

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
FAKULTA STROJNÍ
KATEDRA MATERIÁLU

Bakalářský studijní program:	Strojírenství
Studijní obor:	Materiály a technologie
Zaměření:	Materiálové inženýrství

HODNOCENÍ PEVNOSTI LEPENÉHO SPOJE

STRENGTH EVALUATION OF A BONDED JOINT

KMT – B - 114

Jan Blecha

Vedoucí práce: Ing. Dora Kroisová, Ph.D.

Konzultant:

Počet stran:	63
Počet tabulek:	13
Počet obrázků:	18
Počet grafů:	18
Počet příloh:	4

Datum 26. 5. 2006

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
FAKULTA STROJNÍ
KATEDRA MATERIÁLU

HÁLKOVA 6, 461 17 LIBEREC

ANOTACE

STUDIJNÍ PROGRAM:	Strojírenství
OBOR:	Materiály a technologie
ZAMĚŘENÍ:	Materiálové inženýrství
AUTOR:	Jan Blecha
TÉMA PRÁCE:	Hodnocení pevnosti lepeného spoje
ČÍSLO PRÁCE:	KMT – B - 114
VEDOUCÍ PRÁCE	Ing. Dora Kroisová, Ph.D.
KONZULTANT:	

Bakalářská práce se zabývá hodnocením pevnosti lepeného spoje a vlivů působících na tuto pevnost - převážně povrchových úprav lepených ploch. Zkoušené vzorky z nelegované oceli 11 373 byly lepeny epoxidovou pryskyřicí ChS Epoxy 371 s tvrdidlem P11 v poměru 100 : 6,5. Pevnost byla zjišťována pomocí zkoušky tahem na zkušebním zařízení FP 100 – Lab Test II.

V teoretické části byly shrnuty základní vlastnosti lepeného spoje a lepidel. V experimentální části byly popsány vzorky, vlastnosti epoxidové pryskyřice a tvrdidla, měřicí metody a výpočty nutné ke zjištění meze pevnosti lepeného spoje. Naměřené a vypočtené hodnoty byly zpracovány do tabulek a grafů.

Klíčová slova: pevnost, lepení oceli, epoxidové lepidlo, povrchová úprava, zkouška tahem.

TECHNICAL UNIVERSITY OF LIBEREC
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
DEPARTMENT OF MATERIAL SCIENCE

HÁLKOVA 6, 461 17 LIBEREC

ANNOTATION

STUDY PROGRAMME:	Mechanical Engineering
STUDY DISCIPLINE:	Materials and Technologies
STUDY DIRECTION:	Material Engineering
AUTHOR:	Jan Blecha
THEMA OF THE WORK:	Strength evaluation of a bonded joint
NUMBER OF THE WORK:	KMT – B - 114
LEADER OF THE WORK:	Ing. Dora Kroisová, Ph.D.
CONSULTER:	

This bachelor work deals with strength evaluation of a bonded joint and its effects affecting this strength, mainly by effect of surface adjustment of bonded areas. The tested samples made of unalloyed steel 11 373 were glued together by epoxy resin ChS Epoxy 371 and curing agent P11 in the ratio of 100 : 6,5. The strength of bonded joint was determined by tensile test on device unit FP 100 – Lab Test II.

The basic characteristics of a bonded joint and glues are summarises in the theoretical part. Samples, characteristics of epoxy resin and curing agent, measuring methods and calculations necessary for determination of a threshold of strength of a bonded point are described in the experimental part. The measured and calculated rates were processed into figures and diagrams.

Keywords: evaluation, glue steel, epoxy glue, surface adjustment, tensile test.

Prohlášení

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

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

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

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

Datum 26. 5. 2006

Podpis

Poděkování

Na prvním místě bych rád chtěl poděkovat svým rodičům za podporu během mého studia na TU v Liberci.

Děkuji všem, kteří se jakýmkoliv způsobem podíleli na vzniku této bakalářské práce. Jmenovitě paní Ing. Doře Kroisové, Ph.D. za odborné vedení při psaní této práce. Dále děkuji panu Milanu Vyvlečkovi za pomoc při provedení zkoušky tahem, panu Ing. Janu Hladíkovi za umožnění opískování vzorků, panu Ing. Aleši Kolouchovi, Ph.D. a panu Ing. Jiřímu Cermanovi za provedení nasnímáný povrchu vzorků na optické profilometru.

Poděkování také patří všem členům Katedry materiálu, kteří mi byli během mého studia vždy ochotni kdykoliv pomoci a poskytnout radu.

OBSAH

1	ÚVOD	10
1.1	Historie lepení	10
2	TEORETICKÁ ČÁST	11
2.1	Technologie lepení	11
2.1.1	Definice lepení	11
2.2	Hlavní přednosti a nedostatky technologie lepení	11
2.2.1	Přednosti	11
2.2.2	Nedostatky	11
2.3	Porovnání lepení s ostatními technologiemi spojování materiálů	12
2.3.1	Srovnání lepení se svařováním a pájením	12
2.3.2	Srovnání lepení s nýtováním a šroubováním	12
2.3.3	Srovnání přeplátovaného lepeného spoje s nýtovanými a bodově svařovanými spoji	12
2.4	Adheze	13
2.5	Koheze	14
2.6	Povrchová úprava před lepením	14
2.7	Vliv drsnosti lepených ploch na pevnost spoje	16
2.8	Čištění a odmašťování lepených ploch	18
2.9	Základní typy poruch lepeného spoje	19
2.10	Slícování lepených dílů	20
2.11	Rozdělení lepidel k lepení konstrukčních materiálů	20
2.11.1	Rozdělení podle způsobu vytváření lepeného spoje	20
2.11.2	Rozdělení podle dodací formy	20
2.11.2.1	Jednosložková lepidla	20

2.11.2.2	Dvousložková a vícesložková lepidla	21
2.11.3	Rozdělení lepidel vytvrzujících se chemickou reakcí	21
2.11.3.1	Rozdělení podle teploty vytvrzovací reakce	21
2.11.3.2	Rozdělení vytvrzovacích reakcí podle typu reakce	21
2.12	Epoxidová lepidla	22
2.12.1	Historie epoxidových lepidel	22
2.12.2	Chemie epoxidových lepidel	23
2.12.3	Způsob přípravy epoxidové pryskyřice	23
2.12.4	Základní vlastnosti epoxidových lepidel	24
2.12.5	Hlavní představitelé epoxidových lepidel vyráběných v ČR a v zahraničí	26
3	EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	26
3.1	Epoxidové lepidlo ChS Epoxy 371	26
3.1.1	Charakteristika	26
3.1.2	Použití	26
3.1.3	Vlastnosti nevytvrzené pryskyřice	27
3.2	Vlastnosti ChS tvrdidla P 11	27
3.2.1	Charakteristika	27
3.2.2	Použití	27
3.3	Vlastnosti kompozice epoxidového lepidla ChS Epoxy 371 s ChS tvrdidlem P 11	27
3.4	Zkušební vzorky	28
3.4.1	Materiál zkušebních vzorků	28
3.4.2	Ocel 11 373	28
3.4.2.1	Použití	28

