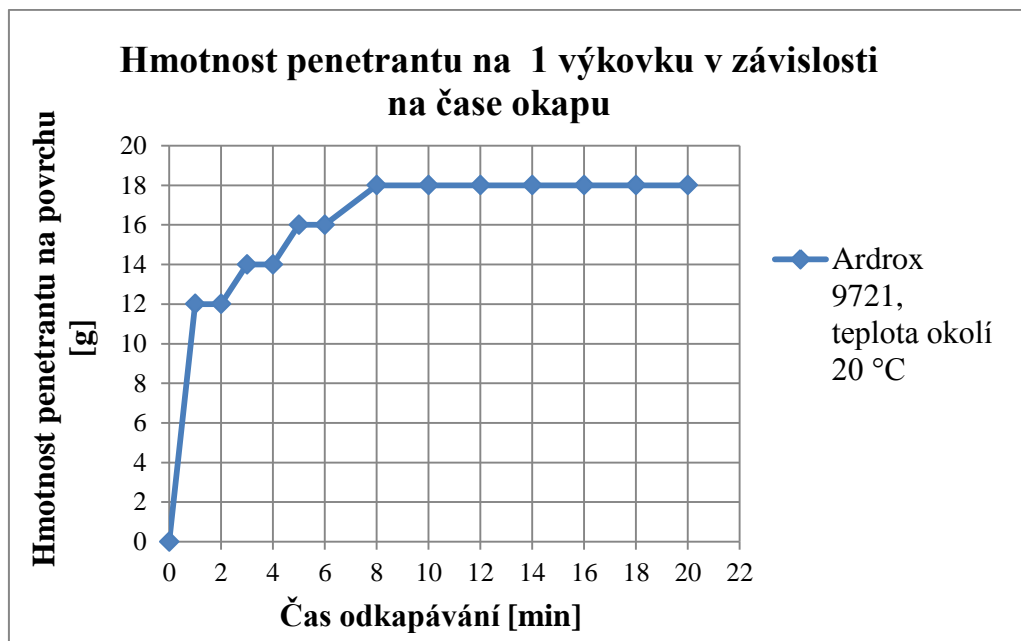
2 Cíle práce a metodika

2.1 Cíle práce

Cílem této práce je optimalizování vodního a především odpadního hospodářství kapilárních linek, kde nejvýraznějším kontaminantem jsou penetranty. Výnos penetrantu a jeho následné odstranění z oplachové vody tvoří uzavřenou smyčku. Snížením výnosu aplikovaného penetrantu na minimum dojde zároveň k prodloužení doby výměny čistícího média a tedy ke snížení nákladů na finančně náročných místech kapilární linky. Druhým cílem je ověření možnosti zkrácení expozičních časů, které by vedlo k zrychlení taktu kapilární linky a umožnilo zvýšení kapacity kontroly. Posledním důležitým výstupem této práce je ekonomické ověření nahrazení AC modulem UF k čištění odpadové oplachové vody z kapilární linky. Podmínkou jmenovaných změn je zachování požadované citlivosti zkušebního systému na zjistitelnost vad.

2.2 Metodika

Na následujícím názorném příkladu si rámcově představíme náklady na čištění odpadové vody pomocí stále nepoužívanějšího AC. Zkoušený vzorek má při okolní teplotě vzduchu 20 °C a po prodlevě 8 min na okapu výnos penetrantu 2 g na ploše výrobku 876,3 cm², jak je patrné z grafu na obr. 2.2 (*Pozn.: hodnoty v grafu byly odečteny pomocí závěsných vah, proto jsou hodnoty v porovnání s výnosem penetrantu zjištěným v této práci zatíženy značnou relativní chybou a mají v tomto příkladě spíše orientační hodnotu*). Hustota penetrantu Ardrex 9721 je 0,88 g·ml⁻¹, z toho pak objem 2 g penetrantu bude $V = 0,0027$ l. Budeme předpokládat, že 10 kg AC uhlí je schopno adsorbovat cca 1 litr penetrantu. U velkosériových linek dojde k vyčerpání adsorpční kapacity uhlí v koloně o objemu 300 kg po odzkoušení přibližně 11 000 těchto stejných výrobků, tzn. po odzkoušení plochy výrobků o hodnotě 974 m². Pokud budeme uvažovat o aplikaci penetrantu na 100 výrobků na jedno ponoření a již uvedený čas prodlevy na okapu 8 minut (udávající hodnota taktu kapilární linky), dojde v nepřerušovaném provozu po asi 15 hodinách k nasycení veškerého AC.



Obr. 2.2 Graf výnosu penetrantu v závislosti na čas

Cena 1 litru penetrantu je 500 Kč a na jeho následnou likvidaci z odpadové vody bude zapotřebí cca 10 kg uhlí, tzn. 1000 Kč za spotřebované AC. Z této jednoduché kalkulace vyplývá, že nejdůležitější jsou procesní opatření zabráňující nadměrné kontaminaci vody penetrantem (viz. podrobněji v kapitole 3.13).

Metodou získání výnosu penetrantu v závislosti na viskozitě po zkušebních pokusech, kdy byl vážen pokles hmotnosti sestavy 5 vzorků při okapu penetrantu v zadaném intervalu, bude stěr zbytkového penetrantu pomocí papírové utěrky z různě ohřátého vzorku po uplynutí ideálního intervalu. Zvážení bude probíhat na laboratorních vahách v sériích, jelikož výsledky zkušebního pokusu na závěsné váze při zachycení závislosti výnosu na viskozitě ztroskotalo na chybě měření.

3 Kapilární metody NDT a jejich použití pro automobilový průmysl

Tato kapitola se věnuje kapilární metodě (PT) od fyzikálních principů po části zaměřené na uspořádání automatických kapilárních linek. Kapilární zkoušky jsou v automobilovém průmyslu podrobeny malé součásti od podložek šroubových spojů až po bloky motorů v počtu desítek až tisíců kusů za den. Na obr. 3.1 je sestava zavěšení kola, obdobné prvky zavěšení kola sloužily v experimentální části této práce jako vzorky (viz. obr. 5.3.5).



Obr. 3.1 Sestava zavěšení předního kola [24]

3.1 Princip kapilární metody

Před zahájením samotné kapilární zkoušky musí být povrch vhodnou metodou očištěn a vysušen. Na zkoušený povrch se nanese vhodný penetrant v dostatečném množství tak, aby mohl pronikat do povrchově otevřených vad. Po nezbytné prodlevě k penetraci je nadbytečný penetrant odstraněn metodou odpovídající druhu penetrantu a nanese se suchá nebo vodná vývojka k usnadnění vzlínání penetrantu. Penetrant vytváří s kontrastní vývojkou barevnou či fluorescenční indikaci. [1]

3.2 Fyzikální základy

Penetrant je kapalná látka na olejovém nebo vodném základu, jež má několik i někdy protichůdných úkolů: pokrýt celý zkoušený povrch (krajový úhel), v určeném čase a v dostatečném množství (povrchové napětí) pronikat do povrchově otevřených vad (viskozita), z těchto vad po odstranění přebytečného penetrantu i za pomoci vývojky vzlínat (kapilarita) na povrch. Z těchto důvodů musí být složení penetrantu takové, aby měl dostatečně vysoké povrchové napětí a nízký krajový úhel, vyjádřený dobrou smáčivostí.

3.2.1 Povrchové napětí

Na molekulu uvnitř kapaliny působí přitažlivé síly všech okolních molekul. Tyto síly jsou ve všech směrech stejné, takže výslednice těchto sil uvnitř kapaliny je rovna nule. Jinak je tomu na povrchu kapaliny. U molekul, které jsou na povrchu, nejsou dané síly kompenzovány ze strany plynné fáze, a proto jsou molekuly vtahovány určitou silou dovnitř kapaliny. Vlivem uvedených sil se kapalina chová tak, aby počet povrchových molekul byl co nejmenší, tzn., zaujímá kulový tvar, nebo se snaží tento tvar nabýt, protože při něm má daný objem kapaliny nejmenší povrch. [2]

Povrchové napětí lze měřit např. tzv. odtrhávací metodou, kdy se měří potřebná síla k odtržení definovaného tělíška, které plave na hladině kapaliny.

Povrchové napětí kapaliny závisí nejen na druhu kapaliny, ale také na prostředí, které se nachází nad jejím volným povrchem. Snížení povrchového napětí vody přidáním jiné látky (tzv. smáčedla) nebo zvýšením teploty vody se projevuje usnadněným smývání nečistot či kapalin. [3]

3.2.2 Krajový úhel

Pozorujeme-li stykové místo povrchu kapaliny se stěnou nádoby, zjišťujeme u různých kapalin různě velké zvýšení nebo snížení jejího okraje. Na okraji nádoby se stýkají tři prostředí: kapalina, vzduch a stěna pevného tělesa. Úhel, který svírá povrch kapaliny se stěnou pevného tělesa, se nazývá krajový úhel. Velikost krajového úhlu závisí na rozdílu povrchového napětí stěny tuhého tělesa vzhledem ke vzduchu a vzhledem ke kapalině. Tento rozdíl se nazývá adhezní konstanta. [2]

Pokud je adhezní konstanta kladná, je krajový úhel ostrý a kapalina smáčí stěnu nádoby. Je-li naopak adhezní konstanta záporná (krajový úhel tupý), kapalina nesmáčí stěnu nádoby.

Smáčivostí rozumíme schopnost kapaliny vytvářet stálý povrch na rozhraní s pevným tělesem za podmínek, kdy přebytečná kapalina steká z povrchu. Smáčivost je tedy vyjádřena krajovým úhlem. Pokud je cosinus krajového úhlu blízký jedné, nastává úplná smáčivost. Blíží-li se cosinus krajového úhlu k nule, kapalina se roztéká po povrchu pevného tělesa. Při záporném krajovém úhlu kapalina stěnu nesmáčí. [2]

Smáčivost ovlivňuje též drsnost povrchu a povrchové napětí. Penetrant musí pokrýt celý zkoušený povrch a z těchto důvodů se používají penetranty na olejové bázi, které mají příznivé hodnoty povrchového napětí ($0,027 - 0,0364 \text{ N}\cdot\text{m}^{-1}$) oproti vodě ($0,073 \text{ N}\cdot\text{m}^{-1}$) [4]. Nároky na ekologičnost a ekonomičnost při srovnatelných vlastnostech penetrantů dávají možnost vstupu na trh penetrantům na vodné bázi, u těchto penetrantů se ale musí přidávat smáčenlivé přípravky pro snížení povrchového napětí a krajového úhlu. [5]

3.2.3 Kapilarita

Vlivem soudržných sil vzrůstá tlak v kapalině směrem od povrchu dovnitř kapaliny. Tento vzrůst tlaku se nazývá tlakem kohezním. V tenké trubici (kapiláře) ponořené kolmo do smáčivé kapaliny nastává působením (adhezních) sil ke vzestupu molekul kapaliny vzhůru po stěnách trubice. Vlivem povrchového napětí, které podmiňuje adhezní síly, je kapalina v trubici vtahována až do určité výše, kde vytváří zakřivený, konkávní povrch, neboť proti povrchovým silám tu působí gravitační síla sloupce vyzvednuté kapaliny. [2]

Z hlediska principu kapilárních metod je kapilární elevace důležitým jevem, neboť hledané vady lze vlastnostmi přirovnat ke kapilárám. To znamená, že čím menší je šířka vady, tím je větší zakřivení vnitřní hladiny penetrantu ve vadě a tím je větší kapilární tlak neboli velikost kapilárního tlaku je nepřímo úměrná šířce vady. [2]

3.2.4 Viskozita

Viskozita ovlivňuje rychlost pronikání a vystupování penetrantu do/z vad. Penetrant s vysokou viskozitou proniká do vad pomalu, naopak penetrant s nízkou viskozitou vytváří na zkoušeném povrchu příliš tenkou vrstvu. [2]

3.3 Historie kapilární metody

Princip kapilární metody je znám téměř dvě století, přičemž v minulosti se nároky na optimalizaci týkaly především citlivosti. V současnosti se kromě citlivosti pozornost zaměřuje i na ekonomickou stránku - tedy spotřebu kapilárních prostředků - a dále na ekologicky-vodohospodářskou stránku zkoušení.

V roce 1970 vyšel v odborné literatuře článek „Smrt hlavní NDT metody je vyhlášena“. Její konec se však odkládá každým rokem a vycházejí prognostické články typu „Kapilární metoda v roce 2060“. Na výhradní postavení v inspekci povrchových necelistvostí se místo kapilární metody tlačí nebo už jí částečně nahradily metody typu VT, ET či MT. Tvar povrchu zkoušených výrobků, aplikační jednoduchost metody oproti jiným metodám, rychlost zkoušení desítek výrobků na jeden zkoušecí cyklus či materiály z keramických komponentů, kde nejdou uplatnit nebo mají jmenovaní konkurenti z metod NDT různá omezení, nechávají výsadní postavení kapilární metodě v hromadném zkoušení povrchových necelistvostí nejenom v automobilovém průmyslu. Kapilární metoda u velkosériových linek může být plně automatizována, kromě stanovišť průběžných kontrol procesu a konečné vyhodnocovací inspekce. Snahy o nahrazení lidského faktoru při vyhodnocení v kapilárních linkách nejsou novinkou, ale zatím nedospěly do výrazně využitelné fáze. V příloze 1 jsou uvedeny některé důležité historické milníky pro kapilární metodu. Těmto milníkům muselo samozřejmě předcházet nespočet objevů - a to především v oblasti chemie a jiných vědecko-technických oborů.

3.4 Kapilární linky

Vybavení kapilární linky musí odpovídat použitému zkušebnímu systému a všem závazným normám. Všechny konstrukční materiály použité pro vybudování stabilního pracoviště pro kapilární zkoušení, např. nádoby, potrubní systémy a odpad, musí být vyrobeny z materiálu, který odolává během celého procesu použitým prostředkům. Kromě toho, tyto materiály nesmí měnit vlastnosti použitého kapilárního systému. Nádoby musí mít dostatečnou hloubku pro ponoření celého výrobku a nádoby s kapilárními prostředky mají být opatřeny víkem, které chrání zařízení, není-li používáno. [6]

Kapilární linky můžeme rozdělit podle způsobu přepravy mezi jednotlivými zkušebními prostředky na:

- a) Ruční - přeprava k jednotlivým sekcím a aplikace kapilárních prostředků je prováděna ručně,
- b) poloautomatizované - přeprava a např. ponořování je prováděno pomocí pojezdového zvedacího zařízení,
- c) automatizované - přeprava mezi jednotlivými sekcemi linky a zvedání jednotlivých van s kapilárními prostředky k zavěšeným výrobkům je řízena automaticky.

3.5 Příprava a předčištění

Předčištění povrchu je důležitou fází před aplikací penetrantu, na důkladnosti provedení předčištění závisí výsledek zkoušky. Přípravou povrchu se rozumí opláchnutí zkoušeného povrchu po mechanickém a chemickém čištění, především od zbytků chemických prostředků, které by mohly nepříznivě ovlivňovat vlastnosti penetrantů (snížení citlivosti zkušebního systému). Posledním krokem před nanesením penetrantu by mělo být důkladné osušení zkoušené plochy, aby voda z oplachu nebránila vnikání penetrantu.

Nečistoty jako okuje, olej nebo nátěry musí být odstraněny mechanickou nebo chemickou cestou nebo jejich kombinací. Předčištění musí spolehlivě zajistit, že zkoušený povrch neobsahuje zbytky nečistot, které by zabraňovaly vnikání penetračního prostředku do všech povrchových vad. Očištěná plocha má být dostatečně velká, aby nedošlo k ovlivnění zkoušeného povrchu sousedním okolím. [1]

3.5.1 Mechanické předčištění

Vhodným způsobem se odstraní okuje, struska a rez například kartáčováním, otřením, smirkovým plátnem, třískovým obráběním, broušením, ofoukáním vzduchem nebo proudem tlakové vody. Uvedené způsoby odstranění nečistot z povrchu jsou však obecně nevhodné k odstranění nečistot z povrchových vad. Ve všech případech, především při otryskání, se musí dát pozor, aby povrchové vady nebyly zakryty zhutněním povrchu nebo uzavřeny. [1]

3.5.2 Chemické předčištění

Výběr metody chemického čištění je ovlivněn druhem nečistot a vrstvou znečištění na povrchu - mastnotou, vosky, rzi, okujemi, organickými a anorganickými látkami, mechanicky přetvořenými povrchy po obrábění atd.

Pro chemické čištění povrchu se může používat čištění párou, detergenty, ředidly, rozpouštědly, ultrazvukové čištění, alkalické čištění a moření. Velmi dobrých výsledků se dosahuje odmašťováním v párách rozpouštědel. [7]

3.6 Zkušební systémy

Kombinace zkušebních systémů jsou uvedeny v normě ČSN EN 571 - 1 zobrazené v tab. č. 3.6.1.

Pro automobilový průmysl je vyžadována vyšší citlivost na odhalování povrchových vad, z tohoto důvodu se nejčastěji používají metody IAa, IAb a IDb. Důvodem upřednostňování těchto systémů je možnost zautomatizování celého kapilárního procesu.

Penetrant		Prostředek k odstranění přebytku penetrantu		Vývojka	
Typ	Název	Metoda	Název	Druh	Název
I	Fluorescenční penetrant	A	Voda	a	Suchá
		B	Lipofilní emulgátor	b	Vodou rozpustná
II	Barevný kontrastní penetrant	C	Rozpouštědlo	c	Suspenzní na vodní bázi
		D	Hydrofilní emulgátor		
III	Fluorescenční barevný penetrant	E	Voda a rozpouštědlo	d	Na bázi rozpouštědla
				e	Na vodní bázi nebo na bázi rozpouštědla pro zvláštní použití (snímatelná vývojka)

Tab. 3.6.1 Zkušební systémy podle normy ČSN EN 571 - 1[1]

3.7 Nanesení penetrantu

Aplikace penetrantu na zkoušený povrch může proběhnout několika způsoby, ale tak, aby bylo zaručeno celkové pokrytí zkoušeného povrchu. Aplikační způsoby penetrantu se rozdělují na tyto kategorie:

- a) Ponořováním - součást je ponořena do penetrantu na závěsníku nebo více součástí je ponořeno v koši. Penetrační čas lze rozdělit na dvě doby - čas čistého ponoru a čas okapu, který má podstatný vliv na výnos penetrantu.
- b) nástřik - v kapilárních linkách se používá klasický nebo elektrostatický nástřik penetrantu, kterým je dosaženo rovnoměrného pokrytí zkoušeného předmětu při nižším výnosu penetrantu. Při nanášení fluorescenčních penetrantů stříkacím zařízením může být součástí aplikačního boxu UV-A lampa pro kontrolu

celoplošného pokrytí výrobku penetrantem. Nástřik pomocí spreje se používá u přenosných zkušebních souprav,

- c) štětcem - používá se v uzavřených prostorech nebo k nanášení na určené části výrobku, aby např. nedošlo k reakci penetrantu s ochranným nátěrem předmětu,
- d) polítí - používá se u rozměrnějších částí a v kombinaci se štětcem, viz obr. 3.7.1.