3.4.2.2	Chemické složení	28
3.4.2.3	Mechanické vlastnosti	29
3.4.2.4	Fyzikální vlastnosti	29
3.4.3	Výkres zkušebních vzorků	29
3.5	Brusný přípravek	29
3.5.1	Výroba brusného přípravku	30
3.5.2	Nákres Výkres brusného přípravku	30
3.6	Výkres upínací tyče	30
3.7	Předběžné očištění lepených ploch zkušebních vzorků	30
3.8	Úprava povrchu lepených ploch zkušebních vzorků	30
3.9	Odmaštění lepených ploch	31
3.10	Příprava lepidla	31
3.10.1	Výpočet množství ChS tvrdidla P 11	31
3.11	Zkouška tahem	32
3.12	Zkušební zařízení	32
3.12.1	Charakteristika zkušebního zařízení	32
3.13	Optický profilometr	33
3.14	Naměřené a vypočtené hodnoty	34
3.14.1	Obsah lepené plochy	34
3.14.2	Mez pevnosti	34
3.14.3	Směrodatná odchylka	35
3.14.4	Vzorky pískované zrny písku o velikosti 0,6 mm	35
3.14.5	Vzorky broušené na sucho brusným papírem o zrnitosti 100	37
3.14.6	Vzorky broušené na sucho brusným papírem o zrnitosti 220	39
3.14.7	Vzorky broušené na sucho brusným papírem o zrnitosti 320	41
3.14.8	Vzorky broušené pod vodou brusným papírem o zrnitosti 100	43

3.14.9	Vzorky broušené pod vodou brusným papírem o zrnitosti 220	45
3.14.10	Vzorky broušené pod vodou brusným papírem o zrnitosti 320	47
3.14.11	Vzorky vystavené čtyřdennímu působení par 10 % roztoku NaCl	50
3.14.12	Vzorky vystavené čtyřdennímu působení par 10 % roztoku NaCl a slepeno epoxidovou pryskyřicí ChS Epoxy 371 s přídavkem 1 g Fe ₂ O ₃ na 10 g ChS Epoxy 371	51
4	HODNOCENÍ A DISKUSE VÝSLEDKŮ	54
5	ZÁVĚR	56
6	POUŽITÁ LITERATURA	57
7	SEZNAM PŘÍLOH	58

1 ÚVOD

1.1 Historie lepení

V době kamenné se používalo březové smoly při výrobě věder z březové kůry, k lepení hrotů šípů a harpun apod. Smola se zpracovávala zahřátým klínem na způsob dnešního pájení. Už staří Egypťané znali výrobu lepidel živočišného původu, stejně jako lepení za horka. Dřevěné rakve byly zdobeny pigmenty, které byly pojeny směsí křídly a klihu. V Babylóně byly nalezeny sošky, jejichž oči byly zalepeny do hlavy. Už asi 3300 let staré práce znají lepení dýhy.

K lepení se ve starověku používal albumin získaný ze zvířecí krve, dextrin z papyru, vařením kostí, kůže a zbytků ryb se vyráběl glutin.

Roku 1690 byly v Holandsku založeny plantáže zajišťující suroviny pro výrobu klihu. Továrny na výrobu rybího klihu vznikaly v Anglii kolem roku 1700. Patent na výrobu lepidla byl udělen v Americe roku 1814. Roku 1823 bylo v Anglii patentováno lepení kaučukovitým lepidlem. Patent na vulkanizovatelné kaučukové lepidlo přišel až asi 30 let po objevu vulkanizace přírodního kaučuku v roce 1862. Roku 1872 vzniká v Americe první továrna na celuloid, ale teprve roku 1912 byl na obuvnické výstavě v Budyšině (Bautzen) předveden na svou dobu dobře připravený výrobní postup lepené obuvi.

Prakticky až do druhé světové války byly lepeny jen materiály, které byly schopné lepidlo vsáknout – dřevo, kůže, textil a papír. Kromě lepení dřeva by bylo možno toto období asi charakterizovat použitelností lepení zejména ve spotřebním průmyslu. Výjimkou v této předválečné éře byla fólie na bázi fenolické pryskyřice, tzv. Tegofilm. Byla použita při stavbě větroňů a dřevěných motorových letounů. Technologie lepení dosáhla největšího rozmachu v posledních padesáti letech [1].

2 TEORETICKÁ ČÁST

2.1 Technologie lepení

2.1.1 Definice lepení

V procesu lepení se mezi spojované povrchy součástí přidává vrstva speciálního média, které je schopné při jistém fyzikálním stavu, v důsledku adheze a koheze, vytvořit nepohyblivý spoj [6].

2.2 Hlavní přednosti a nedostatky technologie lepení

Tak jako jiné zpracovatelské metody, vyznačuje se lepení mnoha výhodami, ale i některými zápornými či limitujícími činiteli. Při rozhodování o typu spoje je třeba uvážit přednosti a nedostatky lepení ve srovnání s ostatními způsoby spojování [7].

2.2.1 Přednosti

Mezi přednosti lepení patří zvýšení pevnosti, zvýšení bezpečnosti při poruše, snížení výrobních nákladů, dobrá těsnost spoje, zvýšená odolnost proti korozi, hladké vnější povrchy, možnost miniaturizace, útlum vibrací, snížení hmotnosti, úspora lícování, výroba spoje s dobrou elektrickou, tepelnou a zvukovou izolací, nebo spoje s dobrou elektrickou vodivostí. V řadě případů lze provést slepení za nízké teploty, která neovlivní spojovaný materiál. Lepení je vhodné pro spojení velkých ploch a velmi tenkých materiálů. Lepení dovoluje spojovat různé materiály [1] [7].

2.2.2 Nedostatky

Mezi nedostatky lepení patří především malá odolnost proti zvýšení teploty a odlupování, nutnost úpravy ploch před lepením, častá potřeba vytvrzovacích přípravků, dlouhé vytvrzovací doby, náchylnost ke creepu, časově omezená skladovatelnost většiny lepidel. Konstrukčně použitelné spoje nejsou rozebíratelné. Lepení většinou nelze provádět

za velmi nízkých teplot [1] [7].

2.3 Porovnání lepení s ostatními technologiemi spojování materiálů

Lepení, jako nový způsob spojování kovových materiálů, se v poslední době hodně rozšířilo. U některých průmyslových odvětví je dnes postaveno na roveň klasickým způsobům, jako je nýtování, svařování, spojování šrouby a pájení. Tyto dříve jediné způsoby spojování nesplňují vždy technologické požadavky.

2.3.1 Srovnání lepení se svařováním a pájením

Svářet a pájet se mohou jen některé kovy. V mnohých případech je svařování a pájení obtížné a někdy metalurgické složení kovů a zejména slitin sváření vůbec nepřipouští. Při svařování se materiál často v místech svaru oslabuje a deformuje, zejména pokud se jedná o tenké plechy. A kromě toho v místech svaru zbývá po svařování určité pnutí.

2.3.2 Srovnání lepení s nýtováním a šroubováním

Nýtování a šroubování je všestrannější a lze jím spojovat i různorodé hmoty. Nevýhodou je, že se porušuje celistvost materiálu a tím zhoršují mechanické vlastnosti. Při nýtování a šroubování v ocelové konstrukci je namáháno pouze místo, ve kterém jsou spojeny dva konstrukční díly. Ve šroubu nebo nýtu se totiž koncentruje všechna síla. Tak např. u namáhané mostní konstrukce není síla rovnoměrně rozložena v celé hmotě, ale soustředí se právě v místech, kde jsou jednotlivé části konstrukce spojeny nýty nebo šrouby.

2.3.3 Srovnání přeplátovaného lepeného spoje s nýtovanými a bodově svařovanými spoji

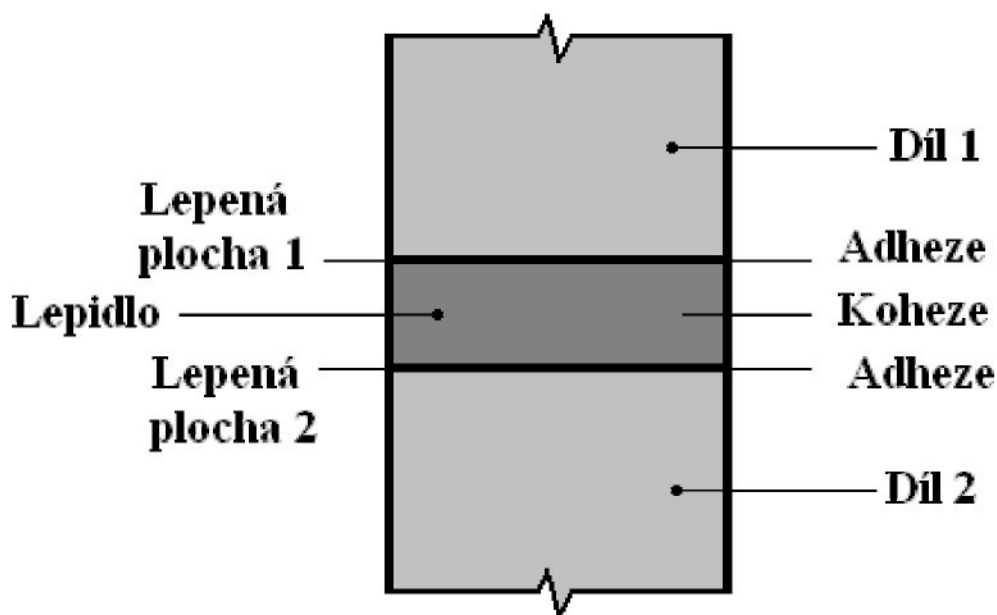
Přeplátované lepené spoje v porovnání se spoji nýtovanými a bodově svařovanými mají při proměnlivém namáhání větší nosnost. Přednosti lepených spojů vyniknou zejména u tenkých plechů. Závažným nedostatkem lepených spojů je jejich velká citlivost k

působení normálového napětí v přeplátovaných spojkách, kterým se většinou nelze vyhnout. Zdá se však, že kombinace lepených spojů s tzv. technologickými spínadly (šrouby nebo nýty) dostatečně pojišťuje spoje proti nepříznivému působení sil, které vyvolávají odlupování spojů a ohrožují tak do značné míry provozní jistotu lepených konstrukcí. Z hlediska hospodárnosti a konstrukce znamená lepení pokrok ve spojovací technice, neboť často umožňuje vytvořit lehčí konstrukci a tím zajistit i levnější řešení.

2.4 Adheze

Adheze je schopnost lepidla přilnout k základnímu materiálu pomocí napětí na rozhraní lepidla a základního materiálu (působí zde absorpční, elektrické a difúzní síly) [6].

Dosah těchto mezimolekulárních sil je podstatně nižší než hloubka drsnosti mechanicky opracovaných ploch. Proto musí lepidlo vniknout do těchto povrchových nerovností a smáčet tak celou plochu. Smáčivost pevného povrchu tekutým lepidlem závisí na krajovém úhlu vztaženém k povrchu pevné látky a také na povrchové energii obou látek.



Obr. 1 Průřez lepeným spojem

Lepidlo může smáčet pevný povrch látky jen tehdy, když jeho povrchová energie γ_k je stejná, lépe však menší, než je kinetická povrchová energie γ_s lepené látky. Kinetická povrchová energie některých látek při pokojové teplotě je uvedena v *tab. 1*

Tab. 1 Kinetická povrchová energie různých látek

Látka	Kinetická povrchová energie[mN/m]
PTFE (teflon)	18
PVC	40
Polyamid 6/6	46
Železo	2030
Wolfram	6800
Lepidlo (např. Loicite)	30 - 47

Z této tabulky vyplývá, že kovy lze lepit snadno, u umělých hmot jsou tyto poměry často kritické. Vhodnou úpravou povrchů lze povrchovou energii pozitivně ovlivnit tak, že je slepení možné [5].

2.5 Koheze

Koheze je vnitřní pevnost lepidla (souhrn všech molekulárních sil, které brání vzájemnému oddělení jednotlivých molekul) [6]

Tyto síly se skládají:

- z mezimolekulárních přitažlivých sil (Van der Waalsovy síly)
- ze vzájemných vazeb mezi molekulami polymerů [5].

2.6 Povrchová úprava před lepením

Adherend je materiál, který je lepen lepidlem.