Pronikání penetrantu do vad závisí na jeho vlastnostech, druhu materiálu, na který je nanášen, typu vady, vnějších podmínkách zkoušení a na charakteru zpracování materiálu, jak ukazuje tabulka č. 3.7.1 z normy ASME Boiler and Pressure Vessel Code.

Doporučené minimální časové prodlevy				
Materiál	Forma	Typ vady	Prodlevy (min)	
			Penetrant	Vývojka
Ocel, Al, Mg, Ti, mosaz, bronz a žáruvzdorné slitiny	odlitky a sváry	zavaleniny, pórovitost, studené spoje, trhliny (všech forem)	5	10
	tvářený materiál - protlačování, kování atd.	přeložky, trhliny (všech forem)	10	10
Slinuté karbidy		studené spoje, pórovitost, trhliny	5	10
Plasty	všechny formy	trhliny	5	10
Sklo		trhliny	5	10
Keramika		trhliny, pórovitost	5	10

Tab.3.7.1 Tabulka doporučených minimálních časů penetrace a vyvíjení [8]

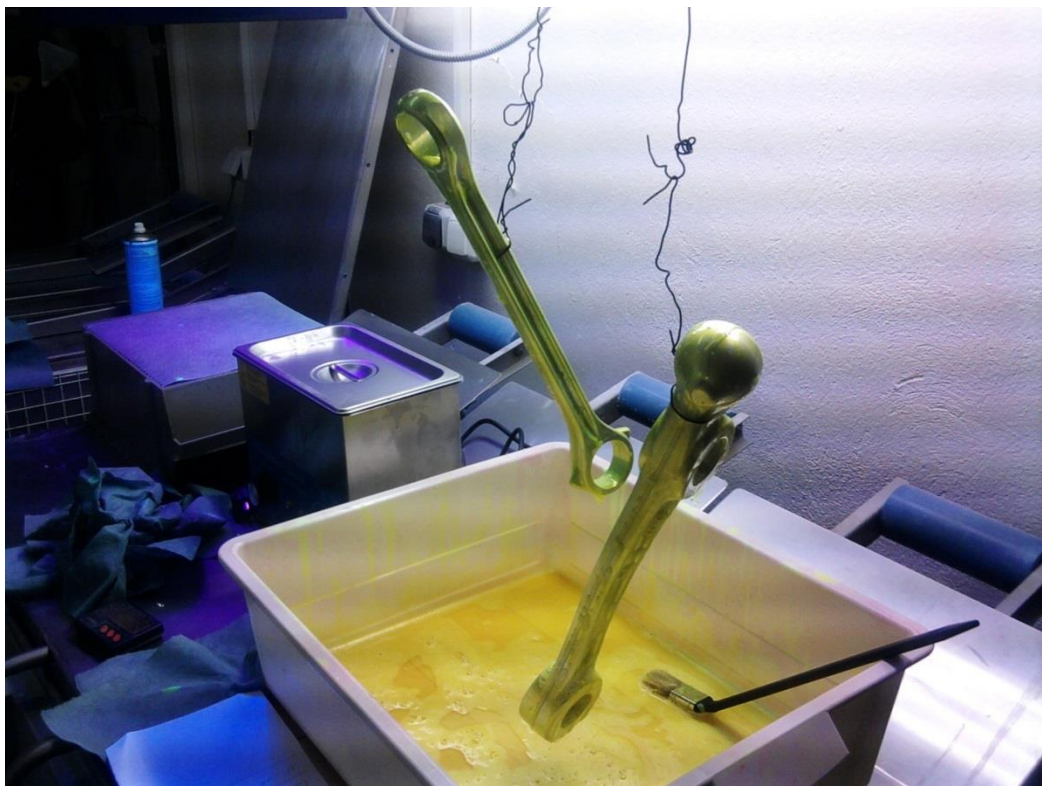
Pro urychlení penetrace lze použít v zásadě tyto způsoby [2]:

- a) Ohřátí penetrantu - penetrant snadněji proniká do užších vad, ale ohříváním může dojít k vypařování nosného media a ke změně vlastností penetrantu (tyto změny v první fázi mohou vypadat i jako zvýšení citlivosti penetrantu),
- b) ohřátí zkoušeného předmětu - ohřátím zkoušené předmětu dojde k otevření vad a k usnadnění vnikání penetrantu do vady,

- c) snížení tlaku - snížením atmosférického tlaku v komoře, tento způsob je vhodný pro součásti s příliš dlouhým penetračním časem. Penetrační čas lze zkrátit až na 1/10 původního,
- d) vibrace - mechanické nebo ultrazvukové.

Při teplotách nižších než 5 °C může dojít ke kondenzaci vody ve vadách a povrchu, přičemž tato voda může zabránit pronikání penetrantu. [1]

Další negativní vliv snížené teploty může spočívat ve zvýšení viskozity penetrantu a tedy v prodloužení doby penetrace, na kterou se musí vzít ohled. Pro ověření zkoušení za těchto nestandardních podmínek se používá hliníková měrka.



Obr. 3.7.1 Aplikace penetrantu kombinací ponoru a štětce [Foto autor]

3.8 Odstranění přebytku penetrantu

U ručních kapilárních linek se k odstranění přebytečného penetrantu používá ostřík, např. po určenou dobu s nastaveným maximálním tlakem a optimální teplotou vody v mezích závazných norem. Účinnost oplachu je kontrolována pod UV-A lampou.

U poloautomatizovaných linek může být oplach proveden pomocí ostříku, nebo např. krátký ponor součásti nebo koše a posléze dodatečný ostřík pod UV-A světlem.

U automatizovaných linek typu IAb může být oplach proveden např. pomocí dvou za sebou řazených a propojených oplachových van. V první vaně je ponorem odstraněna většina přebytečného penetrantu z povrchu zkoušené součásti, při dalším cyklu je výrobek ponořen do oplachové vany číslo 2 a výrobek je zbaven zbytků nadbytečného penetrantu. Oplach 1 a 2 tvoří téměř uzavřený okruh koloběhu vody - kontaminovaná voda je z oplachu 1 přečerpávána k čištění a zbavená kontaminantů je vypouštěna do oplachu 2. Přes přepad je kontaminovaná voda z oplachu 2 přečerpávána do oplachu 1. Zavedení dvou oplachových van je důsledkem neefektivnosti jednoho oplachu nebo dvojnásobného oplachu do stejné vany, které by způsobovalo nadměrné fluorescenční pozadí. Účinnost oplachu ve vanách je též ovlivněna dobou ponoření a intenzitou probublávání vzduchu ve vanách. Kontrola oplachu v automatizované lince může být například zajištěna bočním vstupem pro obsluhu kapilární linky, která pomocí UV-A lampy periodicky kontroluje kvalitu oplachu.

3.9 Nanesení vývojky

Vývojky podle zkušebního systému jsou v tab. 3.6.1, přičemž aplikace vývojky na zkoušený výrobek pomocí spreje je na obr. 3.9.1.

V kapilárních linkách se nejčastěji vývojka nanáší buď suchá ve vířivé (naprašovací) komoře nebo ponořováním do vodou rozpustné vývojky.

Dalším vhodným způsobem nanášení suché vývojky je elektrostatické stříkání, které zajistí na zkoušeném povrchu její rovnoměrnou vrstvu (oproti ostatním způsobům nanášení suché vývojky).

Po odstranění přebytečného penetrantu se mokré vodné vývojky nanášejí ponořením, přičemž sušení probíhá až po aplikaci vývojky. Po úplném zaschnutí vývojky začíná vyvíjecí čas. Některé standardy (především letecké) způsob IAb nedovolují, jelikož hrozí velké riziko vymytí penetrantu oplachováním vodou a vodnou vývojkou.



Obr. 3.9.1 Nanesená vrstva vývojky sprejem [Foto autor]

3.10 Prohlížení

Prohlídka, je-li to možné, se doporučuje provést ihned po nanesení nebo zaschnutí vývojky. Tímto postupem mohou být indikace vad nejlépe interpretovány. Konečná prohlídka se provede po uplynutí vyvíjecího času. [1]

Při použití fluorescenčních penetrantů musejí být splněny tyto podmínky [1]:

- a) Intenzita osvětlení UV-A záření na zkoušeném povrchu nesmí být menší než $10 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$,
- b) intenzita osvětlení viditelného světla může být maximálně 20 lux,
- c) inspektoři nesmí používat fotochromatické brýle,
- d) adaptace zraku v setmělé místnosti by měla být minimálně 5 minut,

- e) UV záření nesmí přímo zasáhnout do očí inspektorů,
- f) žádné povrchy či předměty v zorném poli inspektora nesmí fluoreskovat.

Prohlížení při použití barevného penetrantu je podle normy ČSN EN 571 - 1 akceptovatelné při denním nebo umělém bílém světle o intenzitě nejméně 500 lx na povrchu zkoušené součásti. Podmínky osvětlení musí zabraňovat oslnění a odrazům světla. [1]

3.11 Konečné čištění

Po provedení a vyhodnocení zkoušky by měly být stopy po penetrantu a vývojce z povrchu zkoušené plochy odstraněny tehdy, pokud by mohly bránit dalšímu zpracování nebo používání součásti. [7]

U kapilárních linek se po vyhodnocení prášková vývojka nejčastěji ofoukává stlačeným vzduchem v digestoři.

3.12 Citlivost kapilární metody

Dle normy EN ISO 3452 - 3 se používají dva typy měrek, typ I pro určení citlivosti systému a typ II pro posouzení funkčnosti penetračních systémů. Pro ověření citlivosti zkoušení za abnormálních podmínek se používá hliníková měrka. Pro správnou vypovídací funkci měrek je nezbytná bezvadná péče o jejich čistotu a nutná periodická kalibrace u výrobce. Pro ověření funkčnosti dané kapilární linky při provozu nejlépe slouží denně zkoušené výrobky s reálnými vadami.

3.12.1 Typ I

Kontrolní měrka typ 1 obsahuje sadu destiček opatřených chrom-niklovou vrstvou o tloušťkách 10, 20, 30 a 50 μm . Destičky opatřené vrstvou 10, 20 a 30 μm se používají pro určení citlivosti fluorescenčních systémů. Citlivost barevných kapilárních systémů se určí pomocí destičky opatřené vrstvou 30 a 50 μm . [9]

Kontrolní měrka typ 1 je sada destiček pravoúhlého tvaru o rozměrech 35 x 100 x 2 mm. Příčné trhliny jsou u každé destičky zhotoveny natahováním destičky v podélném směru. Poměr šířky a hloubky každé trhliny by měl být přibližně 1:20. [9]

3.12.2 Typ II

Kontrolní měrka typ 2 představuje jedinou destičku pravoúhlého tvaru o rozměrech 155 x 50 x 2,5 mm z korozivzdorné oceli. Jedna polovina měrky je bezproudě pokovená niklem a tenkou vrstvou chromu a na druhé polovině je připravena plocha určité drsnosti. Pokovená strana obsahuje pět vad ve tvaru hvězdice. [6]

Oplachová plocha pro ověření smývatelnosti penetračních prostředků se zhotoví na jedné polovině zkušebního povrchu destičky jako čtyři vedle sebe ležící plochy o velikosti 25 x 35 mm s drsností $R_a = 2,5 \mu\text{m}$, $R_a = 5 \mu\text{m}$, $R_a = 10 \mu\text{m}$ a $R_a = 15 \mu\text{m}$. Plocha s drsností $R_a = 2,5 \mu\text{m}$ může být zhotovena opískováním a ostatní plochy elektroerozí. Na rubu zkušebního povrchu (pokovená plocha) musí být zhotoveno pět vtisků (viz obr. 3.12.1) ve stejných vzdálenostech při zatížení v rozmezí 2 kN až 8 kN. Vtisky umělých vad se zhotoví lisem nebo vhodným Vickersovým tvrdoměrem, opatřeným vnikacím tělesem ve tvaru polokoule. [9]

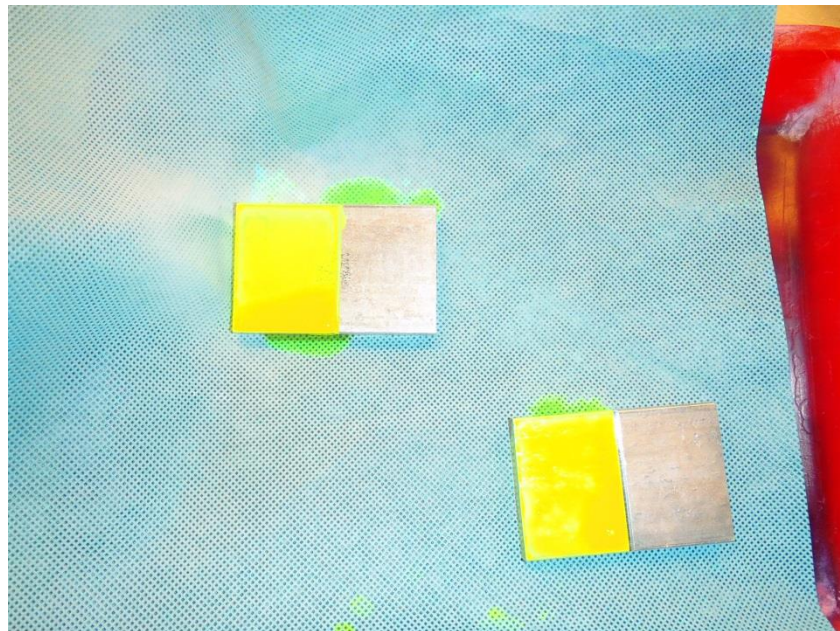
Typický rozměr (průměr)	
Vada	mm
1	3
2	3,5
3	4
4	4,5
5	5,5

Obr. 3.12.1 Rozměr vad na měrce typu II [9]

3.12.3 Hliníková měrka

Hliníková měrka je na obr. 3.12.2. Používá se při zkoušení za nestandardních teplotních podmínek a též k posouzení citlivosti barevných penetrantů. [8]

Hliníková měrka je válcovaný hliníkový blok o tloušťce 9,5 mm a rozměrech 75 x 50 mm, rozdělený na dvě stejné části vyfrézovanou drážkou. Tento hliníkový blok je ze spodní strany ohříván hořákem a následně prudce schlazen ve vodě, čím se vytvoří drobné trhliny na povrchu měrky. Tato měrka by se podle výrobců měla použít pouze 3x. Výhodou je možnost „domácí“ výroby, detailní postup zhotovení této srovnávací měrky je uveden v literatuře [8].



Obr. 3.12.2 Hliníková měrka - na straně A je aplikován penetrant [Foto autor]

3.12.4 Výrobek s „přirozenou“ vadou

Výrobky se známými vadami slouží jako ty nejlepší „měrky“ pro ověření funkčnosti kapilárního systému. Před začátkem každé směny se nechají tyto reprezentativní vzorky projít celým kapilárním procesem, citlivost linky vyhodnocujeme pomocí úspěšnosti zachycení těchto reprezentativních vzorků, které mají nejlépe kritické a hraniční vady.

3.13 Techniky snížení výnosu penetrantu do oplachové vody

Následující techniky a/nebo kroky zpracování kapalného penetrantu jsou doporučovány ke snížení množství zbytků produktů kapalných penetrantů v kapalném odpadu kapilárních zkušebních systémů. [10]

- a) Minimalizované množství aplikovaného penetrantu - preferování nástřiku sprejem nebo elektrostatického způsobu nanášení,
- b) optimálně navržený odkapávací čas a teplota s ohledem na maximální odkapání penetrantu ze zkoušené součásti,
- c) upřednostňování post-emulgačních hydrofilních technik, kdy není emulgátor součástí penetrantu,
- d) předoplach u post-emulgačních penetrantů před nanesením emulgátoru. Tento nezemulgovaný penetrant lze oddělit od vody (koalescencí, sražením, provzdušňováním, flokulací a obdobnými zařízeními) a znovu použít v procesu,
- e) střídá aplikace emulgátoru a dodržení emulgačního času,
- f) použití membránové filtrace nebo vhodného absorbentu pro odstranění penetrantu a emulgátoru z odpadové vody.

3.14 Normy v automobilovém průmyslu

Vnitropodnikové normy jsou v AP vymezeny pro použití kapilární metody. Normy udávají kvalifikace a certifikace pracovníků podle EN 473, kteří provádějí kapilární zkoušku. Normy uvádí podle jakého předpisu má být provedena kapilární zkouška a určují požadavky - výrobky po provedení kapilární zkoušky nesmí obsahovat žádnou indikaci. Vady na polotovaru, které jsou v oblasti dalšího zpracování, se nehodnotí. Normy také určují požadavek citlivosti zkušebního systému, postup dokumentace indikace a charakterizují oblasti komponentů, které mají být zkoušeny podle důležitosti (označení na výkresové dokumentaci):

- a) Pevnostně důležité,
- b) funkční,
- c) ostatní oblasti.

Norma definuje přípustné (např. mírné poškrábání povrchu) a nepřípustné vady, které by měly být kapilární zkouškou odhaleny, a určuje, v které oblasti, do jaké hloubky a v jakém rozsahu mohou být prováděny opravy (např. vady v pevnostně důležité oblasti nesmí být opravovány). Vnitropodnikové normy udávají, jaký postup musí proběhnout po opravě a před znovu provedením kapilární metody (např. očištění výrobku), určují kolikrát jeden a ten samý výrobek může být podroben kapilární metodě a odkazují na použité (závazné) normy.

3.15 NDT v automobilový průmyslu

V automobilovém průmyslu se pomocí NDT metod musí odzkoušet velké množství výrobků ve velmi krátkém čase, proto se ke hledání povrchových vad používají především dvě metody - a to MT pro feromagnetické a PT pro hliníkové materiály. Použitý kapilární zkušební systém musí být vysoce produktivní, z toho důvodu se používá vodou smytlý penetrant, který umožňuje rychlé provedení zkoušky a změnu citlivosti volbou penetrantu.

Základními oblastmi pro řešení odpadního hospodářství u kapilárních linek jsou z důvodu velké produktivity (až několik desítek tisíc kusů výrobků denně):

- a) Množství spotřebovaného (vyneseného) penetrantu,
- b) následná kontaminace oplachové vody tímto penetrantem.

4 Vodní a odpadové hospodářství kapilárních linek

Při velkém fluorescenčním pozadí, které je způsobeno kontaminací oplachové vody penetrantem a emulgátorem, může tento abnormální fluorescenční jas u inspektorů ve fázi inspekce zvyšovat nároky na pozornost, a v extrémním případě, kdy je intenzita jasu pozadí velká, mohlo by dojít k překrytí indikace (nekontrastním) fluorescenčním pozadím, tudíž k nenalezení indikace.

Prvotní snahou u kapilárních linek by mělo být, aby nedocházelo k nadlimitním koncentracím penetrantu (popř. emulgátoru) v oplachové vodě, čemuž z technologických a procesních důvodů nejde zcela zabránit. Důležité procesy v kapilární lince z hlediska kontaminaci oplachové vody, jako jsou odkapávací čas či způsob nanesení penetrantu, musí být nastaveny tak, aby na celém povrchu zkoušeného předmětu zůstal povlak penetrantu pro samotný penetrační proces, ale který následně bude co v nejmenším množství kontaminovat oplachovou vodu.

Předehřev penetrantu nejen zvyšuje jeho schopnost pronikat rychleji do užších vad, ale zvyšuje též odkapané množství penetrantu při odkapávacím čase. Při lepším odkapávání dochází ke snížení výnosu penetrantu - tedy spotřebě penetrantu a zároveň k nižšímu zanesení oplachových vod.

V normě EN 571 - 1 je stanovena teplota oplachové vody v mezích 10 - 50 °C, tlakové podmínky nejsou stanoveny. Jiné normy - ASME Code, ASTM E 1417, ale i EN ISO 10893 - 4 jsou v tomto ohledu přísnější a stanovují maximální tlak a teplotu při ostřiku 350 kPa / 43 °C, 275 kPa / 10 - 38 °C respektive 350 kPa / 40 °C. Vizualně se hodnotí neprůhlednost a pěnivost oplachové vody a pomocí UV lampy se zjišťuje fluorescence oplachové vody. [5]

4.1 Otevřený systém oplachové vody

Konstantní průtok čisté vody v oplachovacích nádržích zaručuje vždy přesně definované podmínky kvality oplachu a tím i konstantní výsledky kontroly. Čistota oplachových vod vypouštěných do odpadu je z legislativního hlediska stanovena Zákonem o vodách v kapitole „Povrchová úprava kovů a plastů“, kde jsou důležité parametry CHSK_{Cr} a BSK. Tyto parametry určují chemickou a biologickou spotřebu kyslíku pro

likvidaci obsažených uhlovodíků. Hodnoty parametrů jsou stanoveny správními orgány a závisí na kapacitě ČOV a mnoha dalších parametrech. Obvykle je hodnota $CHSK_{Cr}$ okolo 300 - 600 $mg \cdot l^{-1}$. Při oplachu jsme na hodnotách kolem 3000 $mg \cdot l^{-1}$ a oplachové vody tedy nejdou vypouštět přímo do ČOV. [11]

4.2 Uzavřený systém oplachové vody

Navrácení vyčištěné vody zpět do procesu vytváří uzavřený okruh, který je úsporný ve spotřebě vody. Problémem je zvyšování penetrantu v oplachové vodě a na tom závislé zvyšování fluorescenčního pozadí. Uzavřený systém nebude fungovat na 100 % a to z těchto důvodů:

- a) Filtrace neumí zachytit soli a těžké kovy, tudíž stoupá jejich koncentrace,
- b) voda začne časem hnit,
- c) pokud odebíráme zahuštěný kal, je potřeba nahradit jeho množství novou vodou.

Uzavřený systém by bylo možné vybavit ionexovými filtry pro zachytávání anorganických sloučenin a bentonitem pro zachycení těžkých kovů, ale cena těchto filtrů by byla vysoká. [11]

4.2.1 V uzavřeném okruhu je nutno splnit následující podmínky

- a) Voda ve vanách musí být provzdušňována bubláním,
- b) voda musí neustále cirkulovat (pokud vody stojí, stane se z AC líheň mikroorganismů),
- c) dezinfekční prostředky (bakteriostatika) se musí každý měsíc měnit (jinak si na ně bakterie vytvoří rezistenci),
- d) dezinfekci ozonem neprovádět pro silné korozní účinky ozónu,
- e) pro dezinfekci jsou nejlepší prostředky na bázi chlornanů a dezinfekce UV zářením,
- f) dezinfekce UV má v kalné vodě omezenou působnost max. 0,002 m od trubice.

[11]

4.3 Možnosti čištění oplachové vody v uzavřeném okruhu

Nejčastěji používaný způsob čištění odpadové oplachové vody v uzavřeném i otevřeném okruhu vodního hospodářství je AC. Často používaným řešením problému s kontaminovanou vodou je i prosté rozředění čistou vodou na dovolené vypustitelné limity do kanalizace (ČOV).

4.3.1 Rozředění penetrantu

Rozředění penetrantu vodou nelze v pravém slova smyslu považovat za způsob čištění oplachových vod, ale je to stále používaný způsob řešení problému s kontaminovanou vodou. K rozředění 1 litru penetrantu bude zapotřebí až tisíců litrů vody, přičemž bude záviset na druhu penetrantu (vodou smytlý, post - emulgační), základu penetrantu (vodný/olejový), citlivosti a jiných aspektech.

4.3.2 Aktivní uhlí

Aktivní uhlí je vysoce porézní uhlík s mimořádně velkým vnitřním povrchem ($400 - 1500 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$). Je to soubor grafitových destiček, jejichž vzájemná vzdálenost tvoří vnitřní povrch - póry. Rozeznáváme mikropóry ($< 2 \text{ nm}$), kde se odehrává adsorpce převážně organických látek (lze je přirovnat k parkovištím, kde zaparkujeme - sorbujeme své automobily) a transportní póry (makropóry $> 50 \text{ nm}$ a mesopóry $2 - 50 \text{ nm}$; lze je přirovnat k dálnicím a silnicím, po kterých jezdí automobily k parkovištím), které umožňují přístup organických molekul k aktivním centrům aktivního uhlí - mikropórům. Četnost výskytu mikropórů a transportních pórů určuje vlastnosti AC a jeho vhodnost či nevhodnost pro úpravu pitných vod. Pro "správný" poměr mikropórů a transportních pórů je rozhodující materiál, ze kterého se AC vyrábí. Struktura AC vyrobeného z černého uhlí je jiná než struktura aktivního uhlí vyrobeného z jiných materiálů, např. z kokosových skořápek nebo dřeva. AC vyrobená z černého uhlí mají většinou vhodný poměr mikropórů a transportních pórů, zatímco u aktivních uhlí vyrobených z kokosových skořápek výrazně převažují mikropóry, u aktivních uhlí vyrobených ze dřeva makropóry. Aktivní uhlí vyrobená z černého uhlí jsou většinou mnohem vhodnější pro aplikace ve vodárenství než AC vyrobená z kokosových skořápek, která i při vyšším jodovém čísle a celkovém povrchu mají nižší sorpční schopnost, což se obvykle projevuje nižší účinností a životností. [12]

Čištění oplachových vod pomocí AC je nejstarší a nejčastěji používaný způsob filtrace. Ve skutečném provozu, kde je použit i jiný způsob čištění vody, je vždy filtr s AC posledním článkem čistícího řetězce. Důvodem použití filtru s AC v každém okruhu kapilárních linek je nezachycení některých látek jinými způsoby čištění, jako tomu je např. u ultrafiltrace. [10]

Existuje několik druhů AC, které se liší adsorpční parametry, největší vliv na tuto schopnost má základní surovina pro výrobu AC (uhlí, kokosové skořápky atd.). Adsorpční schopnost AC pro penetrant a emulgátor není stejná a tudíž je třeba zohlednit druh AC od distributora, jak se uvádí v článku [13]. Autoři zde též uvádějí informativní příklad o adsorpčních schopnostech AC: 1 kg adsorbuje 0,4 litru penetrantu a 0,35 až 0,6 litru hydrofilního emulgátoru, nicméně se tyto hodnoty nemohou sčítat. V případě, že AC adsorbuje 0,3 litru penetrantu, mělo by navíc přijmout cca 0,1 litru emulgátoru. To se ale ve skutečnosti nemusí stát, některé nově přichozí molekuly, které mají větší afinitu k AC, mohou odplavit už adsorbované molekuly z AC, a ty projdou filtrem bez zachycení. [13]

Návrh aktivního uhlí

Nejdůležitější parametry při provozu AC jsou kontaktní doba a lineární rychlost proudění upravované vody. Tyto parametry charakterizují rovnice (a) a (b).

- a) Kontaktní doba [min] = objem AC [m³] * 60 / průtok [m³·h⁻¹],
- b) lineární rychlost [m/h] = průtok [m³·h⁻¹] / průřez [m²].

Z rovnice (a) lze při známém průtoku a odhadu vhodné kontaktní doby spočítat objem aktivního uhlí. [12]

Mechanismy čištění vody AC

Čištění odpadní vody není pouze záležitostí odstraňování organických barviv procesem adsorpce, ale spíše kombinací adsorpce a filtrace. Toto je potvrzeno skutečností, že kombinace spojení AC a další možnosti filtrace pomocí perlitu nebo křemeliny je účinnější než samotné filtrace přes AC, a nežli filtrace přes perlit a křemelinu. Jestliže je použito pouze AC, může dojít k vytvoření olejového filmu na částech AC, a tím k zastavení adsorpce barviva na uhlí. Jestliže je použit perlit a křemelina, dojde k filtračnímu efektu s minimální nebo žádnou adsorpcí barviva. Pokud oplachová voda

bude nejprve procházet přes perlit a křemelinu a poté až přes AC, dojde ke zvýšení životnosti AC na dvojnásobek. [10]

Adsorpce povrchově aktivních látek uhlím

Určité druhy AC jsou schopny odstranit povrchově aktivní látky (PAL). Avšak bylo zjištěno, že typy uhlí, které odstraňují PAL, nemají žádné odbarvovací vlastnosti s ohledem na typ barviva většinou používaného u fluorescenčních penetrantů. Proto musíme použít sendvičové uspořádání dvou druhů AC, oddělených perforovanou deskou umístěnou tak, že odpadní voda nejprve prochází vrstvou uhlí za účelem odbarvení a poté vrstvou uhlí na snížení PAL. Pokud dojde k záměně pořadí typů AC nebo jejich promísení, žádaného výsledku není dosaženo. Jestliže si uvědomíme fakta o výše jmenovaných filtračních faktorech, je třeba při některých aplikacích použít třívrstvé sendvičové uspořádání, které se skládá z perlitu, křemeliny a dvou vrstev AC. Nejlepší způsob odstranění nasyceného uhlí je spálení, které zničí adsorbované organické látky. Při větším množství použití AC se vyplatí jeho regenerace. [10]

Obnovení adsorpčních vlastností AC

Adsorpci AC lze obnovit dvěma způsoby - regenerací a reaktivací, které se liší především teplotou obnovy, přičemž z důvodu teploty obnovy si zprostředkovatél obou technologií odporují v dosažených výsledcích obnovy.

Regenerace AC pomocí termické desorpce

Regenerace je prováděna přehřátou párou při teplotách 300 – 350 °C s následnou kondenzací a oddělením vody a desorbátu. Uvedené teploty odpovídají teplotám jedné z fází reaktivace (fáze vynášení těkavých organických látek). Následně však nedochází k dalšímu nárůstu teploty a po vynesení kontaminantu je provedena jeho kondenzace. To znamená, že zde neproběhne pyrolýza ani spalování, takže nehrozí žádné vyhoření ani opal AC a poměrné zastoupení velikosti pórů v aktivním uhlí zůstává zachováno. [14]

Podle dosavadních zkušeností zůstává sorpční kapacita takto regenerovaného AC stejná jako sorpční kapacita nového AC i po desítkách cyklů regenerace. Je nutno brát však zřetel na zanesení mechanickými nečistotami z předchozího používání (pigmenty – špatná předfiltrace, pyrolýzní uhlík - předchozí reaktivace). [14]

Reaktivace AC

Aktivní uhlí je přepracováno v rotační protiproudé peci při postupném nárůstu teploty z 20 na 830 °C a době zdržení cca 30 minut, což jsou podobné podmínky jako při výrobě aktivního uhlí. Aktivačním médiem je vodní pára a spaliny plynu. Při této technologické operaci dochází postupně k vysušení, tepelné desorpci těkavějších naadsorbovaných látek a aktivaci (obnově) vnitřního povrchu na 92 - 100 %, výjimečně i přes 100 % (dodatečné zreagování amorfního podílu uhlíku) z původní hodnoty. Provozní teplota je dostatečná k tomu, aby došlo k pyrolýze i netěkavých organických látek. Na zařízení je možno reaktivovat AC nasycené např. polymerizujícími látkami, siloxany, chlorovanými uhlovodíky apod. [15]

Tento postup reaktivace má značné kvalitativní výhody oproti ostatním technologiím (např. termická desorpce 250 - 350 °C), kdy při nižších teplotách nedochází ke znovuoobnovení aktivního povrchu. Koeficient výtěžnosti: 0,75 - 0,85. Koeficient nelze předem stanovit, protože je závislý na jímavosti použitého sorbentu, chemickém složení zachycovaných látek a na stupni nasycenosti sorbetu. [15]

Nevýhody AC

Filtrace přes AC při použití správného množství uhlí a s kombinací ostatních metod povede k vyčištění vody, která může být vypuštěna do kanalizace. Jedinými kontaminanty, které mohou být stále přítomny v oplachové vodě, jsou silně hydrofilní prvky, které jsou součástí systému povrchově aktivních látek penetrantu nebo emulgátoru. Aby mohla být voda vypuštěna do kanalizace, musí obsahovat pouze povrchově aktivní látky, které jsou rozložitelné biologickými organizmy, jako např. biologicky rozložitelné čisticí prostředky. V této době je výběr látek, které vyhovují požadovaným kritériím omezený. U post-emulgačních penetračních procesů může vzniknout problém s hromaděním hydrofilního čističe, jestliže oplachová voda recirkuluje v procesu. Za těchto podmínek koncentrace čističe postupně narůstá až na úroveň při které dochází k nadměrnému pění. Dochází k usazování a usychání pěny na výrobku, tím dochází nadměrnému pozadí a ztížení inspekční fáze procesu. [10]

4.3.3 Koagulace a flokulace

Dávkováním koagulantu (chemická látka na bázi železa nebo hliníku, nebo polyaluminium chlorid) do vody a následným mícháním vzniká fyzikálně - chemický proces, kterým dochází ke koagulaci a flokulaci nečistot ve vodě. Koagulací (čiřením) lze z vody odstranit látky anorganického i organického původu. Cílem je vytvořit takové podmínky, aby se nečistoty přítomné ve vodě převedly do separovatelné formy, větších shluků, které lze z vody odstranit například sedimentací či filtrací. [16]

Produktem koagulace a flokulace (proces, při němž se srážejí vzniklé částice koagulace na větší shluky) jsou separovatelné částice – vločky, které se mohou odstranit sedimentací nebo filtrací. Pro zvýšení účinnosti flokulace se často užívá chemický přípravek, tzv. polyflokulant, nebo též pomocný flokulant, který zvyšuje účinnost tvorby vloček. [16]

Rozpustnost sraženin ovlivňuje především vliv vlastních iontů (tj. iontů z nichž je sraženina složena) a iontů cizích (to jsou ostatní ionty v roztoku) a teplota roztoku. Zvýšení koncentrace vlastních iontů vede ke snížení rozpustnosti sraženiny. Proto se při srážení používá srážedlo vždy v mírném přebytku. [17]

Technické provedení srážení spočívá v nadávkování srážecího činidla do odpadní vody s následným promícháním. Někdy je též potřeba upravit hodnotu pH roztoku. Mícháním obsahu nádrže, do kterého se dávkuje koagulant (případně polyflokulant) dochází ke shlukování mikrovloček sraženiny do větších dobře sedimentujících celků, které se zahušťují na dně a čistá voda odtéká přepadem. Nádrž pro koagulaci a flokulaci může být typu reaktoru (dobrá kontrola procesu) nebo kontinuálního zařízení. [17]

Ověření koagulačního testu na přípravku Ardrex 920A

Voda s obsahem uvedeného přípravku (Ardrex 920 A) je zpracována pomocí koagulačního činidla. Z hlediska kvantifikace sledování množství přípravku během testů byla nejprve stanovena specifická $CHSK_{Cr}$ přípravku, která činí $0,627 \text{ g}\cdot\text{ml}^{-1}$ přípravku Ardrex 920 A. [18]

Do odpadní vody se dávkoval směsný koagulant na bázi hliníku a železa v množství $0,8 \text{ ml}\cdot\text{l}^{-1}$ a po homogenizaci se upravilo pH na hodnotu cca 9 pomocí roztoku hydroxidu sodného. Po ustálení pH na požadované hodnotě byl dávkován polyflokulant W 2530 v množství $3 - 4 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ ve formě 0,1% roztoku a reakční směs byla míchaná 2 minuty. Poté

následovala sedimentace po dobu 30 minut a z čiré vrstvy byly odebrány vzorky a provedena analýza. [18]

V Tab. 4.3.1 jsou uvedeny zbytkové koncentrace $CHSK_{Cr}$ stanovené v roztocích o jednotlivých koncentracích přípravku při použití koagulace.