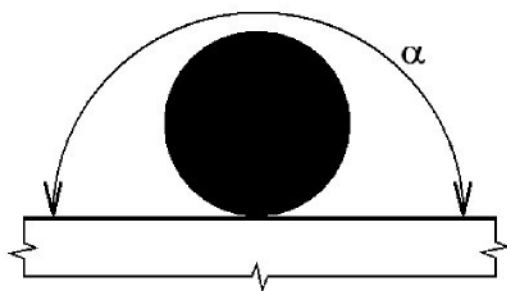
Povrchová úprava adherendu před lepením je jednou z rozhodujících operací při lepení. Je-li povrch adherendu znečištěn například mastnotou, nebo je-li na povrchu vrstva, která není pevně spojena s jádrem adherendu (například okuje), musí se povrch obrousit,

opískovat nebo chemicky mořit. Jinak nelze dosáhnout kvalitního spoje ani nejlepšími lepidly.

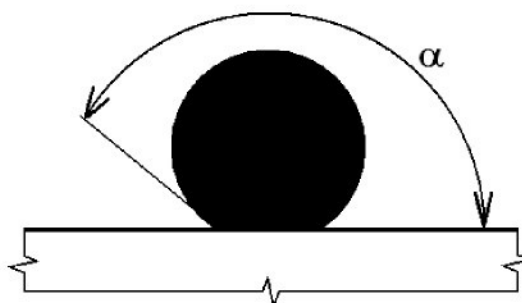
Kohezní pevnost lepidel se neustále zvětšuje, a tím klade stále větší požadavky na kvalitu úpravy povrchu před lepením. Navíc udržují nová lepidla vysokou kohezní pevnost v širokém teplotním rozmezí, a to i za velmi nepříznivých vlivů prostředí. Povrchová úprava před lepením musí dovolit využití všech předností nových lepidel. Jejím cílem je, aby adhezní pevnost byla vyšší než pevnost kohezní.

Povrchy čistých kovů mají obvykle vysokou volnou povrchovou energii, která je spolu s nízkou volnou povrchovou energií organických lepidel podmínkou spojů s vysokou adhezní pevností. Povrchy kovů jsou však velmi rychle znečišťovány sorpcí složek atmosféry, která snižuje volnou povrchovou energii kovu. Jedním z úkolů povrchové úpravy před lepením je odstranit adsorbovaný film a nahradit ho povrchovou vrstvou, která je pro lepení vhodná a která není rychle znečišťována atmosférou.

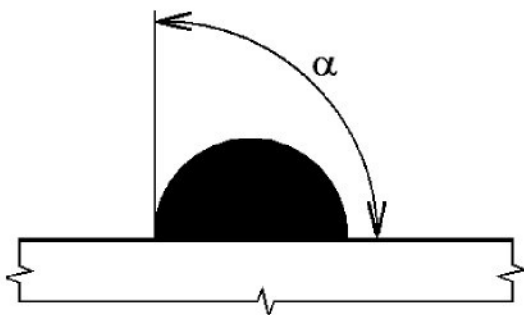
Jednou z metod měření volné povrchové energie je měření smáčecího úhlu, který vytvoří na povrchu adherendu kapka vody. Malý či nulový smáčecí úhel ukazuje na vysokou volnou povrchovou energii. Jestliže se na povrchu adherendu dobře rozteče voda, lze předpokládat, že bude adherend dobře smáčen i lepidlem, což je prvořadá podmínka pro vytvoření dobrého spoje. Na dobře upraveném adherendu je velmi malý smáčecí úhel jen těsně po úpravě. Vlivem atmosféry se velmi rychle zvětšuje.



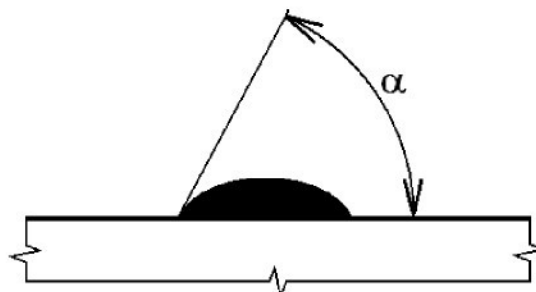
Obr. 2 Žádná smáčivost



Obr. 3 Minimální smáčivost



Obr. 4 Nedostatečná smáčivost



Obr. 5 Dostatečná smáčivost



Obr. 6 Ideální smáčivost

Většinou se kontrola roztékání vody po povrchu upraveného adherendu hodnotí jen vizuálně buď po nanesení kapky vody na adherend z očního kapátka, nebo přímo po oplachování ve vodě[1].

2.7 Vliv drsnosti lepených ploch na pevnost spoje

Povrchová úprava před lepením úzce souvisí s drsností povrchu.

Při dosažení molekulární rovinnosti dochází k adhezi bez použití lepidla. Důvodem, proč musí být při spojování technických materiálů používána lepidla, je skutečnost, že plochy určené k lepení nikdy nedosahují dokonalé hladkosti. I u leštěných ploch jsou stále ještě nerovnosti 10^{-8} až 10^{-7} m. Lepidlo musí nerovnosti vyplnit a přiblížit se na molekulární vzdálenost k povrchu adherendu.

Obecně známým zdůvodněním vhodnosti zdrsnění lepené plochy bylo její zvětšení a z toho odvozená vyšší pevnost spoje.

U lepené plochy rozeznáváme tři druhy lepených povrchů:

- a) geometrický povrch, určený vnějšími rozměry lepené plochy,
- b) mikropovrch, zahrnující plochu všech nerovností,
- c) účinný povrch, tj. část mikropovrchu, která je smočena lepidlem

Základní typy nerovností lepených ploch

jsou znázorněny na *obr. 7*.

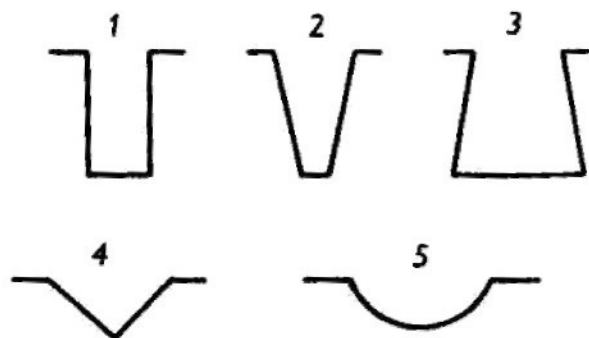
1 - válcová nerovnost

2 - kónická otevřená nerovnost

3 - kónická uzavřená nerovnost

4 - kónická plochá nerovnost

5 - kónická misková nerovnost



Obr. 7 Základní typy nerovností lepených ploch

Pro piklovaný povrch je nejpravděpodobnější kuželovitá, plochá nerovnost podle 4.

Pevnost spoje je tím větší, čím menší je hloubka a průměr nerovnosti typu 4, až při nulové hloubce dochází k samovolné adhezi bez použití lepidla. Nerovnost typu 5 se může předpokládat například na hladkém, leštěném povrchu.