Požadované ředění	$CHSK_{Cr}$ - vstupní koncentrace ($mg \cdot l^{-1}$)	$CHSK_{Cr}$ - zbytková koncentrace ($mg \cdot l^{-1}$)
1:50	12438	12438
1:100	6276	5780
1:200	3163	2874

Tab. 4.3.1 Výsledky koagulačních testů vyjádřené pomocí $CHSK_{Cr}$ u jednotlivých koncentrací. [18]

Hodnoty stanovené pro přímou koagulaci na bázi hliníku a železa v daném dávkovaném množství vykazují nízkou účinnost a pro použití nepřicházejí v úvahu. [18]

Ověření absorpce sorpčně-koagulačním testem

K testům byly použity uměle připravené odpadní vody stejné jako v předešlém koagulačním testu. Odpadní vody byly zpracovány koagulačním postupem za přídavku sorbentu. Postup zpracování odpadních vod byl následující: do surové odpadní vody se za stálého míchání nadávkoval sorbent, v tomto případě aktivní uhlí AC 20 v množství $2 - 10 \text{ g} \cdot \text{l}^{-1}$, a následovala prodleva za stálého míchání po dobu 20 minut. Poté se dávkoval směsný koagulant na bázi hliníku a železa v množství $0,8 \text{ ml} \cdot \text{l}^{-1}$ a po homogenizaci se upravilo pH na hodnotu cca 9 pomocí roztoku hydroxidu sodného. Po ustálení pH na požadované hodnotě byl dávkován polyflokulant W 2530 v množství $3 - 4 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ ve formě 1% roztoku a reakční směs byla míchaná 2 minuty. Poté následovala sedimentace po dobu 30 minut a z čiré vrstvy byly odebrány vzorky a provedena analýza. [18]

V následující tab. 4.3.2 jsou uvedeny zbytkové koncentrace $CHSK_{Cr}$ stanovené v roztocích o jednotlivých koncentracích přípravku při použití sorbetu AC 20 za stejných podmínek vedení procesu sorpce a následné koagulace. [18]

	Množství dávkovaného sorbentu AC 20 (g.l ⁻¹)					
Ředění	0	2	4	6	8	10
1:50	12 438	2 845	1 996	1 482	1 351	1 096
1:100	5 780	1 183	718	521	417	390
1:200	2 874	448	241	196	174	-

Tab. 4.3.2 Výsledky sorpčně-koagulačních testů vyjádřené pomocí $CHSK_{Cr}$ u jednotlivých koncentrací [18]

Pro ověření čistitelnosti těchto odpadních vod bylo použito AC 20 s měrným povrchem $1\,500\text{ m}^2\cdot\text{g}^{-1}$, jemně mleté. Celkově lze konstatovat, že použití sorpční koagulace při aplikaci vhodného typu aktivního uhlí je vhodnou metodou postupu čištění a jeho účinnost je otázkou dávky sorbentu a doby zdržení (prodlevy ve fázi sorpce). Sorpční kapacita se mění, dle proměnného zatížení sorbentu a doby kontaktu. Tyto parametry se dají v provozu libovolně měnit. [18]

Z hlediska vedení koagulační procesu se neprojevil ve sledovaném rozsahu ředění rušivý vliv obsahu tenzidů na sedimentaci, kal byl ve všech případech dobře sedimentovatelný. Velikost jednotlivých součástí technologie je nutno určit dle dimenzování příslušného pracoviště. Jako vhodný sorbent bylo navrženo aktivní uhlí AC 20, jehož účinnost byla koagulačními testy ověřena. [18]

4.3.4 Ultrafiltrace

UF patří mezi tlakově membránové separační procesy. Jejich hnací silou je tzv. transmembránový tlak a využívá porézních membrány. Velikost zachycených částic se pohybuje mezi 10 - 100 nm při pracovním tlaku 500 - 1000 kPa. [17]

Pronikání membránou se nazývá permeace a vzniklá směs po průchodu membránou a odváděná jako produkt je permeát. Směs vzniklá ze suroviny, která zůstává na vstupní straně membrány po oddělení permeátu, se nazývá retentát. [19]

Nevýhodou těchto UF membrán je ohřívání odpadní vody, jelikož samotný proces UF vyžaduje výkonná čerpadla, kde se část mechanické energie mění na teplo a ohřívá

odpadní vody. Voda, organické materiály, teplo a nedostatek kyslíku vytvářejí mikroklima pro růst anaerobních bakterií, které zvyšují ucpání membrán.

U UF se setkáváme se dvěma základními nedostatky - s integritou membrán a postupně se snižující průchodností membrán.

Shora uvedené problémy vedly k hledání nového uspořádání a materiálového provedení membrán. V minulosti produkované systémy provozované ve směru inside/out byly nahrazeny systémy s průtokem outside/in (CFF). Porušování integrity polymerních membrán z dutých vláken a způsoby pro dokonalé zpětné praní a chemického čištění membrán dávají předpoklady pro použití odolnějších a masivnějších materiálů jako jsou keramické membrány. [19]

Dnes se používají keramické membrány s křížovým tokem vody skrz filtr CFF (cross-flow filtration), u kterých proudí směs rovnoběžně s povrchem membrány a filtrát odchází ve směru kolmém k povrchu. Na membráně zachycené částice nevytvářejí silnou vrstvu, protože jsou unášeny proudem tekutiny podél membrány smykovou silou. Metoda se používá při vyšších koncentracích, např. pro dělení emulzí (průmyslové odpadní vody obsahující olej). [15]

4.3.5 Reverzní osmóza

Je zřejmé, že přímé odstranění všech částic je možné dosáhnout reverzní osmózou (RO) a nanofiltrací. Tyto technologie jsou však určeny k odstranění solí a odstranění ostatních součástí roztoku může být doprovázeno nevratnými nežádoucími ději jako je zanášení membrán. [20]

Oddělíme-li dva různě koncentrované roztoky polopropustnou membránou, propouštějící pouze rozpouštědlo (vodu), začne přirozenou cestou proudit voda z prostředí zředěnějšího do koncentrovanějšího. Tento děj se nazývá osmóza. Po určité době dojde k ustálení hladiny v části s koncentrovanějším roztokem výše. Rozdíl hladin odpovídá tzv. osmotickému tlaku, který je dán hlavně rozdílem koncentrací. [20]

Působíme-li na koncentrovanější roztok tlakem, začíná se průtok vody ze zředěnějšího do koncentrovanějšího zpomalovat, a v okamžiku vyrovnání osmotického tlaku s vnějším tlakem se průtok vody zastaví. Zvýšíme-li vnější tlak nad tlak osmotický, začíná proudit voda opačným směrem (tzv. reverzní osmóza). [20]

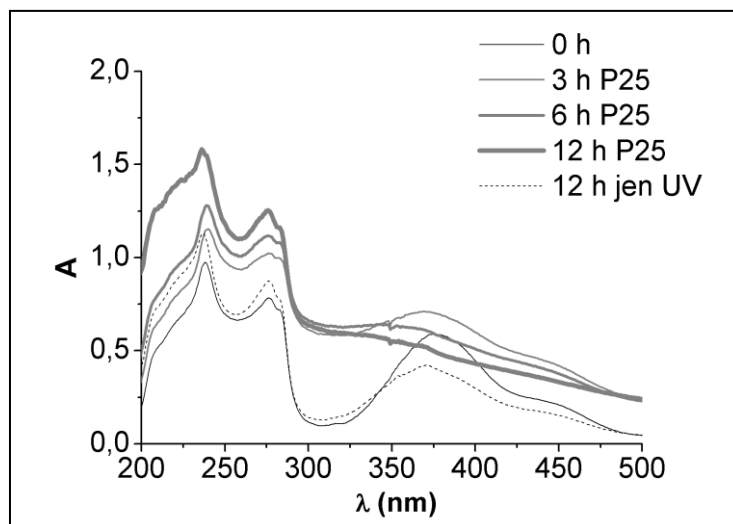
Reverzní osmóza je stejně jako ultrafiltrace založena na průchodu tekutiny membránou, která má zachytit znečišťující látky. Každý proces založený na platformě membrán se setkává se stejnými problémy: velká vstupní investice, malý denní objem vyčištěné vody a ucpání membrány, jelikož membrána je ve styku se znečištěnou vodou 24 hodin denně a 7 dní v týdnu. [15]

4.3.6 Fotokatalytické čištění oplachové vody

Experimenty pro prokázání účinnosti fotokatalytického čištění na oxidu titaničitém (TiO_2) byly prováděny na vodou zředěném (1:1000) přípravku Ardrex 970 P23 (fluorescenční penetrant s citlivostí 2, vodou smytelný), který obsahuje fluorescenční barvivo kumarin C1 (absorpční maximum při vlnové délce 384 nm). [21]

Pro degradaci byly použity vsádkový i průtočný fotoreaktor, u nichž byly jako zdroj záření použity kompaktní zářivky BLB (Black Light Bulb) poskytující maximální intenzitu v rozsahu vlnových délek 350-390 nm. Jako fotoaktivní materiál byly použity částicové vrstvy materiálu P25 obsahující $0,5 \text{ mg TiO}_2/\text{cm}^2$ připravené sedimentační metodou. Rovněž byly pro degradaci ve vsádkovém reaktoru použity transparentní vrstvy oxidu titaničitého připravené metodou sol-gel, jejichž tloušťka byla 224 nm. [21]

Absorpční spektra roztoků Ardrexu během jeho fotokatalytické degradace na vrstvě P25 jsou znázorněny na obr. 4.3.3. Během degradace dochází k poklesu širokého absorpčního píku při 384 nm, až dojde k jeho úplnému vymizení. Během fotokatalytické degradace tedy dochází postupně k odbarvení tohoto žlutého fluorescenčního barviva, avšak současně dochází ke vzniku zákalu, který zvyšuje absorpenci v celém rozsahu vlnových délek. V případě užití transparentní sol-gel vrstvy je průběh degradace podobný jako v případě materiálu P25, nicméně rychlost odbarvení je nižší. V případě použití pouze UV záření bez obsahu fotokatalytické aktivní vrstvy dochází k mírnému poklesu absorpance při vlnové délce 374 nm, nicméně k úplnému odbarvení a tvorbě zákalu nedochází ani po 24 hodinách ozařování. [21]



Obr. 4.3.3 Absorbční spektrum degradace Ardrox pomocí P25[21]

Z experimentů fotokatalytické degradace přípravku Ardrox 970 P23 na částicových vrstvách obsahujících P25 a rovněž na TiO₂ vrstvách připravených metodou sol-gel lze na základě absorpčních spekter a výsledků plynové chromatografie konstatovat, že dochází k úplné degradaci fluorescenčního barviva. Na základě hodnot TOC a celkových chromatogramů získaných během fotokatalytických experimentů je možno konstatovat, že obsah ostatních složek se výrazně neliší od původního nedegradovaného roztoku. [21]

4.3.7 Ozonizace

Většina fyzikálně-chemických čistírenských procesů je ve své podstatě separačních. Jednou z možností, jak při čištění odpadních vod nežádoucí látky skutečně zlikvidovat nebo přeměnit na méně nebezpečnou formu, je chemická oxidace či redukce.

Firma Magnaflux nabízí přístroj MagnaPure II na principu oxidace odpadní vody ozónem. Deklaruje zbavení fluorescenčního zeleného zbarvení a zápachu u 2200 litrů denně (odhad na základě koncentrací 1000 ppm) odpadní vody s hodnotami, které bude možné vypouštět do kanalizace ve většině měst či obcí.

Ozón (O₃) je plyn, který se vyrábí v místě spotřeby v tzv. ozonizátorech z čistého nebo vzdušného kyslíku tichým výbojem při napětí několika tisíc až desítek tisíc voltů. Tato přeměna je energeticky značně náročná, navíc výtěžnost se procesem pohybuje řádově v procentech.

Se svým standartním redox potenciálem 2,07 V je ozón jedním z nejsilnějších oxidačních činidel vůbec. S úspěchem se používá pro oxidaci řady anorganických i organických látek v odpadních vodách.

Reakční mechanismy spotřeby a rozpadu jsou velmi složité. Mimo teploty, pH a koncentrace organických a anorganických látek schopných oxidace se uplatňuje i vliv pevné fáze, se kterou je kapalina ve styku. Pro vlastní oxidaci organických látek je třeba co nejjemnější rozptýlení ozónu ve vodě, neboť jen tak je zajištěno jeho efektivní využití. Používají se různé systémy na bázi jemnobublinné aerace, věžových výplňových kolon v protiproudém uspořádání atd. Účinnost ozonizace lze zvýšit různými způsoby. Osvědčila se katalýza (s katalyzátory na bázi Raneyova niklu a dalších těžkých kovů), kombinace ozonizace a UV záření nebo ultrazvuku. [17]

4.4 Dezinfekce vody

Nejčastější způsob dezinfekce vody je prostřednictvím dávkování chemických látek na bázi chlóru (NaClO , chloramin, oxid chloričitý), ultrafialového záření skrze UV lampu nebo ozonizací. Bakterie se taktéž dají ve vodě zahubit elektrolýzou (při elektrokoagulaci) nebo převařením vody. [16]

Z fyzikálních metod je hojně používaná dezinfekce UV zářením. Ionizující záření vytváří ve vodě reaktivní částice, ionty a elektrony, dále elektricky neutrální volné radikály vody, které reagují s většinou organických a anorganických látek, zejména s biochemicky důležitými molekulami, a likvidují bakteriální znečištění. [22]

4.5 Shrnutí čištění odpadové vody

Pokud chceme vypouštět oplachovou vodu z kapilární linky do vodovodní kanalizace - a je jedno jestli se jedná o otevřený či uzavřený oběh vody v PT lince - musí tato voda splňovat požadavky uvedené v zákoně č. 61/2003, konkrétně v části „Povrchová úprava kovů a plastů“. V tomto zákoně je stanovena hodnota $\text{CHSK}_{\text{Cr}} 300 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ pro vypouštěnou vodu do kanalizace, přičemž tato hodnota je určena správními orgány a může se lišit podle místní kapacity ČOV a dalších hledisek. Z protokolů ATG je hodnota CHSK_{Cr} na oplachu kolem $3000 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ a z tohoto důvodu nelze oplachovou vodu přímo vypouštět do kanalizace.

Způsoby čištění oplachové vody jako jsou AC, RO a především UF, mohou vykazovat sebelepší čistící vlastnosti, ale budou vždy sloužit pouze ke snížení následků kontaminace. Je snahou, aby kontaminace vody penetrantem byla co nejnižší. Z tohoto důvodu se u PT linek pro hromadné zkoušení používají takové techniky a procesní opatření, které mají za cíl snížit kontaminaci vody penetranty na co možná nejnižší hladinu.

Filtry s aktivním uhlím čistí odpadové vody úspěšně, ale rychle dochází zanesení pórů a je nutná výměna aktivního uhlí nebo jeho regenerace. Několikanásobná obnova by mohla zvýšit životnost aktivního uhlí, ale otázkou zůstává adsorpční schopnost po regeneraci či reaktivaci AC od penetrantu a především cena obnovy.

Účinnost koagulační čištění je závislé na množství dávkovaného sypaného aktivního uhlí do reakční nádrže. Čištění odpadové vody pouze přidavkem koagulantu neprokázalo čistící účinnost.

Ultrafiltrace je v ČR zatím použita na čištění odpadové vody z kapilární linky v jednom provozu. Účinnost ultrafiltrace je na této kapilární lince potvrzena výsledky pravidelných rozborů vody, ale problémy se zanášením keramických membrán i přes čistící cykly a každotýdenní nucené čištění neustávají. Od zavedení UF k čištění odpadní vody kapilárních linek odrazuje provozovatele vyšší pořizovací cena a špatné výsledky při čištění fluorescenčního barviva.

RO a MVC jsou úspěšné způsoby čištění vody, ale jejich využití brání pořizovací cena zařízení. Reverzní osmóza se používá u penetračních linek s vyšší citlivostí při počátečním napouštění vody do uzavřeného okruhu k demineralizaci vody, takto ošetřená voda nevytváří na zkoušeném výrobku „fluorescenční mapy“.

U fotokatalytického čištění je dosaženo degradace fluorescenčního barviva v odpadní vodě, ale ostatní látky zůstávají netknuté i po dlouhodobém působení UV záření.

Rozředění penetrantu nelze považovat za způsob čištění, ale i v dnešní době je to u některých kapilárních linek používaný způsob vyřešení problémů s kontaminovanou vodou.

Pro dezinfekci oplachové vody v kapilárních linkách se z důvodu snášenlivosti (kompatibility) nemohou používat přípravky na bázi chlóru, jelikož by docházelo ke korozivnímu napadání zkoušených výrobků. Z tohoto důvodu se jako nejefektivnější způsob dezinfekce oplachové vody jeví ultrafialové záření.

Z rešerše vyplývá několik důležitých závěrů. V současné době čištění odpadové vody pomocí adsorpce na AC je při dodržování vypočtených objemů a intervalů výměny úspěšné, ale u vysokokapacitních linek je potřeba doplnit AC pro prodloužení intervalu výměny dalším zařízením. Jako hlavní adept se jeví UF, i když prvotní investice tohoto zařízení bude velká.

Oplach je důležitou částí penetračního systému, musí být dostatečně účinný, ale současně i přiměřený. Jeden ze způsobů přiměřeného odstranění penetrantu je pomocí vody, přičemž rychlost a účinnost oplachu vodou bude závislá mimo jiné na teplotě vody. Předpokladem je, že se zvyšující se teplotou vody bude omývání rychlejší a účinnější, přičemž se nesmí překročit maximální hodnota teploty vody podle EN 571 - 1. V předpisech ASME Code, ASTM E 1417 a EN ISO 10893 - 4 je teplota oplachové vody svázána s tlakem vody.

4.6 Odůvodnění experimentů

Minimalizování výnosu penetrantu lze ovlivnit:

- a) Způsobem aplikace penetrantu,
- b) dobou okapu,
- c) viskozitou.

Dosáhnout sníženého výnosu penetrantu lze změnou způsobu jeho aplikace - elektrostatickým nástřikem místo ponořování. Elektrostatickým nástřikem penetrantu (po příkladě i vývojky) se dosáhne rovnoměrného pokrytí zkoušeného výrobku s nižším výnosem penetrantu (vývojky) oproti ostatním způsobům aplikace penetrantu. Nevznikají tím přebytečné kapky či „loužičky“ v problémových tvarových částech výrobku jako při aplikaci pomocí kombinace částečného ponoru a štětce, viz. obr. 4.6.1. Tyto kapky či „loužičky“ nemají pozitivní vliv na penetranci, pouze zvyšují výnos penetrantu do oplachové vody. Elektrostatická aplikace penetrantu má však jeden významný problém, ne všechny penetranty jsou k tomuto nanášení vhodné. Problém elektrostatické aplikace je ukryt v nízkém odporu penetrantu, pokud má penetrant odpor nulový nebo blízky nule, nelze elektrostaticky nanášet. Nulový odpor mají všechny penetranty na vodném základu.



Obr. 4.6.1 Loužička penetrantu ve tvarové složitosti výrobku [Foto autor]

Doba okapu u automatických linek je řízena taktom kapilární linky. Takt má velký vliv na produkci, prodloužením taktu z důvodu vyššího procentního okapu by došlo ke snížení kapacity linky. Dalším důvodem nezvýšení doby okapu může být faktor „100 %“ okapu, který je zřejmý z obr. 2.2. Po uplynutí 8. minuty se okap už dále nemění a prodloužení jeho intervalu tedy nemá opodstatnění (hodnoty se vztahují na konkrétní experiment a podmínky).

Z výše zmíněných důvodů bude moje pozornost v experimentálních zkouškách směřována k viskozitě penetrantu neboli k závislosti výnosu na teplotě. Změnou viskozity by mohlo být dosaženo optimalizace výnosu penetrantu bez narušení taktu kapilární linky.

5 Experimentální zkoušky

Tato kapitola je rozdělena na tři podstatné části: výnos a okap penetrantu v závislosti na viskozitě, zkoušky pro dimenzování parametrů kapilární linky a zjištění vlivu teploty na smývatelnost.

5.1 Výnos a okap penetrantu v závislosti na viskozitě a čase

Předpokládaný výsledek experimentálního měření vlivu teploty na výnos penetrantu by měl mít charakter závislosti viskozity na teplotě. Se stoupající teplotou by mělo být množství vneseného penetrantu menší.

5.1.1 Postup měření

Postup měření byl po prvotních ověřovacích pokusech stanoven takto: sledovaná veličina (výnos) bude zjištěna setřením zbytkového penetrantu na povrchu po uplynutí stanoveného ideálního času. Ponoření do vany s penetrantem se uskuteční pouze na nezbytně dlouhou dobu, z důvodu omezení sdílení tepla mezi penetrantem a vzorkem.

Výnos penetrantu v závislosti na viskozitě

Při všech měřeních se používal totožný vzorek (rameno závěsu automobilového kola), který se před každým měřením důkladně očistil papírovou utěrkou napuštěnou v rozpouštědle a nechal se 10 minut čistit v ultrazvukové čističce.

Vzorek se ohříval či chladil na potřebnou teplotu v sušičce, respektive v chladícím boxu. Zájmový teplotní rozsah byl určen mezi 10 - 50 °C, jelikož při nižší teplotě může na povrchu či v potencionálních vadách kondenzovat voda a při vyšších teplotách by mohlo docházet ke změně vlastností penetrantu. Při nižších teplotách než 10 °C nebo vyšších teplotách než 50 °C se tyto nestandardní podmínky zkoušení musí v praxi prokazovat pomocí hliníkové měrky.

Vzorek se uchytil pomocí drátu za jednu stranu rovnoměrného ramene z důvodu co nejmenšího vlivu tvoření kapek či „loužiček“ v tvarových složitostech vzorku. Před jednotlivým ponořením vzorků do penetrantu se pomocí 4-kanálového ručního teploměru pro termočlánky změřila teplota na specifickém místě. Vzorek se ponořil do boxu s penetrantem na co nejkratší čas, aby se omezilo sdílení tepla mezi vzorkem a

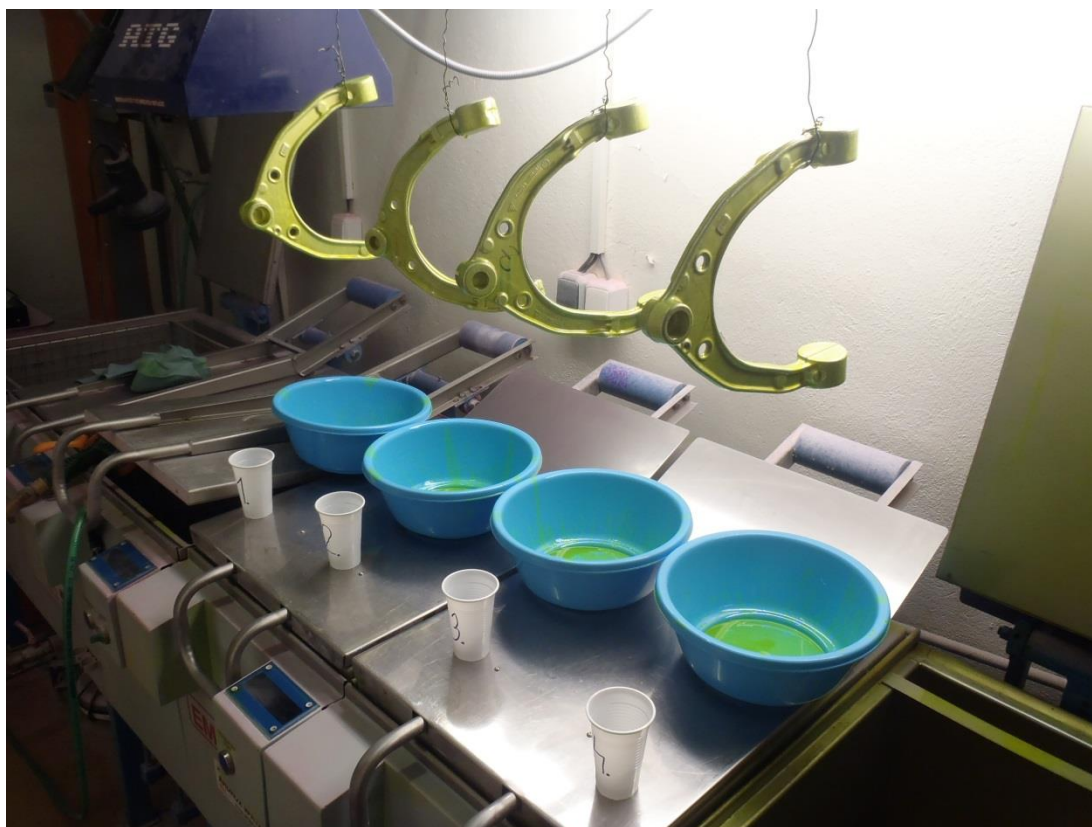
penetrantem při jejich rozdílných teplotách. Vzorek se po ponoření do penetrantu nechal na určený časový interval 10 minut okapávat nad jeho hladinou. Po uplynutí 10 minutového intervalu se pomocí dvou předvážených utěrek setřel veškerý možný penetrant z povrchu tak, aby byl pohlcen v utěrkách. Utěrky byly okamžitě po setření zváženy na laboratorních váhách, aby se penetrant co nejméně odpařoval a nezkresloval výsledek měření. Tento postup se opakoval u všech měření. Vážení jak čistých tak utěrek obsahujících penetrant probíhalo v sériích, aby se do výsledku nezanášela chyba měření.

Výnos penetrantu v závislosti na čase

Pro zjištění závislosti výnosu penetrantu na čase okapu se postupovalo obdobným způsobem jako při zjišťování výnosu penetrantu. Hlavní změna se týkala času prodlevy na okapu, kdy se po intervalech 5, 10 a 15 minut přistoupilo k setření zbylého penetrantu na povrchu a sledovala se změna výnosu penetrantu na čase. Charakter této změny by měl být podobný jako při experimentu na obr. 2.2.

Celkový okap penetrantu

Dalším výstupem z experimentálního měření byl celkový okap penetrantu ze vzorku, viz. obr. 5.1.1. Podmínky byly obdobné předcházejícím výstupům, pouze sledovanou veličinou nebyl výnos penetrantu na vzorku, ale celkový okap penetrantu ze vzorku, tzn. penetrant který se zúčastnil jednoho konkrétního ponoření. Stékající a posléze odkapávající penetrant z povrchu vzorku byl zachytáván do připravené nádoby a její obsah byl zvážen na laboratorních vahách, přičemž čas okapu byl pokaždé 10 minut a jedinou proměnnou byla počáteční teplota ponořovaného vzorku.



Obr.5.1.1 Zachytávání penetrantu pro ověření jeho celkového výnosu [Foto autor]

5.1.2 Počáteční podmínky

Pro měření závislosti teploty na množství vneseného penetrantu na tomto povrchu se používaly penetranty typu Ardrex od firmy Chemetall Group a to konkrétně:

- a) Ardrex 970 P 25 (fluorescenční vodou smytelný penetrant s citlivostí 3),
- b) Ardrex 9721 (fluorescenční vodou smytelný penetrant, ekologicky odbouratelný, s citlivostí 1,5),
- c) Ardrex 920 A (fluorescenční vodou smytelný penetrant, ekologicky odbouratelný, s citlivostí 0,5).

Doba okapu byla nastavena při experimentech na konstantních 10 minut, kromě experimentu „Výnos penetrantu v závislosti na době okapu“, kde byla konstantní teplota vzorku (21,8 °C).

Teplota zkušebního vzorku byla měřena pomocí termočláňkového teploměru před samotnou aplikací penetrantu, jedná se tedy o počáteční teplotu povrchu vzorku.

Teplota penetrantu byla v boxu změřena pomocí rtuťového teploměru, při všech sériích měření byla teplota penetrantu mezi 20,4 až 20,6 °C. Objem penetrantu byl v boxu dostatečný, při průběžných kontrolách po ponoření různě teplých vzorků se teplota penetrantu neměnila.

Teplota okolí v kapilární laboratoři díky tepelnému zdroji sušícího boxu kolísala - a to v rozmezí 21 až 23 °C během všech sérií měření.

5.1.3 Použitá měřidla

Pro měření teploty byl použit 4-kanálový ruční teploměr pro termočlánky OMEGA HH 303 A. Typická přesnost teploměru je $\pm 0,2 \%$ při odečtu 1 °C a přesnost termočlávkových sond se pohybuje v rozmezí $\pm 1,5 \text{ °C}$.

Pro vážení byly použity laboratorní váhy SARTORIUS řady Extend s interní kalibrací, kde rozlišovací schopnost je udávána 0,001 g.

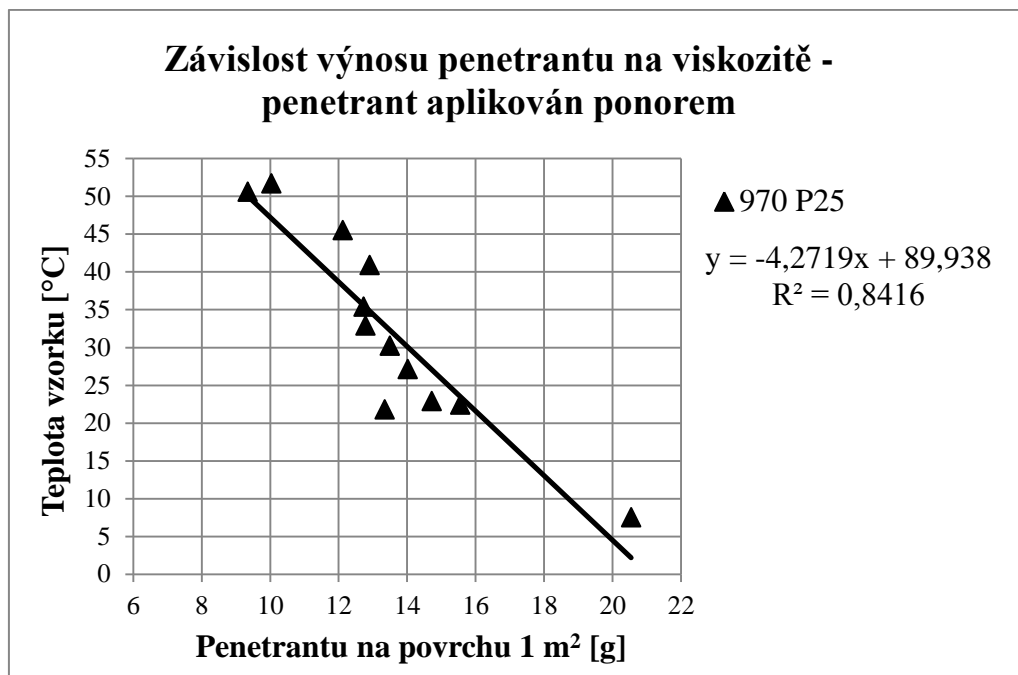
5.1.4 Výsledky

Výsledky experimentálních pokusů potvrdily předpoklady o vztahu teploty a výnosu penetrantu a udaly pro konkrétní podmínky měření trendu závislosti.

Výnos penetrantu

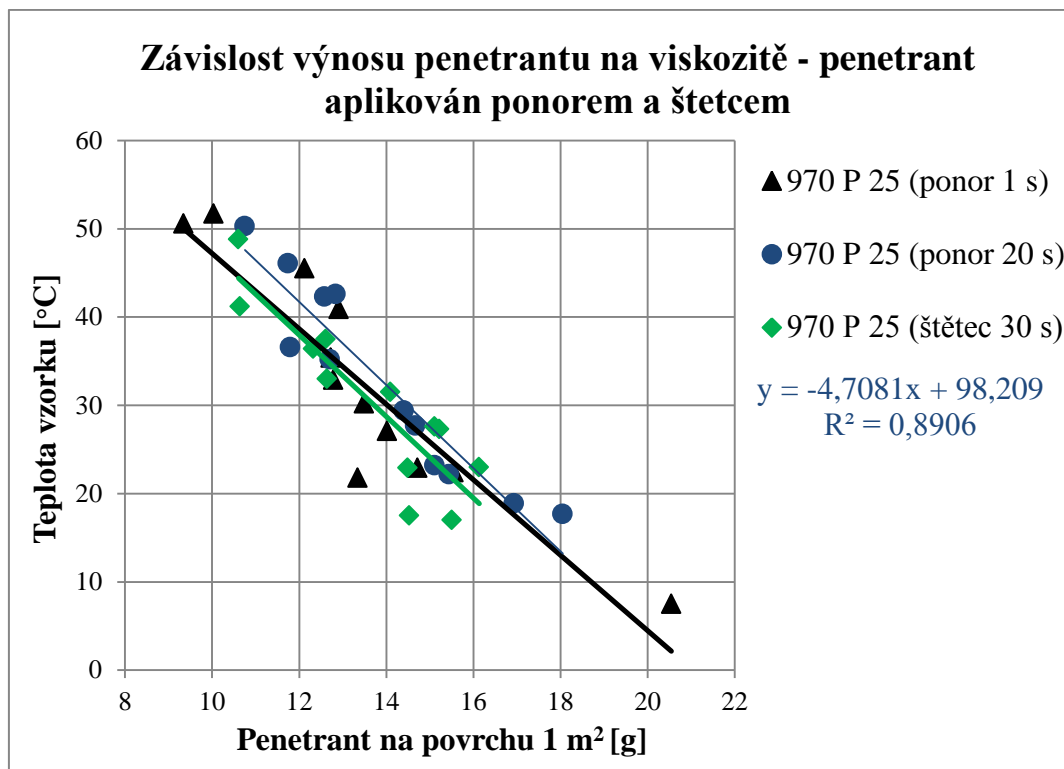
Na vzorku dojde ke sdílení tepla mezi povrchem a penetrantem. Při ohřátém povrchu je kontaktní vrstva penetrantu ohřívána od teplého povrchu vzorku a její viskozita je nižší, proto po vynoření vzorku z vany zůstane na jeho povrchu menší ulpěná vrstva penetrantu. Teplo naakumulované ve vzorku v době prodlevy na okapu se uvolňuje a předává tepelnou energii penetrantu na povrchu vzorku, čímž udržuje nižší viskozitu a penetrant může dále snadněji odkapávat. Při ochlazeném povrchu vzorku je popsáný efekt opačný.

První sérii měření vlivu viskozity na výnos penetrantu jsem provedl s penetrantem Ardrex 970 P 25. Výrobek jsem ohříval/chladil v sušícím/chladícím boxu a po vyrovnání teploty v celém vzorku jsem ho ponořil do vany s penetrantem na co možná nejkratší čas (přibližně 1 sekunda). Důvodem krátké doby ponoření bylo zamezení sdílení tepla mezi vzorkem a penetrantem ve vaně. Výsledný trend závislosti viskozity na výnosu penetrantu je zobrazen na obr. 5.1.2.



Obr. 5.1.2 Graf výnosu penetrantu v závislosti na viskozitě (970 P 25, ponor 1 sekundu)

Druhá série měření měla ověřit vliv viskozity na výnos penetrantu při ponoření do vany na čas v praxi reálný. Čas ponoření nemá být delší než polovina celkové doby penetrace a na kapilárních linkách je čas ponoření nastaven zhruba na 20 sekund. Z výše zmíněného důvodu jsem opakoval postup z první série měření s odlišností v intervalu ponoření vzorku do vany na 20 sekund s následným 10 minutovým okapáním nad hladinou penetrantu. Experiment prokázal, že časy ponoru v době 1 a 20 sekund jsou ekvivalentní v dosaženém výnosu penetrantu, viz obr. 5.1.3. Na stejném grafu je zobrazen i výnos penetrantu při jeho aplikaci štětcem místo ponoru, důvodem bylo ověření výsledků vyplývajících z grafu na obr. 5.1.4 a 5.1.5. Důvodem zařazení experimentu, při kterém byl penetrant Ardrox 970 P 25 aplikován štětcem, byla nutnost srovnání dvou způsobů aplikace dvou různých penetrantů na výnos penetrantu (970 P2 25 proti [920 A, 9721]).



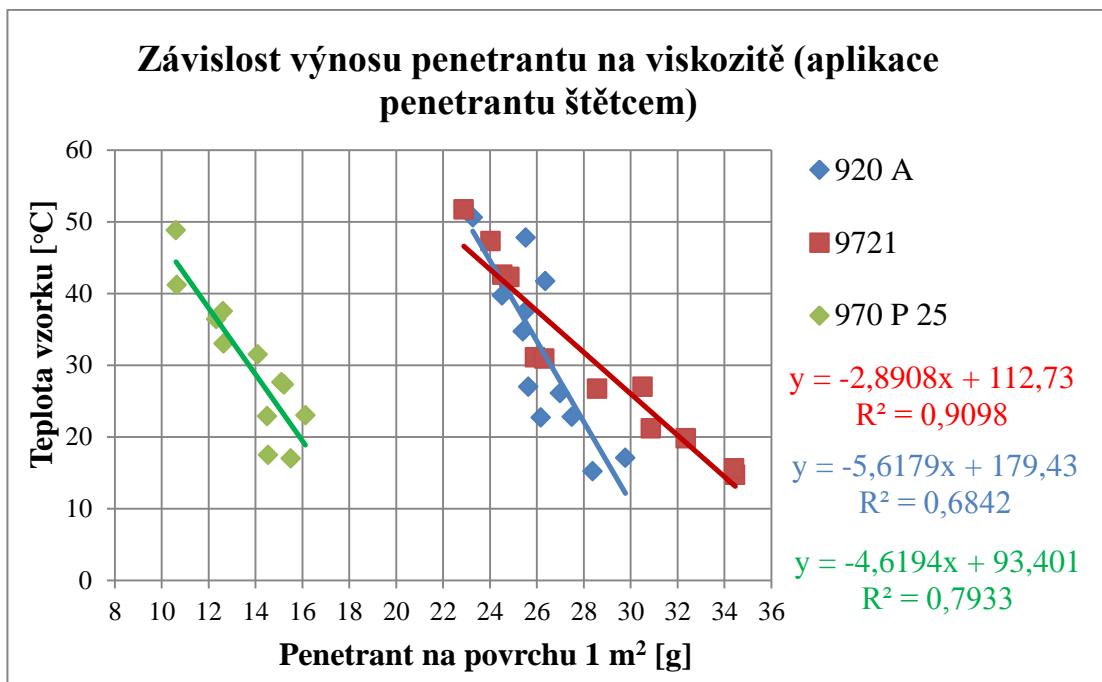
Obr. 5.1.3 Závislost výnosu na viskozitě u Ardroxu 970 P 25

Pro kvantifikování možné úspory výnosu penetrantu v závislosti na viskozitě udávám modelový příklad vycházející z grafu na obr. 5.1.3. Z grafu odečteme hodnoty výnosu penetrantu (bez rozdílu způsobu aplikace penetrantu) pro dva intervaly teplot $20 \pm 3 \text{ °C}$ a $30 \pm 3 \text{ °C}$. V daných teplotních intervalech se nachází pro obě skupiny 9 hodnot, které zprůměrujeme a vzájemně odečteme. Změna viskozity při přechodu z 20 °C ($15,5734 \text{ g}$) na zvýšenou teplotu ohřevem vzorku na 30 °C ($14,0479 \text{ g}$) umožní úsporu penetrantu o hodnotě blízké $1,5 \text{ g}$ na 1 m^2 , potenciální úspora by tak v procentech mohla činit (zaokrouhleně dolů na celé) 9 % penetrantu na 1 m^2 při skoku teploty o 10 °C , viz. tab. 5.1.3.