Dojde-li při lepení k uzavření vzduchové bubliny v prohlubni typu 5, je vzhledem k velkému průměru a malé hloubce nerovnosti postižena poměrně velká část lepené plochy neprolepením. To se pak projeví zejména při odlupovacích zkouškách.

Ani ostatní tvary nerovností (1, 2, 3) nejsou pro lepení příliš vhodné - lepidlo špatně vyplňuje prohlubně, poměr mezi účinným povrchem a mikropovrchem je nevýhodný.

O vhodnosti určitého tvaru nerovnosti rozhoduje i druh zatěžování. Například při smykovém zatěžování se neuplatní dobře hluboké nerovnosti o malém průměru, protože mohou být snadno při zatěžování „odstřiženy“. Při zatěžování tahem je situace příznivější, ale i zde by mohlo dojít k „utrhávání“ vrcholů nerovností, a tím k poklesu pevnosti. Nepříznivý vliv hlubokých nerovností by měl být u takového zatěžování relativně menší

než při zatěžování smykem.

Na rozdíl od obecně vžitého názoru platí, že ne každé zdrsňení zvýší pevnost spoje. Rozhodující je zvýšení účinného povrchu, nikoli mikropovrchu.

Nejvhodnější hloubka zdrsňení bývá uváděna asi 1 až 6 mikrometrů. Lepidla vytvrzující za studena jsou zpravidla na tvar nerovnosti povrchu citlivější než lepidla vytvrzovaná za tlaku a při zvýšené teplotě [1].

2.8 Čištění a odmašťování lepených ploch

Povrchová úprava adherendu před lepením se obvykle skládá z předběžného čištění a odmašťování a z vlastní úpravy povrchu adherendu.

Stav povrchu určeného pro lepení může být obecně velmi odlišný. A tak jsou někdy lepeny plochy bez jakékoliv úpravy, někdy postačí jednoduché odmaštění, jindy se plochy jen pískují, brousí a podobně.

Pro úpravu dílů k lepení je však přece jen typické čištění a odmašťování, buď jako konečná úprava povrchu před lepením, nebo proto, aby se zamezilo znečištění následující mořicí lázně. Nejsou-li díly před ponořením do lázně dobře odmaštěny, zůstane obvykle po moření mastnota plavat na povrchu a při vyjímání z mořicí lázně se při průchodu hladinou plochy znovu znečistí.

Při odmašťování nejde jen o odmaštění lepených ploch, ale o odmaštění celého lepeného dílu. Během dalších operací - zvláště během vytvrzování za zvýšené teploty - by se mohla mastnota dostat do lepeného spoje a snížit jeho pevnost.

Ve strojírenské výrobě přicházejí díly k lepení už předběžně odmaštěny. Předchozí dílenské zpracování si takové odmaštění vynucuje. To znamená, že díly jsou zbaveny podstatné části konzervačních tuků, ale stále jsou ještě značně zamaštěny. K čištění a odmašťování se používá v podstatě tři způsobů.

Jsou to:

alkalické odmašťování;

tamponování rozpouštědly;

odmašťování v parách rozpouštědla.

Alkalické odmašťovací lázně bývají většinou pro zvětšení účinnosti zahřívány na teplotu 70° až 95 °C. Obvykle lázeň obsahuje alkalické soli a mýdla, detergenty i povrchově aktivní látky, které někdy detergenty nahrazují. Z alkalických solí je nejobvyklejší metakřemičitan sodný, orthokřemičitan sodný, fluorokřemičitan sodný, pyrofosforečnan sodný nebo tetraboritan sodný, někdy se používá i roztoků hydroxidu sodného.

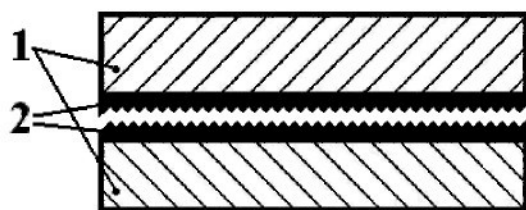
Odmašťování rozpouštědly lze provádět tamponováním, oplachováním, nebo v parách rozpouštědla.

Literatura dává přednost odmašťování v parách rozpouštědla před tamponováním nebo oplachováním rozpouštědly

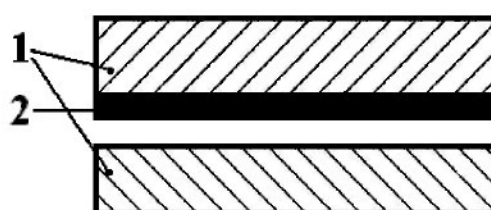
Při tamponování nebo oplachování rozpouštědlem se sice podstatná část mastnot odstraní, ale zbytek zůstane rozprostřen nepravidelně po povrchu odmašťovaných dílů. Jen u titanu je doporučováno spíše omytí rozpouštědlem než odmašťování v jeho parách [1].

2.9 Základní typy poruch lepeného spoje

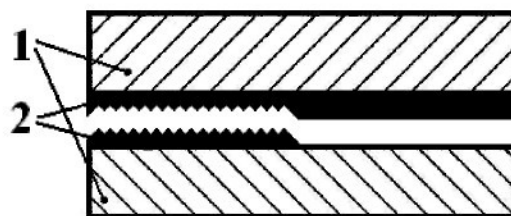
Mezi základní typy poruch lepeného spoje patří kohezní *obr. 8*, adhezní *obr. 9* a smíšená porucha *obr. 10*.



Obr. 8 Kohezní porucha



Obr. 9 Adhezní porucha



Obr. 10 Smíšená porucha

1 - adherend

2 - lepidlo

Nejpříznivějším výsledkem při hodnocení úpravy povrchu pro lepení je stoprocentně kohezní lom [1].

2.10 Slícování lepených dílů

Než se začne upravovat povrch adherendu pro lepení, je třeba lepené díly zkušebně sestavit v lepicím přípravku a přizpůsobit je navzájem i s dosedacími plochami přípravku. Není-li je možno přizpůsobit v předepsaných tolerancích, musí se vyměnit. U lepených dílů se nedá počítat s dodatečnou tvarovou úpravou po slepení, jaká je obvyklá například u nýtování. Pokud nejsou lepené díly před lepením dobře slícovány, vznikne během vytvrzování ve spoji místní koncentrace napětí, která pak oslabuje pevnost spoje [1].

2.11 Rozdělení lepidel k lepení konstrukčních materiálů

2.11.1 Rozdělení podle způsobu vytváření lepeného spoje

Podle způsobu vytváření lepeného spoje se lepidla rozdělují do několika kategorií.