Hodnota	Teplota 20 ± 3 °C	Výnos penetrantu	Teplota 20 ± 3 °C	Výnos penetrantu
1.	23	16,13	27,3	15,22
2.	22,9	14,49	27,6	15,11
3	17	15,50	31,5	14,09
4	21,8	13,34	33	12,64
5	22,4	15,55	27,1	14,02
6	22,9	14,72	30,2	13,49
7	17,7	18,05	32,9	12,79
8	18,9	16,93	27,7	14,67
9	22,2	15,44	29,4	14,40
Průměr (°C, g)	20,98	15,5734	29,63	14,0479

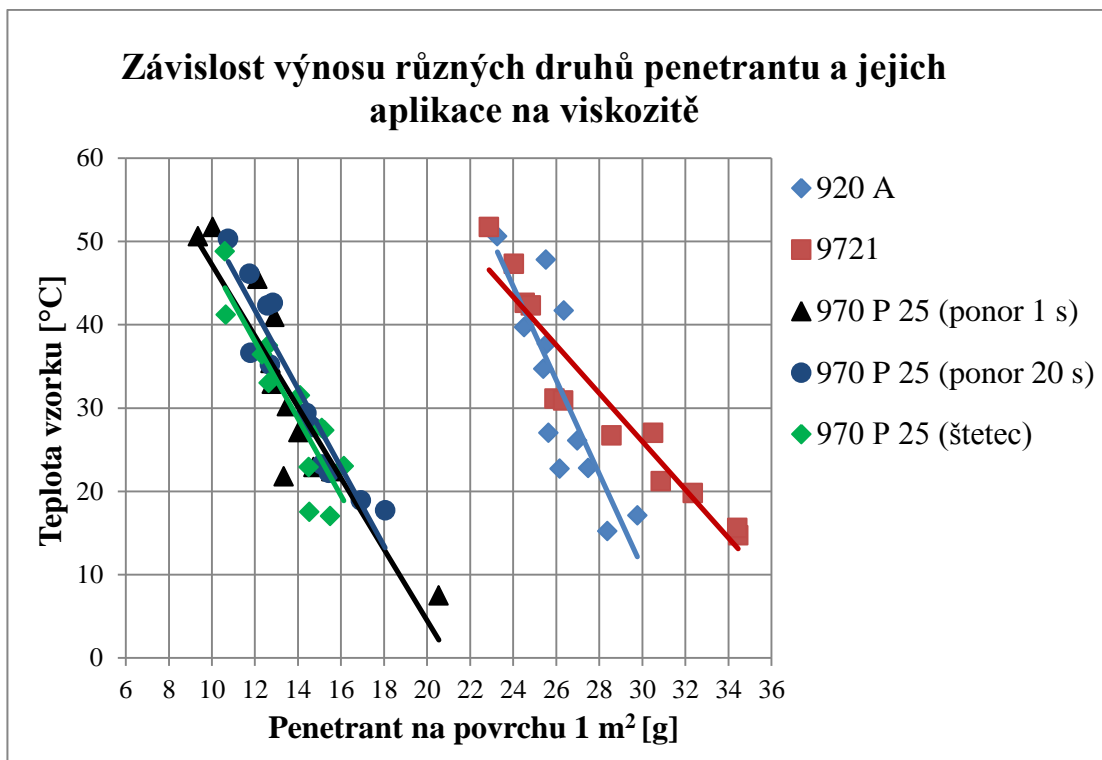
Tab. 5.1.3 Hodnoty výnosu penetrantu pro modelový příklad aplikace ohřevu výrobků pro snížení výnosu penetrantu

Třetí série měření se zaměřila na penetranty více použitelné v AP, jelikož penetrant Ardrex 970 P 25 má citlivost 3. Pro ověření výnosu v závislosti na viskozitě byly použity penetranty Ardrex 920 A a 9721 s citlivostmi 0,5 respektive 1,5. Jednalo se o vzorky penetrantů o objemu okolo 1 litru a proto nemohlo být k ověření vlivu viskozity na výnos použito ponořování, ale musely být aplikovány štětcem. Na grafu zobrazeném na obr. 5.1.4 je znázorněna závislost výnosu různých penetrantů při změně viskozity způsobené změnou teploty štětcem potíraného vzorku. Z grafického zobrazení lze předpokládat, že se vzrůstající citlivostí penetrantu bude vyšší výnos penetrantu.



Obr. 5.1.4 Porovnání penetrantů o různé citlivosti

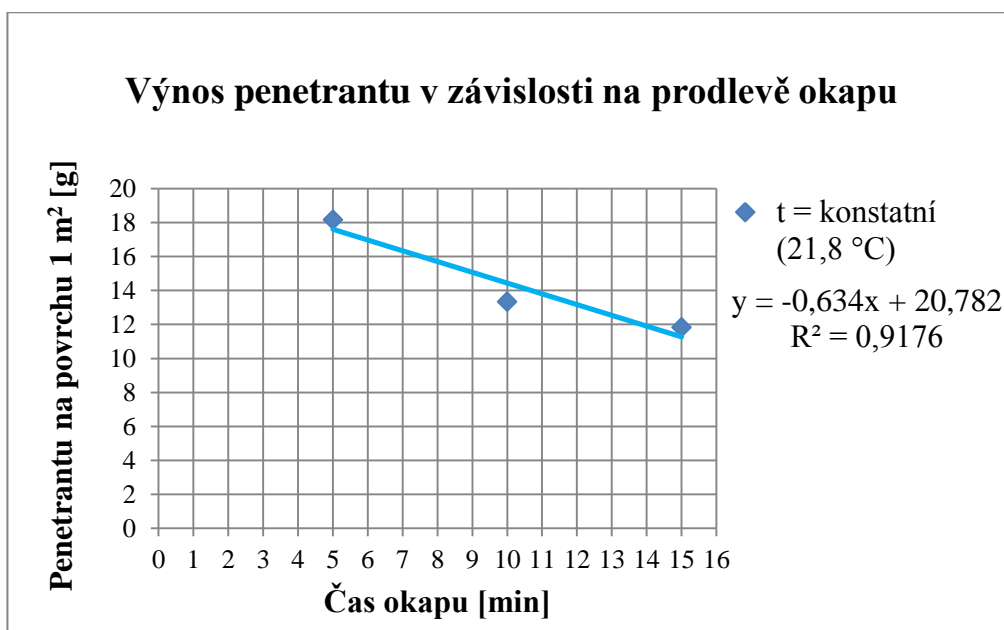
Na obr. 5.1.5 jsou zobrazeny výsledné závislosti výnosu penetrantu na viskozitě bez rozlišení druhu penetrantu a jeho nanášení. Výsledný celkový graf zdůvodňuje, proč muselo být provedeno dodatečné měření s penetrantem Ardrox 970 P 25 aplikovaným na vzorek štětcem - nutností bylo ověřit, že posunutí trendu tohoto penetrantu k nižšímu výnosu není způsobeno odlišnými způsoby aplikace penetrantu na povrch vzorku, ale druhem penetrantu.



Obr. 5.1.5 Porovnání všech penetrantů a různých způsobů jeho aplikace

Výnos penetrantu na čase

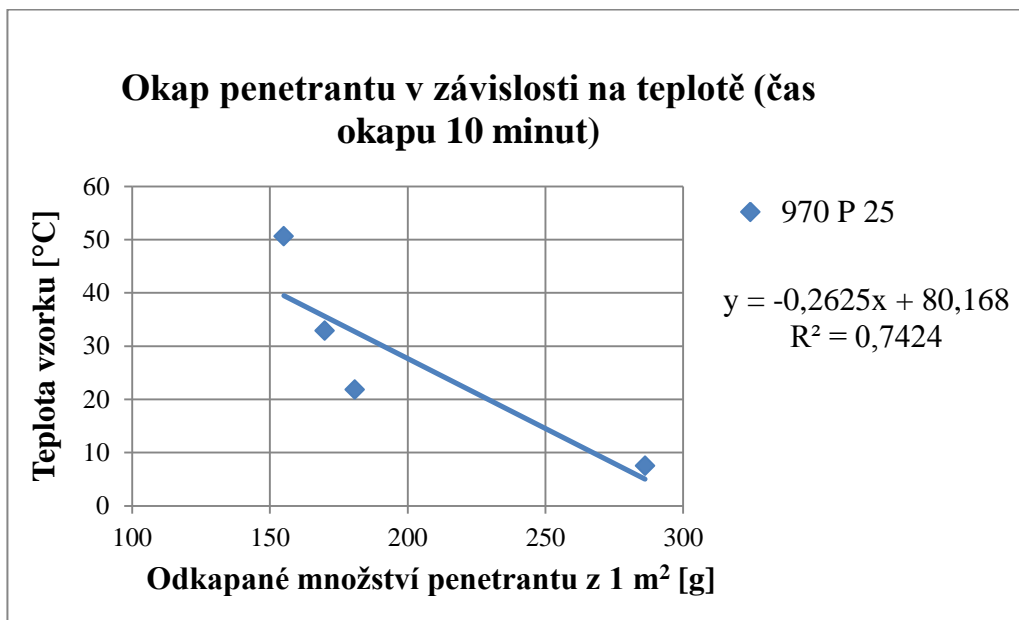
Výnos penetrantu v závislosti na čase je patrný na obr. 2.2 a 5.1.6. V první fázi (interval přibližně 4 minut) okape 90 % penetrantu, v druhé fázi může okapat zbylých možných 9 % a ve třetí fázi okapu se už hodnota nebude výrazněji měnit.



Obr.5.1.6 Graf závislosti výnosu penetrantu na čase

Celkový okap penetrantu

Výsledek je zobrazen pomocí grafu na obr. 5.1.7, který je charakteristikami podobný výsledkům z grafu na obr. 5.1.2 a potvrzuje vliv teploty na výnos/okap penetrantu.



Obr.5.1.7 Graf závislosti celkového okapu na teplotě

5.1.5 Závěr části experimentů s výnosem/okapem penetrantu

Vliv viskozity na výnos/okap penetrantu byl potvrzen, ale úspora je na hranici akceptovatelnosti, proto by spíše jako vhodné optimalizační řešení mělo být zavedeno elektrostatické nanášení penetrantu. Snížení viskozity penetrantu nesmí být nadměrné, jelikož by na výrobcích byla příliš tenká vrstva penetrantu, která by neumožňovala dostatečnou penetraci nebo by dokonce na povrchu výrobku mohla zasychat. Pro potvrzení, že výnos penetrantu v závislosti na viskozitě je na hranici akceptovatelnosti, uvádím modelový příklad: pokud bude mít kapilární linka výnos penetrantu za rok 1140 litrů na 35 000 m² zkoušené plochy výrobků, přinese snížení viskozity při změně teploty o 10 °C úsporu 1,5 g na 1 m², což je úspora 52,5 kg (59,66 litrů při hustotě penetrantu 0,88 g.ml⁻¹) penetrantu za rok. Cena 1 litru penetrantu je přibližně 500 Kč, tedy 1140 litrů penetrantu bude v ceně 570 000 Kč. Úspora 59,66 litrů penetrantu bude 29 830 Kč, což činí 5,2 % úsporu za rok. Úspora 5,2 % není vysoká, vzhledem k tomu, že kontaminací penetrantu vodou můžeme ztratit více litrů penetrantu než jeho potencionální úsporou. Při elektrostatickém nanášení penetrantu vyvstává však problém nového charakteru - nelze

nanášet penetrant na vodném základu. Penetranty Ardrex 970 P 25, 920 A a 9721, na kterých byly prováděny experimentální měření, mají však vodný základ. Proto i přes ne zcela výrazné výsledky sníženého výnosu při změně viskozity je to jediná možnost optimalizace výnosu u tohoto druhu penetrantu.

Výsledky zjištěné tímto experimentálním měřením na konkrétním vzorku a převedením na 1 m² budou platit pouze pro tento druh vzorku/výrobku, jelikož měření bylo prováděno za jistých počátečních podmínek (teplota, vlhkost, druh penetrantu, vodivost materiálu vzorku, materiál vzorku, teplota okolního prostředí apod.). Největší vliv na výnos/okap má tvarová složitost vzorku (prohlubně a hrany - kde mohou zůstat kapky či „loužičky“ penetrantu).

Existují dvě možnosti snížení výnosu penetrantu změnou viskozity:

- a) Ohřevem výrobků vstupujících do procesu kapilární linky,
- b) udržováním zvýšené teploty penetrantu.

V praxi se používá druhá možnost, jelikož je snáze technologicky proveditelná. Velkou otázkou ale zůstává, zda jsou obě metody rovnocenné. Pokud má výrobek teplotu okolí 20 °C a ponoří se do penetrantu o teplotě 30 °C, je pravděpodobné, že je ulpěná vrstva penetrantu na povrchu rychle zchlazena a tedy nepřispěje k vyššímu okapání.

Snížení výnosu penetrantu vlivem viskozity nemá opodstatnění při zkoušení několika málo výrobků, ale u velkosériových kapilárních linek by to mělo přineslo pozitivní výsledky nejen v nákladech za penetrant, ale i v nižším zatížení vodního odpadního hospodářství. Nižší výnos penetrantu znamená jeho tenčí vrstvu na povrchu výrobku, tedy nižší náklady na penetrant a další výhody v podobě:

- a) Snazšího a dokonalejšího opláchnutí přebytečného penetrantu,
- b) nižší zatížení vodního odpadového hospodářství,
- c) rychlejší pronikání penetrantu do vad.

Od nákladů uspořené nižším výnosem penetrantu se musí odečíst dvě položky - náklady na energii při udržování zvýšené teploty penetrantu či výrobku a jeho eventuální vypařování.

5.2 Vliv teploty a typu penetrantu na smývateľnosť

Smývateľnosť penetrantu souvisí s viskozitou, tedy výnosem penetrantu. Pokud bude na povrchu menší vrstva penetrantu, půjde i lépe odstranit. Čím bude penetrant citlivější, tím hůře se bude z povrchu odstraňovat. Proto se pro zkoušení odlitků nehodí (nepoužívají) vyšší citlivosti, jelikož odstranění přebytečného penetrantu z povrchu není dostatečné a vzniká tak ohromné pozadí při inspekci.

5.3 Experimenty pro návrh parametrů kapilární linky

Pro návrh kapilární linky je zapotřebí ověření konkrétních parametrů na vzorcích výrobků od zadavatele, které budou zkoušeny. Kromě již zmíněných experimentů týkajících se výnosu v závislosti na teplotě a čase a vlivu teploty na smývateľnosť to jsou především také citlivost zkušebního systému a výkon sušičky.

5.3.1 Citlivost zkušebního systému

Citlivost se ověřuje na měrkách (typ I a II, hliníková měrka) a reprezentativních vzorcích od zadavatele, které obsahují hraničně přípustné a hlavně kriticky nepřípustné vady. Citlivost se ověřuje na zkušebních systémech změnou hlavních parametrů kapilární zkoušky jako je penetrační čas, vyvíjecí čas, čas sušení a délka oplachu. Vyhodnocení se provádí vzájemným porovnáním různých penetrantů.

Optimalizace expozičních časů (penetrace a vyvíjení) byly prováděny pro penetrant Ardrex 9721 (citlivost 1,5) na součástech zavěšení automobilového kola. Pomocí hliníkové měrky byla srovnána citlivost penetrantu Ardrex 9721 s 920 A, který má nejvyšší citlivost (0,5), viz. příloha 7.

Na měrce typ I byla provedena zkouška citlivosti při změně expozičních časů penetrace a vyvíjení penetrantu 9721, viz. příloha 8 a 9.

Na obr. 5.3.1 a 5.3.2 je srovnání expozičního času penetrace při 10 a 6 minutách na reálném výrobku.

Doporučené časy penetrace pro druh a zpracování materiálu jsou uvedeny v tab. 3.7.1, z vyhodnocení citlivosti na měrkách a reálných součástech lze expoziční časy zkrátit na 6

minut. Z důvodu nepředvídatelných událostí se expoziční časy krátí pouze o 2 minuty, tedy na čas penetrace/vyvíjení 8 minut.



*Obr. 5.3.1 Indikace po 10 minutách penetrace Ardroxu 9721 a 6 minutách vyvíjení
[Fotoarchiv ATG s.r.o.]*

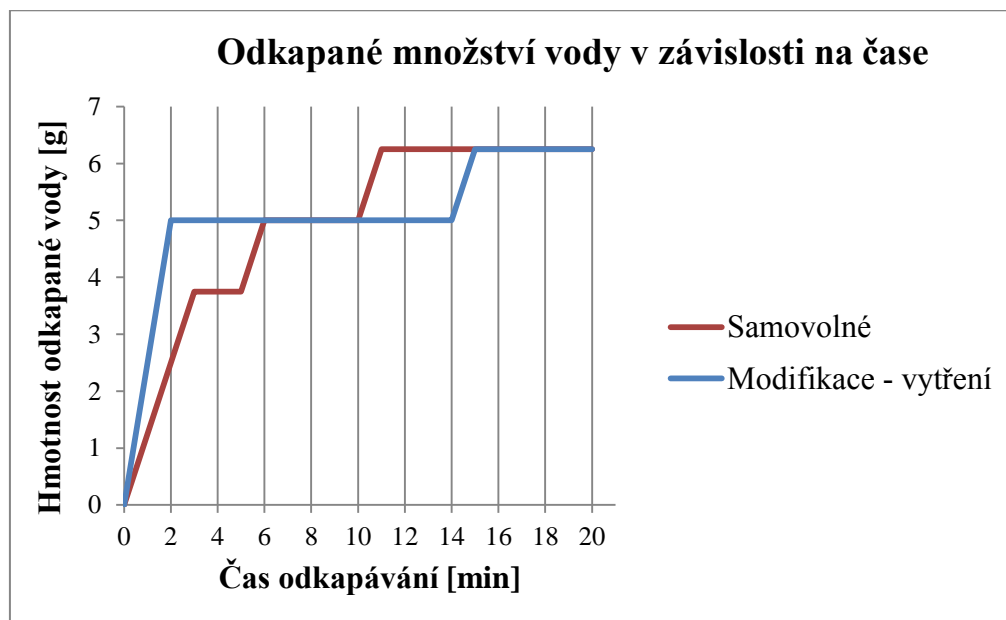


*Obr. 5.3.2 Indikace po 6 minutách penetrace Ardroxu 9721 a 6 minutách vyvíjení
[Fotoarchiv ATG s.r.o.]*

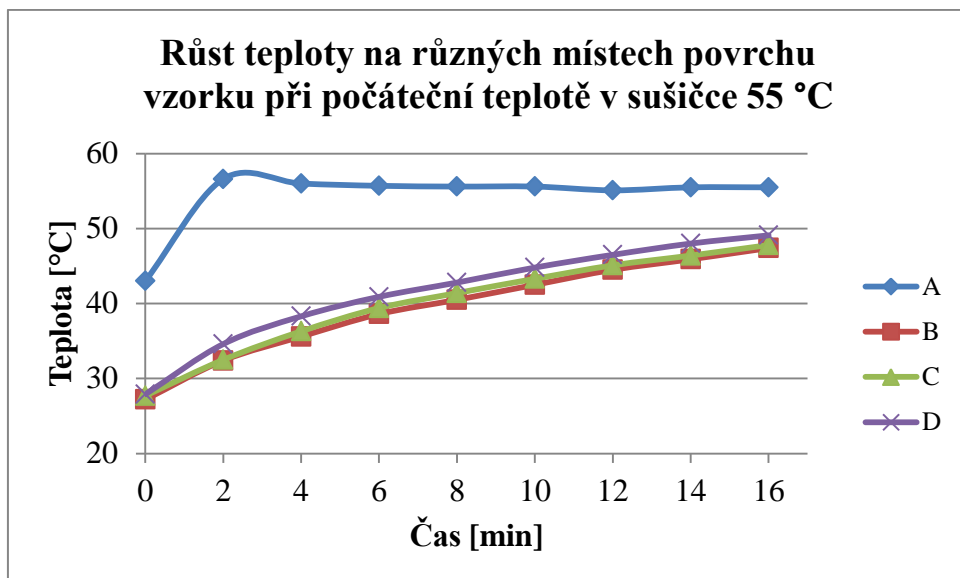
5.3.2 Výkon sušičky

Pomocí experimentu suchý/mokrý díl v závislosti na čase se na vzorku v sušičce musí zjistit problémová místa, kde by eventuálně mohly zůstat kapky penetrantu, vody, emulgátoru či vodné vývojky. Pokud budou experimentem zjištěna taková místa, musí být eliminována např. vhodnými vzduchovými tryskami, přičemž nesmí dojít k rozkmitání zkoušených výrobků, jelikož tím je vzduchové vyfouknutí kapek vody neúčinné.

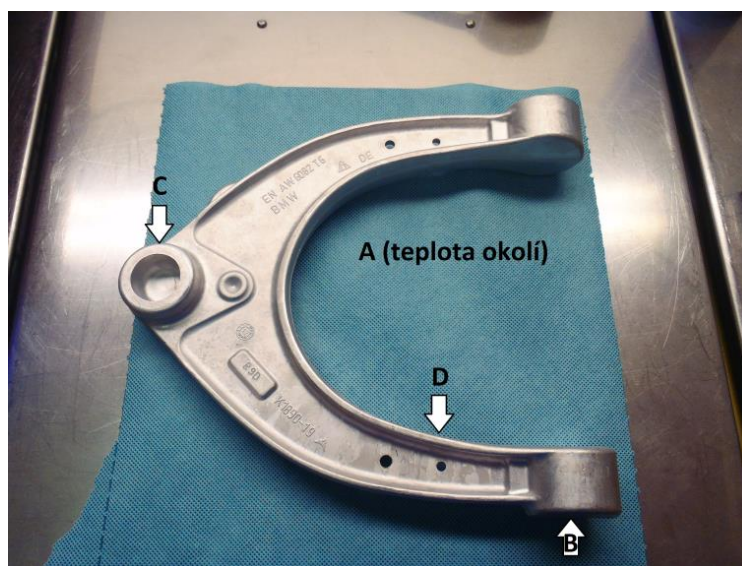
Pro návrh výkonu nebo délky sušícího boxu se vychází z výnosu vody (obr. 5.3.3) a z průběhu stoupaní teploty na povrchu vzorku po umístění do sušičky při různých prvotních teplotách v sušičce (50, 55 a 60 °C). Na obr. 5.3.4 je jeden z těchto naměřených průběhů při počáteční teplotě v sušičce 55 °C. Rozmístění termočlánkových čidel na vzorku je na obr. 5.3.5.



Obr. 5.3.3 Okap vody v závislosti na čase



Obr. 5.3.4 Růst teploty na povrchu vzorku



Obr. 5.3.5 Umístění termočláňkových čidel na povrchu vzorku [Foto autor]

5.4 Shrnutí citlivosti

K ověření doby penetrace na citlivost při zjišťování vad může posloužit hliníková měrka. Na její strany je aplikován v posunutých časových intervalech penetrant tak, že rozdíl při konečném vizuálním ověření mezi jednotlivými stranami měrky je např. 2, 4 či x minut penetrace. Výsledkem tohoto ověřovacího pokusu je zhodnocení vlivu doby penetrace na zjistitelnost vad.

Pomocí strany A a B hliníkové měrky lze též vzájemně posuzovat různé penetranty v rozdílných prodlevách na penetraci.

Pomocí hliníkové měrky lze tedy porovnávat celý postup zkušebního systému, kdy se můžou měnit procesní časy, způsoby aplikací kapilárních prostředků, způsoby oplachu a různé penetranty proti sobě tak, aby byla zaručena citlivost na zjišťování trhlin v optimalizovaných časech.

6 Návrh systému pro vodou smytný penetrant a suchou vývojku pro velkokapacitní PT linky v automobilovém průmyslu

Současným trendem při návrhu a výrobě kapilárních linek pro AP je snaha upřednostňovat zkušební systémy bez vodné vývojky, jelikož je tento zkušební systém náchylný na vymytí vady vodnou vývojkou. Proto je snaha nahrazovat v kapilárních linkách vodnou za suchou práškovou vývojku nanášenou ve vířivé komoře nebo lépe elektrostatickým naprašováním.

Návrh systému způsobu čištění odpadové oplachové vody bude ověřen ekonomickou analýzou návratnosti záměny UF za AC. Poklady pro analýzu jsou použity ze zatím jediného ultrafiltračního systému k čištění oplachových vod kapilární linky v ČR. Nedostupné informace z tohoto provozu jsou nahrazeny předpokládanými výpočtovými hodnotami.

6.1 Návrh kapilární linky

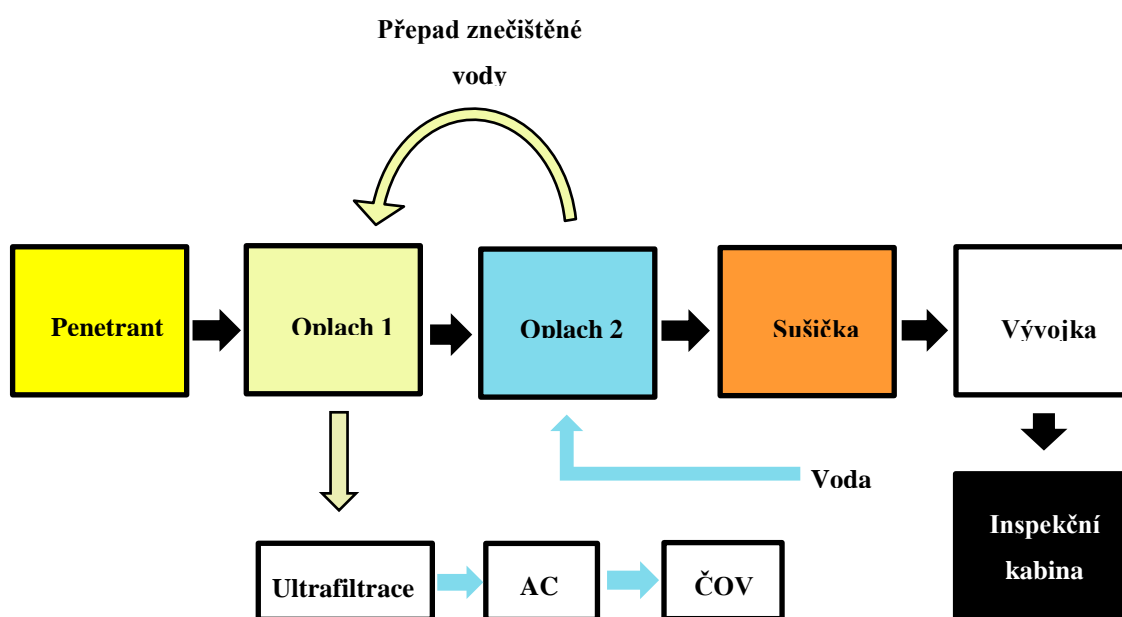
Návrh kapilární linky je na principu vanové linky s citlivostí 1,5 při použití penetrantu Ardrox 9721, kde schéma je znázorněné na obr. 6.1. Skládá se ze 3 van (penetrační, oplach 1 a 2), sušičky, naprašovací komory a inspekční kabiny.

Oplach přebytečného penetrantu bude pomocí dvoufázového ponoru z důvodu uvedeného v kapitole 3.8. Okruh oplachu bude na principu otevřeného okruhu, jelikož uzavřený okruh by přinášel více problémů (viz. kapitola 4.2 a 4.2.1). Hlavním nedostatkem v uzavřeném okruhu by mohlo být vzrůstající zbarvení vody fluorescenčním barvivem, kterým se snižuje kontrast indikace na povrchu zkoušeného výrobku (tento problém je doménou především u post-emulgačních penetrantů). Řešení zbarvení vody pro uzavřený okruh s UF by v budoucnu mohlo poskytnout fotokatalytické čištění (kapitola 4.3.6), které v tomto stadiu vývoje bohužel zatím neodstraňuje kontaminační látky penetrantu, ale při degradaci fluorescenčního barviva se jisté výsledky dosáhly.

Čištění odpadové oplachové vody bude na principu ultrafiltrace, kdy investice do tohoto systému by měla být podle kapitoly 6.7 zaplácena už po druhém roce užívání.

Před penetrační vanou, kde jsou výrobky rozvěšeny na ponořovací koše, by podle zjištěné závislosti viskozity na vynesení penetrantu měl být ohřívací box s nastavenou maximální teplotou 40 °C. Tímto řešením by docházelo k ohřívání výrobků před aplikací penetrantu. Teplota penetrantu ve vaně by zůstala shodná s teplotou okolí, aby nedocházelo k vypařování penetrantu.

Takt navržené kapilární linky bude 8 minut, tento interval je podložen experimenty s expozičními časy v kapitole 5.3.1. Čas ponoru (penetrace) bude 20 sekund a zbývající čas bude připadat na čas okapu. Oplach 1 a 2 pomocí ponoru do vany s probubláváním bude nastaven na 20 sekund s následným okapem nad hladinou. Po oplachu bude následovat stanoviště sušicího boxu s nastavenou optimální teplotou pro osušení povrchu výrobku. Předposledním stanovištěm kapilární linky bude naprašovací box pro suchou vývojku a posledním stanovištěm bude parkoviště před inspekční kabinou, kde proběhne čas vyvíjení.



Obr. 6.1 Schéma zkušebního systému IAa s čišťením oplachové vody ultrafiltrací

6.2 Ekonomické srovnání AC x UF

Srovnání těchto dvou způsobů čištění provedeme pomocí ekonomické analýzy, která by měla stanovit návratnost investice do modernizace zařízení zavedením ultrafiltračního zařízení místo zásobníku s aktivním uhlím.

Postup ověření je následující:

- a) Výpočet spotřeby penetrantu,
- b) výpočet spotřeby AC,
- c) náklady na pořízení a provoz UF,
- d) porovnání ročních kumulativních nákladů a stanovení návratnosti UF.

Tento modelový příklad je postaven na reálných informacích ze zatím jediného provozu ultrafiltrace v ČR. Spotřeba penetrantu byla vypočítána na hodnotu odpovídající spotřebě penetrantu na kapilární lince, kde je v činnosti UF. Vstupní informace bohužel nemají komplexní charakter a některé nákladové položky musely být dopočítány.

6.3 Výpočet spotřeby penetrantu

Pro navržení systému čištění oplachové odpadové vody potřebujeme znát spotřebu penetrantu za rok, v praxi vycházíme z těchto situací:

- a) Spotřebu penetrantu známe z předešlých roků, ale neznáme plochu ani počet zkoušených dílů,
- b) známe plánovaný počet zkoušených m^2 nebo počet dílů a potřebujeme znát teoretickou hodnotu spotřeby penetrantu.

V praxi jsou k dispozici většinou informace charakteru v bodě a), v některých případech ani tyto informace nejsou dohledatelné.

Pokud budeme začínat od nuly a pokusíme se postupovat podle bodu b), musíme odečíst tuto hodnotu z grafu výnosu penetrantu zkoušeného výrobku. Použijeme hodnotu výnosu při předpokládané teplotě z grafu na obr. 5.1.2, odečteme předpokládaný výnos a vynásobením předpokládaných zkoušených m^2 získáme hodnotu spotřeby penetrantu. Budeme uvažovat, že kapilární linka pracuje při ustálené teplotě jak penetrantu, tak i výrobků a okolního prostředí o teplotě mezi 20 - 25 °C. Z těchto hodnot teploty povrchu vycházejí 3 hodnoty výnosu penetrantu, které pro tento výpočet zprůměrujeme na hodnotu 14,5 g. Takto nízká hodnota, i když je zaokrouhlená pouze z krátkého intervalu a na základě pouze tří hodnot, není v reálném provozu možná.

Hodnoty z grafu na obr. 5.1.2 byly naměřeny v ideálním stavu, vzorky byly uchyceny pomocí vázacího drátu, který má zanedbatelnou plochu oproti reálným ponořovacím

košům a závěsům (obr. 6.2.1). Zvolené optimální zavěšení u daného vzorku by v reálném provozu bylo nemožné nebo přinejmenším velmi složité. Design upevňovacího závěsu pro pohyb výrobků v kapilární lince by měl mít co nejmenší kontaktní plochu, aby nedošlo k překrytí indikace závěsem a tedy k znemožnění penetrace. Experimentálně zjištěné hodnoty výnosu byly prováděny na stále stejném vzorku. Při provozu kapilární linky je vysoká rozmanitost počtů a tvarů zkoušených výrobků, tím se může navýšit celkový výnos penetrantu. V provozu může dojít k neočekávaným ztrátám, kdy obsluha položí výrobek tak nešťastně, že např. z turbínové lopatky vznikne mistička a bude vyneseno mnohem více penetrantu. Důvodem vynucené výměny penetrantu v kapilární lince může být nadlimitní obsah vody v tomto kapilárním prostředí. Z těchto jmenovaných důvodů musí být hodnota výnosu penetrantu na povrchu 1 m^2 násobena opravným koeficientem $k = 2$.



Obr. 6.3.1 Design ponorného koše pro hromadné zkoušení v automatické kapilární lince [23]

Objem penetrantu můžeme vypočítat pomocí známé hustoty penetrantu 970 P 25 ($\rho = 0,89 \text{ g}\cdot\text{ml}^{-1}$) při 20 °C a hmotnosti uvažovaného vneseného penetrantu na 1 m² ($m = 29 \text{ g}$), objem tedy činí $V = 0,03258$ litrů na 1 m².

Předpokládaný počet odzkoušených m² v kapilární lince za rok bude 35 000 m². Při počtu 250 pracovních dní bude denně odzkoušeno 140 m² a pokud bude mít 1 zkoušený výrobek plochu 0,087 m², bude možné denně podrobit inspekci přibližně 1610 výrobků.

Spotřeba penetrantu během 1 roku pro vyzkoušení výrobků o ploše 35000 m² bude přibližně 1140 litrů.

6.4 Výpočet spotřeby AC

Z protokolů vypracovaných pro firmu ATG s.r.o. vyplývá, že na likvidaci 1 litru penetrantu 970 P 25 je zapotřebí 5 kg AC (Silcarbon SC40 Extra). Z důvodů uvedených v kapitole 4 „Adsorpce povrchově aktivních látek uhlím“ je záhodno používat dva druhy AC, jeden druh k odstraňování povrchově aktivních látek (PAL) a druhý k odbarvování barviv používaných u fluorescenčních penetrantů. Tyto vlastnosti jednotlivých AC musí být prokázány na konkrétním druhu penetrantu.

Cena AC se pohybuje okolo 100 Kč za 1 kg. Pro výpočet množství AC v koloně budeme počítat s jednotnou cenou obou druhů AC. Při spotřebě 1140 litrů penetrantu bude na celý rok zapotřebí 5 700 kg AC v ceně 570 000 Kč. Toto číslo není konečné, jelikož se podle druhu vodního okruhu musí připočítat spotřeba vody, popř. bakteriální ošetření vody v okruhu nebo ozonizace napouštěné vody do uzavřeného okruhu, likvidace AC aj.

6.5 Pořizovací finanční náročnost ultrafiltrace

Cena jedné ultrafiltrační membrány by se měla pohybovat okolo 15 000 Kč, pro průtok 250 l·h⁻¹ až 500 l·h⁻¹ přes systém ultrafiltrace bude zapotřebí 21 membrán v celkové ceně 315 000 Kč. Celková cena ultrafiltračního zařízení skládajícího se z pracovního zásobníku, filtračních tubusů, čerpadel a dalšího zařízení bude přibližně 600 000 Kč.

6.6 Celková cena provozu ultrafiltrace

I když je k čištění odpadní vody používána ultrafiltrace, musí být posledním výstupním stupněm kolona s AC, která plní dodatečnou odbarvovací funkci. Velkým nedostatkem u UF se jeví procházení fluorescenčního barviva přes keramické membrány (především při použití post-emulgačních zkušebních systémů). Dodatečná kolona bude mít spotřebu AC přibližně 25 kg za 1 měsíc, tedy 300 kg za rok v ceně 30 000 Kč.

K ceně ultrafiltrace a AC se musí též připočítat cena spotřebované vody a ekologická likvidace koncentráту, který neprojde přes ultrafiltrační membrány a zahušťuje se na dně pracovního zásobníku. Cenu vody za m³ pro dokreslení výpočtu zahrneme v ceně 60 Kč, při spotřebě vody v objemu 715 m³ bude celková cena 42 900 Kč. Ekologická likvidace 1600 litrů koncentráту za rok je neznámá, do výpočtu celkové ceny připočteme 40 000 Kč. Významnou položkou u ultrafiltrace je spotřeba energie, jelikož se jedná o tlakově hnaný proces. Pro čerpadlo bude zapotřebí elektromotor o výkonu 3 kW, při ceně 4 Kč za jednu kWh a celodenním provozu 250 pracovních dní v roce bude celková suma za elektrickou energii 72 000 Kč ročně.