Roztoková nebo disperzní - tuhnou vsáknutím a odpařením rozpouštědel

Citlivá na tlak - například lepicí pásy, spoj vznikne po lehkém přitlačení

Tavná - spoj vznikne ztuhnutím taveniny

Vytvrzující chemickou reakcí [1]

2.11.2 Rozdělení podle počtu složek

Podle počtu složek se lepidla rozdělují na jednosložková, dvousložková a vicesložková.

2.11.2.1 Jednosložková lepidla

Jsou technologicky výhodnější. Pokud se vytvrzují za laboratorní teploty, mají obvykle omezenou dobu skladovatelnosti. Při vytváření spoje za zvýšené teploty jsou to často prášky, které jsou nanášeny jako tavenina, nebo tají po dopadu na předehřátý kov.

Jindy to bývají tyčinky, pasty nebo roztoky. Studená jednosložková lepidla mají zpravidla některé pevnosti spojů omezeny. Příkladem typického jednosložkového lepidla jsou lepicí fólie [1].

2.11.2.2 Dvousložková a vícesložková lepidla

Jsou pravděpodobně nejrozšířenější skupinou lepidel vytvrzujících chemickou reakcí. I když je najdeme jak mezi studenými, tak mezi horkými lepidly, půjde vývoj asi tím směrem, že se jejich uplatnění uchová spíše v oblasti studených lepidel. I tady je však vidět snahu přejít na jednosložkové systémy i za cenu podchlazování směsi. Příkladem dvousložkových lepidel: epoxidové, polyesterové pryskyřice [1].

2.11.3 Rozdělení lepidel vytvrzujících se chemickou reakcí

Teplota vytvrzovací reakce a typ vytvrzovací reakce je dalším kritériem k rozdělení lepidel.

2.11.3.1 Rozdělení podle teploty vytvrzovací reakce

Podle teploty vytvrzovací reakce se lepidla mohou dělit na tzv. studená a horká

Studená – vytvrzující za laboratorní teploty

Horká – vytvrzující za teplot vyšších než laboratorní teplota

Toto rozdělení není zcela přesné, protože u většiny studených lepidel lze totiž proces vytvrzování zkrátit zahřátím. Většina studených lepidel vytvrzuje bez nutnosti použití tlaku [1].

2.11.3.2 Rozdělení vytvrzovacích reakcí podle typu reakce

Podle typu vytvrzovacích reakcí se lepidla dělí na lepidla tzv. polykondenzační, polymerační a polyadiční.

Polykondenzace

Polykondenzace je slučování většího počtu molekul stupňovitým mechanismem v makromolekuly, provázené odštěpováním jednoduchých molekul, například vody, alkoholu a podobně. Produkt polykondenzace má jiné elementární složení než výchozí monomery.

Polymerace

Polymerace je polyreakce, při níž se molekuly monomeru spojují řetězovým mechanismem v makromolekuly polymeru, aniž se odštěpuje voda nebo jiná jednoduchá látka. Produkt má většinou stejné elementární složení jako monomer.

Polyadice

Polyadice probíhá podle podobného reakčního mechanismu jako polykondenzace, totiž postupným mechanismem. Nedochází však k odštěpování nízkomolekulární látky, protože funkční skupina jedné ze složek se aduje na dvojnou vazbu nebo na kruh složky druhé. Elementární složení polymeru je stejné jako složení monomeru. Na rozdíl od jiných způsobů syntézy vysokomolekulárních sloučenin se při vzniku polymeru z cyklických sloučenin nemění elektronová struktura chemických vazeb ani jejich úhrnný součet v soustavě. Nevznikají nové typy chemických vazeb [1].

2.12 Epoxidová lepidla

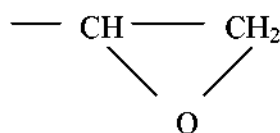
Je to skupina lepidel, která je v mnoha směrech pokládána za velmi perspektivní, v současnosti jsou modifikovaná epoxidová lepidla v popředí konstrukčních lepidel pro spoje kovů, provozované do teplot cca 150 °C [1].

2.12.1 Historie epoxidových lepidel

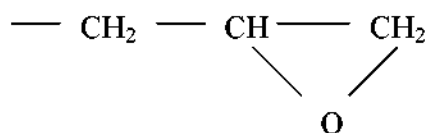
Překotný rozvoj epoxidových lepidel se datuje zejména od roku 1950. Výborné vlastnosti epoxidových lepidel byly využity při konstruování kompozitních systémů, jako výztuže slouží nejčastěji skelná a uhlíková vlákna.

2.12.2 Chemie epoxidových lepidel

Pod pojem epoxidové pryskyřice zahrnujeme sloučeniny obsahující více než jednu epoxidovou (oxiranovou) skupinu (1) v molekule. Nejběžnější typy epoxidových pryskyřic obsahují glycidylovou (2,3-epoxypropylovou) skupinu (2).



(1)



(2)

Pokud má látka v molekule jen jednu epoxidovou skupinu, není to pryskyřice, ale jen reaktivní ředidlo nebo změkčovadlo [1], [2].

2.12.3 Způsob přípravy epoxidové pryskyřice

Epoxidové pryskyřice lze připravit např. epoxidací nenasyčených sloučenin:

- katalytickou oxidací v plynné nebo kapalně fázi kyslíkem, ozonem nebo oxidačními činidly jako kyselinou chromovou nebo manganistanem,
- epoxidací organickými peroxykyselinami nebo anorganickými peroxokyselinami a jejich deriváty předem připravenými nebo vznikajícími při procesu,
- epoxidací přes halogenhydriny a jejich deriváty,
- biologickou epoxidací.

Mezi nejvýznamnější způsoby přípravy epoxidových sloučenin patří dehydrohalogenace substituovaných hydroxysloučenin. Nejdůležitější je dehydrohalogenace chlorhydrinetherů připravených adicí epichlorhydrinu na látky s hydroxylovou, případně karboxylovou skupinou. Další metoda přípravy epoxidových sloučenin je kondenzace karbonylových sloučenin s halogenestery. Epoxidy lze získat z halogenovaných ketonů a karbonylu niklu, nebo reakcí diazomethanu s aldehydy nebo ketony.

Nejvýznačnější skupinou jsou však produkty připravené alkalickou kondenzací látek s fenolickou hydroxylovou skupinou s epihalogenhydrinem, zejména s

epichlorhydrinem a jeho deriváty, např. s β -methylepichlorhydrinem. Mohou se použít i látky, z nichž může v průběhu vlastní alkalické kondenzace vznikat epihalogenhydrin, např. 1,3-dichlor-2-propanol (glycerol- α,γ -dichlorhydrin). Epihalogenhydrin jako výchozí surovina pro přípravu epoxidových sloučenin se používá u glycidyletherů alkoholů a polyalkoholů, glycidylesterů karboxylových kyselin, glycidylaminů [2].

2.12.4 Základní vlastnosti epoxidových lepidel

Epoxidová lepidla jsou vhodná pro lepení kovů, skla, porcelánu, pryže, reaktoplastů jako bakelitu, acetobutyrátu celulosy atd. Nelze jimi lepit většinu termoplastů, v některých případech lze i tyto materiály připravit k lepení epoxidy, např. u polyethylenu a polytetrafluorethylenu vhodnou úpravou povrchu. Např. požahováním, účinkem kyseliny dusičné nebo chromosírové směsi. Mezi technicky nejdůležitější použití patří spojování kovů.

Lepidlo pro spojování kovů musí mít tyto vlastnosti:

1. dobrou adhezi k hladkým plochám pokud možno všech kovů;
2. dobrou kohezi po vytvrzení;
3. při vytvrzování nesmí v lepidle vznikat žádné pnutí oslabující adhezi, což znamená, že lepidlo musí mít minimální smršťivost a nesmí obsahovat těkavé zplodiny vzniklé reakcí nebo z použitých rozpouštědel;
4. musí mít dobré elektroizolační vlastnosti;
5. musí co nejméně podléhat stárnutí a mít dobrou chemickou odolnost, zejména proti lázním při anodickém oxidování lehkých kovů a
6. musí být jednoduchým způsobem zpracovatelné a nesmí mít fyziologicky škodlivé účinky.

Prvý bod podmínek splňují epoxidové pryskyřice skutečně znamenitě. Mají výbornou adhezi nejen ke kovům, ale i k řadě jiných materiálů. Příčinou výborné adheze jsou především epoxidové a hydroxylové skupiny, popř. některé skupiny vnesené tvrdidlem, např. nitrilovou skupinou při použití tvrdidla dikyandiamidu. Epoxidové skupiny mají vliv na adhezi jen v první fázi lepení, tj. ve fázi smáčení povrchu, zato však působí mnohem účinněji než skupiny hydroxylové. Adsorbují se na polární podklad snadněji, neboť jejich

dipólový moment je podstatně vyšší proti dipólovému momentu hydroxylových skupin. V dalším pochodu však epoxidové skupiny mizí reakcí s tvrdidly, s nimiž vytváří makromolekulu.

Druhou důležitou vlastností je koheze. Je důsledkem přitažlivých sil mezi molekulami pryskyřice. Dodává filmu a lepidlu dobré chemické vlastnosti, přičemž je znakem dobré pevnosti v odlupování.

Epoxidové pryskyřice jsou vnitřně změkčeny glyceroletherovými můstky, popř. můstky vnesenými do makromolekuly tvrdidla (hexamethyl-endiaminem, polysulfidem atd.). Další zlepšení se dosáhne vnesením různých polymerů, jako je polyvinylbutyral, kopolymer ethylen-vinylacetát, kaučuky, telechelické polymery, např. ze skupiny tekutých kaučuků, nízkoviskózní polyestery, nízkomolekulární polymery epichlorhydrinu.

Starší typy epoxidových lepidel příliš nevynikaly dobrými kohezními vlastnostmi, což se projevovalo zejména horší pevností v odlupování. Měly mnohem menší pevnost v odlupování než fenolická lepidla modifikovaná polyvinylacetalu nebo lepidla kaučuková. To vedlo k domněnce, že epoxidová lepidla se hodí jen pro statické spoje a nejsou např. vhodná pro letecký průmysl. Uvedené modifikace však pronikavě změnily jejich vlastnosti.

Epoxidové pryskyřice velmi dobře splňují podmínku bodu 3, reakce vytvrzování totiž probíhá za nepatrných objemových změn, při čemž nevznikají žádné těkavé zplodiny. Proto také u epoxidových pryskyřic není nutný při vytvrzování vysoký tlak, jak je to třeba např. u lepidel fenolických. Stačí jen tlak potřebný k fixování lepených dílů. Epoxidová lepidla mají také dobré elektroizolační vlastnosti, elektrickou pevnost asi 25 kV mm^{-1} a měrný vnitřní odpor větší než $10^{12} \Omega \text{ cm}$; $\text{tg } \delta$ je několik setin, relativní permitivita činí asi 3,5 až 4. Proto lze epoxidovými lepidly spojovat různé kovy, aniž vznikají korozní proudy.

Stárnutí vytvrzených epoxidových pryskyřic je nepatrné. Např. pevnost spoje duralových a ocelových plechů, provedeného lepidly ChS Epoxy 1001 a ChS Epoxy 371, se po tříletém uložení při běžných podmínkách vůbec nezměnila. Dřívější práce hovořily o menší odolnosti spojů lehkých kovů provedených epoxidovými lepidly vůči vodě. I u lepidel tvrzených za tepla klesala pevnost spojů, uložených ve vodě, zejména mořské. Tento negativní rys velmi podstatně ovlivňuje povrchová úprava lepených materiálů. Příznivý vliv má i moření chromosírovou směsí (piklování) postupem uvedeným v ČSN 66 8510.

Dlouhodobé zkoušky prováděné u lepených spojů různých kovových materiálů

(dural, hliník, ocel, nerezová ocel, měď, mosaz) lepidly ChS Epoxy 1001 a ChS Epoxy 371 na povětrnostních stanicích ukázaly, že u lepených spojů kovových materiálů, nemořených a jen očištěných rozpouštědly, má pronikavý vliv druh použitého rozpouštědla. U lepidla tvrzeného za studena ChS Epoxy 371 se velmi negativně projevil aceton. I když výsledky zkoušek pevnosti spojů hned po vytvrzení byly velmi dobré, velmi rychle klesaly po expozici na povětrnostních stanicích. Méně citlivé na vlivy povětrnosti jsou typy na bázi glycidylesterů, které rovněž velmi dobře odolávají vodě. Zkoušky odolnosti účinkům povětrnosti byly sledovány po dobu tří let [2].

2.12.5 Hlavní představitelé epoxidových lepidel vyráběných v ČR a v zahraničí

Lepidla domácí produkce jsou zastoupena výrobky řady Lepox, ChS Epoxy, Eprosin E a T [7].

Zahraniční epoxidová lepidla jsou zastoupena především výrobky firem ALTECO a UHU [11], [12].

3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

3.1 Epoxidové lepidlo ChS Epoxy 371

3.1.1 Charakteristika

ChS Epoxy 371 je epoxidová pryskyřice modifikovaná nereaktivním změkčovadlem. Je to silně viskózní pryskyřice hustoty asi $1,13 \text{ g/cm}^3$ při 23°C . Vytvrzuje se po smísení s vhodnými tvrdidly při teplotách 15 až 80°C [3].