Ultrafiltrační zařízení musí být každý týden nebo při poklesu pod požadovaný průtok čištěno speciálním čisticím přípravkem, jehož cena za rok činí 10 400 Kč. Celkový náklad na provoz čištění s ultrafiltrací v prvním roce po zavedení bude činit 795 300 Kč.

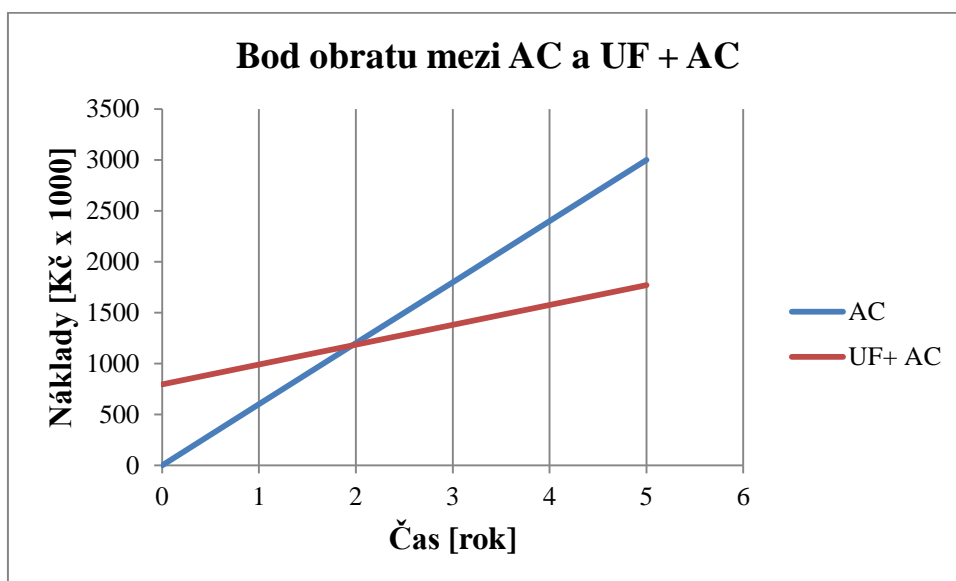
6.7 Shrnutí nákladů v porovnání AC x UF

Jelikož se snažíme prokázat výhodnost/nevýhodnost nahrazení AC ultrafiltrací, zanedbáváme pořizovací cenu kolony s AC a přepokládáme, že cena likvidace kontaminovaného AC je zahrnuta v nákupu nového od dodavatele. Rozepsané nákladové hodnoty porovnání AC a UF + AC jsou shrnuty v tab. 6.7.1.

	Jednotka	AC	UF
Počáteční investice do zařízení	Kč	0	600000
Spotřeba AC	Kč/rok	570000	20000
Spotřeba vody	Kč/rok	30000	42900
Náklady na energii	Kč/rok	0	72000
Náklady na údržbu, opravy a náhradní díly	Kč/rok	0	10000
Likvidace odpadu (koncentrát u UF)	Kč/rok	0	40000
Čistící prostředky	Kč/rok	0	10400
Celkem provozní náklady	Kč/rok	600000	795300

Tab. 6.7.1 Finanční náročnost v prvním roce zavedení ultrafiltrace oproti zaběhnutému systému čištění s AC

Na obr. 6.7.1 je grafické vyjádření nákladů za jednotlivé způsoby čištění odpadní vody během pětiletého období. Z grafu vyplývá, že návratnost investice do UF + AC je již po druhém roce používání. Po pěti letech provozu při stejném objemu zkoušení je potenciální úspora nákladů přibližně 1 200 000 Kč.



Obr. 6.7.1 Bod obratu mezi AC a UF + AC

Tento ověřovací výpočet nákladů je bohužel zatížen neznámou chybou a předpokládá tyto zjednodušení:

- a) Každý rok je spotřeba a cena nákladových položek stejná (penetrantu, AC a aj),
- b) na jedné kapilární lince nemohly být srovnány dva způsoby čištění (odlišné penetranty, počet výrobků, objem odpadní vody aj.),
- c) ověření UF x AC je založeno na cenové kalkulaci,
- d) čištění vody pomocí AC (nebo UF) fungovalo v daném období na 100 %.

7 Závěr

Cílem této práce je optimalizace kapilární linky pro zkoušení výrobků v automobilovém průmyslu (AP), současnými oblastmi pro řešení jsou vodní hospodářství a expoziční časy kapilárních prostředků. Pro plnohodnotné splnění cílů optimalizace bylo nutné splnit následující požadavky:

- Snížení výnosu penetrantu do oplachové vody,
- zachování požadované citlivosti zkušebního systému,
- zvýšení nebo alespoň zachování kapacity kapilární linky,
- navržení (ověření) výhodnějšího způsobu čištění odpadové oplachové vody.

Možnost dosažení snížení výnosu byla nalezena ve dvou možných oblastech: změnou způsobu aplikace penetrantu (záměna ponořování za elektrostatický nástřik) a ve změně jeho viskozity. Ověření sníženého výnosu v závislosti na teplotě (viskozitě) lze provést pomocí dvou způsobů:

- Ohřevem penetrantu,
- ohřevem výrobků před aplikací penetrantu.

Na reálných kapilárních linkách se používá první možnost, důvodem je technologická jednoduchost udržování ohřátého penetrantu, i když o dosažení snížení výnosu penetrantu při použití této metody lze pochybovat. Uplatnění druhé možnosti by bylo reálné u kapilárních linek s předčištěním výrobků, protože součástí této procedury je dokonalé vysušení prováděné v sušičce za zvýšené teploty. Pro experimentální ověření závislosti byla zvolena druhá možnost, tedy ohřev výrobků před aplikací penetrantu. Důvodem je naakumulované teplo ve vzorku, které je předáváno vrstvě penetrantu na povrchu vzorku v průběhu okapávání a snižuje jeho viskozitu, tedy přispívá k dokonalejšímu okapávání v celém čase okapu.

Experimenty byla prokázána možnost snížení výnosu penetrantu změnou jeho teploty (viskozity). Experimenty proběhly za přesně definovaných podmínek, kdy cílem bylo prokázání vlivu viskozity na výnos penetrantu. Výsledky výnosu penetrantu mohou pro odlišné vstupní podmínky nabývat různých hodnot. Změna viskozity při přechodu z 20 na 30 °C přinesla úsporu přibližně 1,5 g penetrantu na 1 m², což je přibližně 9 % penetrantu

na 1 m². Z toho vyplývá, že změna viskozity penetrantu není tím správným optimalizačním řešením, je nutné ale dodat, že zvýšení teploty penetrantu přináší také výhody uvedené v kapitole 5.1.5).

Vliv viskozity na výnos/okap penetrantu byl potvrzen, ale úspora je na hranici akceptovatelnosti, proto by spíše jako vhodné optimalizační řešení mělo být zavedeno elektrostatické nanášení penetrantu. Při elektrostatickém nanášení penetrantu vzniká nový problém - nelze nanášet penetrant na vodném základu. Penetranty Ardrex 970 P 25, 920 A a 9721, na kterých byly prováděny experimentální měření, mají však vodný základ. Proto i přes ne zcela výrazné výsledky sníženého výnosu při změně viskozity je to jediná možnost optimalizace výnosu u tohoto druhu penetrantu.

Expoziční časy kapilárních prostředků mají v automobilovém průmyslu charakter doporučených časů, oproti striktně daným časům v leteckém průmyslu. Expoziční časy byly optimalizovány pouze do stavu, kdy nedošlo ke změně citlivosti nebo negativního ovlivnění vodního hospodářství. Expoziční časy (penetrace a vyvíjení) byly po provedení zkoušek na měrkách (typ I a hliníkové měrce) stanoveny na 8 minut, místo normou doporučených 10 minut.

AC lze hodnotit jako vhodný způsob čištění odpadové vody kapilárních linek, ale pro správnou funkci je ho potřeba velké množství. Princip funkce čištění na AC je založen na adsorpci, která je schopna zachytit i fluorescenční barvivo, což znamená spotřebu samotného adsorpčního media. Optimalizace vodního hospodářství kapilárních linek při nahrazení AC modulem UF byla ověřena pomocí finanční návratnosti záměny. Při zadaných vstupních podmínkách modelového příkladu zakládajících se na skutečných hodnotách z ultrafiltračního zařízení vycházela návratnost UF nad AC už po druhém roce používání (přičemž spotřeba penetrantu za rok byla totožná, viz. kapitola 6.7).

Ultrafiltrace je novou a neověřenou technologií čištění odpadní oplachové vody kapilárních linek, proto zde převažují obavy z jejího uplatnění a firmy dávají v lepším případě přednost AC před prostým zředěním penetrantu vodou.

Optimalizace změnou viskozity by měla být zavedena při výrobě nových i při optimalizaci už zavedených kapilárních linek, kde je používán penetrant na vodném základu. U kapilárních linek, kde bude aplikován penetrant na olejovém základu, bude jako výhodnější optimalizační řešení elektrostatický nástřik místo změny viskozity penetrantu.

U velkosériových kapilárních linek by mělo být doporučováno čištění pomocí UF nad stále dominujícím čištěním AC.

Na tuto diplomovou práci by měly navazovat další experimenty pro prokázání vlivu viskozity na elektrostatický nástřik penetrantu - zda je tento vliv tak znatelný jako při aplikaci penetrantu ponořováním. Další výstupem by mohlo být vzájemné porovnání UF a AC a to nejenom pomocí finančních nákladů.

8 Seznam použité literatury

- [1] ČSN EN 571-1. Nedestruktivní zkoušení - Kapilární zkouška - Část 1: Obecné zásady. Praha: Český normalizační institut, 1998. 15 s. Třídící znak 01 5017.
- [2] KOPEC, B. et. al. Nedestruktivní zkoušení materiálů a konstrukcí: Nauka o materiálu 4. Brno: CERM, 2008. 572 s. ISBN 978-8-7204-591-4.
- [3] Povrchové napětí [online]. [cit. 2014-2-15]. Dostupné z:
<http://fyzika.jreichl.com/main/article/view/641-povrchove-napeti>
- [4] MIKULČÁK, J. et. al. Matematické, fyzikální a chemické tabulky pro střední školy. 3. vydání. Praha: Prometheus, 2003. ISBN 80-85849-84-4.
- [5] MAŘÁNEK, P. PT - Kapilární metoda: Level 1 +2. Praha: ATG s.r.o., 2013. 100 s.
- [6] ČSN EN ISO 3452 - 4. Nedestruktivní zkoušení - Kapilární zkouška - Část 4: Vybavení. Český normalizační institut, 1999. 12 s. Třídící znak 01 5019.
- [7] HELLIER, Charles J. Handbook of nondestructive evaluation. New York: McGraw-Hill, 2001. 594 s. ISBN 0-07-028121-1.
- [8] ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section V, Art. 6, Liquid Penetrant Examination. The American Society of Mechanical Engineers. 2010. 664 s. Třídící znak 56 3934.
- [9] ČSN EN ISO 3452 - 3. Nedestruktivní zkoušení - Nedestruktivní zkoušení - Kapilární zkouška - Část 3: Kontrolní měřky. Český normalizační institut, 1999. 12 s. Třídící znak 01 5018.
- [10] TRACY, Noel A. MOORE, Patrick O. Liquid Penetrant Testing: Nondestructive Testing Handbook, 2. 3rd ed. ASTN, 1999. 493 s. ISBN 1571170286.
- [11] ŽDIMERA, Z. Cestovní zpráva: Čištění oplachových vod v kapilárních linkách ultrafiltrací a návrh systému čištění (Ekol s.r.o). Praha: ATG s.r.o., 2008. 3 s.
- [12] KOPECKÝ, J. Návrh vhodného aktivního uhlí ve vodárenství [online]. [cit. 2013-10-20]. Dostupné z: <http://www.smv.cz/res/data/014/001680.pdf>
- [13] Waste-water treatment and Penetrant Testing [online]. Vystaveno 6. 2011 [cit. 2013-5-7]. Dostupné z: <http://www.ressuage-magnetoscopie-penetranttesting-magnetictesting-dpc.info/site/en/news/pt-texts/185-traitement-des-eaux-usees-et-ressuage>

- [14] Regenerace aktivního uhlí [online]. [cit. 2013-10-19]. Dostupné z: http://www.metla.cz/Regenerace_AU_techicke_udaje_7.pdf
- [15] Reaktivace aktivního uhlí, servisní zabezpečení, likvidace filtrů [online]. [cit. 2013-10-20]. Dostupné z: <http://www.ksklimaservice.cz/cz/reaktivace-aktivniho-uhli-servisni-zabezpeceni-likvidace-filtru>
- [16] Technologie úpravy vody [online]. [cit. 2013-10-12]. Dostupné z: <http://www.aquacon.cz/Technologie-vody/#chemickaregulace>
- [17] BINDZAR, J. et. al. Základy úpravy a čištění vod. Praha: VŠCHT, 2009. 251 s. ISBN 978-80-7080-729-3.
- [18] Protokol o zkoušce: Ověření možností koagulačního čištění odpadních vod s obsahem přípravku Ardrex 920A. Praha: Techneco Praha s.r.o., 2008. 4 s.
- [19] Membránové procesy [online]. [cit. 2013-10-20]. Dostupné z: <http://www.vscht.cz/uchi/ped/chi/chi.ii.text.k27.membranove.procesy.pdf>
- [20] HÜBNER, P. et. al. Úprava vody pro průmyslové účely. Praha: VŠCHT, 2006. 132 s. ISBN 80-7080-624-9.
- [21] ZLÁMAL, M. - BAUDYS, M. - MOULIS, F. - KRÝSA, J. Výzkumná zpráva pro ATG shrnující experimenty za období 2010 a 2011: Fotokatalytické čištění oplachové vody z kapilární linky obsahující přípravek Ardrex 970 P 23. Praha: VŠCHT, 2011. 7 s.
- [22] Legislativa a dezinfekce odpadních vod [online]. [cit. 2013-10-12]. Dostupné z: <http://www.asio.cz/cz/123.legislativa-a-dezinfekce-odpadnich-vod>
- [23] VETTERLEIN, T. et. al. Automated dye penetrant systems with process control and documentation in the aerospace industry [online]. Vystaveno 9.2005 [cit. 2014-3-4]. Dostupné z: http://www.ndt.net/article/insight/papers/insi_48_3_171.pdf
- [24] Lamborghini Aventador - zuřivý býk s vizáží dravce [online]. [cit. 2014-3-9]. Dostupné z: http://www.driversweb.cz/clanky/Novinky/Lamborghini_Aventador_zurivy_byk_s_vizazi_dravce
- [25] CHEMIN, P., DUBOSC, P. Penetrant Testing History [online]. Vystaveno 6. 2008 [cit. 2013-10-29]. Dostupné z: <http://www.ressuage-magnetoscopie-penetranttesting-magnetictesting-dpc.info/site/en/news/pt-texts/179-historique-du-ressuage>

Seznam obrázků

Obr. 2.2 Graf výnosu penetrantu v závislosti na čas

Obr. 3.1 Sestava zavěšení předního kola [24]

Obr. 3.7.1 Aplikace penetrantu kombinací ponoru a štětce [Foto autor]

Obr. 3.9.1 Nanesené vrstva vývojky sprejem [Foto autor]

Obr. 3.12.1 Rozměr vad na měrce typy II [8]

Obr. 3.12.2 Hliníková měrka - na straně A je aplikován penetrant [Foto autor]

Obr. 4.3.3 Absorbční spektrum degradace Ardrex pomocí P 25 [21]

Obr. 4.6.1 Loužička penetrantu ve tvarové složitosti výrobku [Foto autor]

Obr.5.1.1 Zachytávání penetrantu pro ověření jeho celkového výnosu [Foto autor]

Obr. 5.1.2 Graf výnosu penetrantu v závislosti na viskozitě (970 P 25, ponor 1 sekundu)

Obr. 5.1.3 Závislost výnosu na viskozitě u Ardrexu 970 P 25

Obr. 5.1.4 Porovnání penetrantů o různé citlivosti

Obr. 5.1.5 Porovnání všech penetrantů a různých způsobů jeho aplikace

Obr.5.1.6 Graf závislosti výnosu penetrantu na čase

Obr.5.1.7 Graf závislosti celkového okapu na teplotě

Obr.5.3.1 Indikace po 10 minutách penetrace Ardrexu 9721 a 6 minutách vyvíjení [Fotoarchiv ATG s.r.o.]

Obr.5.3.2 Indikace po 6 minutách penetrace Ardrexu 9721 a 6 minutách vyvíjení [Fotoarchiv ATG s.r.o.]

Obr. 5.3.3 Okap vody v závislosti na čase

Obr. 5.3.4 Růst teploty na povrchu vzorku

Obr. 5.3.5 Umístění termočláňkových čidel na povrchu vzorku [Foto autor]

Obr. 6.1 Schéma zkušebního systému IAa s čištěním oplachové vody ultrafiltrací

Obr. 6.3.1 Design ponorného koše pro hromadné zkoušení v automatické kapilární lince [23]

Seznam tabulek

Tab. 3.6.1 Zkušební systémy podle normy ČSN EN 571 - 1[1]

Tab. 3.7.1 Tabulka doporučených minimálních časů penetrace a vyvíjení [8]

Tab. 4.3.1 Výsledky koagulačních testů vyjádřené pomocí $CHSK_{C_r}$ u jednotlivých koncentrací. [18]

Tab. 4.3.2 Výsledky sorpčně-koagulačních testů vyjádřené pomocí $CHSK_{C_r}$ u jednotlivých koncentrací [18]

Tab. 5.1.3 Hodnoty výnosu penetrantu pro modelový příklad aplikace ohřevu výrobků pro snížení výnosu penetrantu

Tab. 6.7.1 Finanční náročnost v prvním roce zavedení ultrafiltrace oproti zaběhnutému systému čištění s AC

Použité zkratky

AC - aktivní uhlí

AP - automobilový průmysl

BSK - biologickou spotřebu kyslíku

CFF - křížový tok filtrem

ČOV - čistička odpadních vod

ET - vířivé proudy

HV - zkouška tvrdosti podle Vickerse

CHSK_{Cr} - Chemická spotřeba kyslíku dichromanem draselným

MT - metoda rozptylových toků

MVC - mechanická komprese páry

NDT - nedestruktivní zkoušení materiálů (non-destructive testing)

O₃ - ozón

PAL - povrchově aktivní látky

P-E - post-emulgační penetrant

PT - penetrační zkouška (penetrant testing)

Ra - střední aritmetická úchylka profilu

RO - reverzní osmóza

TiO₂ - oxid titaničitý

TOC - celkový organický uhlík

UF - ultrafiltrace

UT - ultrazvuk

UV - ultrafialové záření

VT - visuální kontrola (Visual testing)