3.1.2 Použití

ChS Epoxy 371 se používá k přípravě lepicích kompozic pro lepení kovu, skla, keramiky a jiných vhodných materiálů a k přípravě tmelu. ChS Epoxy 371 vytvrzená ChS-

tvrdidlem P 11 splňuje hygienické požadavky vyhlášky MZ ČR č. 37/2001 Sb. na výrobky přicházející do přímého styku s pitnou vodou. Před aplikací nesmí být kompozice zředěny přídavkem jakéhokoliv ředidla či rozpouštědla [3].

3.1.3 Vlastnosti nevytvrzené pryskyřice

Některé vlastnosti nevytvrzené pryskyřice jsou uvedeny v *Tab. 2* [3]

Tab. 2 Vlastnosti nevytvrzené pryskyřice

Znak jakosti	Jednotka	Hodnota	Metoda zkoušení
Viskozita při 23 °C	mPa.s	40 - 70	ČSN 64 0349
*) při 25 °C		30 - 50	
Epoxidový hmotnostní ekvivalent	g/mol	330 - 400	ČSN EN ISO 3001
Epoxidový index	mol/1000 g	2,5 - 3,0	ČSN EN ISO 3001
Obsah celkového chloru	%	max. 0,5	ČSN 64 0338

3.2 Vlastnosti ChS tvrdidla P 11

3.2.1 Charakteristika

ChS-tvrdidlo P 11 je směs technických polyalkylenpolyaminu, obsahující převážně diethylentriamin [4].

3.2.2 Použití

ChS-tvrdidlo P 11 se používá k vytvrzování epoxidových pryskyřic a systému především pro oblast stavebnictví, dále při výrobě kompozitu a pro výrobu lepidel [4].

3.3 Vlastnosti kompozice epoxidového lepidla ChS Epoxy 371 s ChS tvrdidlem P 11

Některé vlastnosti kompozice epoxidového lepidla ChS Epoxy 371 s ChS tvrdidlem P 11 jsou uvedeny v *Tab. 3* [3]. Epoxidová pryskyřice ChS Epoxy 371 a ChS tvrdidlo P 11 má mísicí poměr 100 : 6,5 [10]

Tab. 3 Vlastnosti kompozice epoxidového lepidla ChS Epoxy 371 s ChS tvrdidlem P 11

Znak jakosti	Jednotka	Hodnota	Metoda zkoušení
Doba želatinace	minut	max. 150	PND 32-3500-99
Tvrdost po 24 hodinách	MPa	min. 100	
**) Pevnost ve smyku při zatěžování v tahu	MPa	min. 20	ČSN EN 1465

*) hodnota informativní

**) tento parametr je hodnocen a zaručován pouze odběratelům, kteří si toto zajistí kupní smlouvou (pro přípravu lepicích kompozic)

3.4 Zkušební vzorky

Jako zkušebních vzorků bylo použito ocelových válečků o průměru 30 mm a délky 20 mm. Tyto válečky jsou opatřeny v jedné podstavě dírou, procházející osou součásti, o průměru 6,8 mm do hloubky 14 mm se závitem M 8 o délce 10 mm. Závít slouží k našroubování upínací tyče. Protější podstava je lepenou stranou zkušebních vzorků.

3.4.1 Materiál zkušebních vzorků

Materiál zkušebních vzorků je nelegovaná ocel 11 373.

3.4.2 Ocel 11 373

3.4.2.1 Použití

Ocel 11 373 je vhodná zejména pro součásti konstrukcí a strojů menších tloušťek i tavně svařovaných, namáhaných staticky i mírně dynamicky. Dále pak se používá na vtokové objekty vodních turbín, výtoky, hradidlové tabule, stavidla, méně namáhané potrubí a odbočnice, jezové konstrukce, dna plochá, klenutá a lemovaná vysokotlaká [9].

3.4.2.2 Chemické složení

Maximální hodnoty některých nejdůležitějších chemických prvků obsažených v oceli 11 373 jsou uvedeny v Tab. 4 [9].

Tab. 4 Maximální množství chemických prvků

C	P	S	N
max 0,17	max 0,045	max 0,045	max 0,007

Údaje jsou v hm. %

3.4.2.3 Mechanické vlastnosti

Mechanické vlastnosti jsou udány pro tyče válcované za tepla o průměru 16 – 40 mm.

Mez kluzu (min) $R_{eH} = 225 \text{ MPa}$

Mez pevnosti $R_m = 340 - 470 \text{ MPa}$

Tažnost (podél. min) $A_5 = 26 \%$

Nárazová práce (min) $KV = 27 \text{ J}$

Modul pružnosti $E = 206 \text{ GPa}$ [9]

3.4.2.4 Fyzikální vlastnosti

Hustota $\rho = 7850 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$

Teplotní součinitel roztažnosti $\alpha = 1,11 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$

Tepelná vodivost $\lambda_t = 54,5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ [9]

3.4.3 Výkres zkušebních vzorků

Výkres zkušebních vzorků je uveden v příloze bakalářské práce.

3.5 Brusný přípravek

Brusný přípravek slouží k dosažení dostatečné rovinnosti lepených ploch během očištění vzorků broušením.

3.5.1 Výroba brusného přípravku

Brusný přípravek byl odlit z epoxidové pryskyřice ChS Epoxy 371 s ChS tvrdidlem P 11.

3.5.2 Výkres brusného přípravku

Výkres brusného přípravku je uveden v příloze bakalářské práce.

3.6 Výkres upínací tyče

Výkres upínací tyče je uveden v příloze bakalářské práce.

3.7 Předběžné očištění lepených ploch zkušebních vzorků

Zkušební vzorky byly předběžně očištěny broušením pod vodou, nejdříve bez přípravku, a po zjištění nedostatečné rovinnosti lepených ploch bylo provedeno broušení pod vodou s přípravkem.

3.8 Úprava povrchu lepených ploch zkušebních vzorků

U lepených ploch zkušebních vzorků byly provedeny následující povrchové úpravy:

pískování pískem o velikosti zrn 0,6 mm;

broušení pod vodou brusným papírem o zrnitosti 100;

broušení pod vodou brusným papírem o zrnitosti 220;

broušení pod vodou brusným papírem o zrnitosti 320;

broušení na sucho brusným papírem o zrnitosti 100;

broušení na sucho brusným papírem o zrnitosti 220;

broušení na sucho brusným papírem o zrnitosti 320;

vystavení vzorků čtyřdennímu působení par 10 % roztoku NaCl;

vystavení vzorků čtyřdennímu působení par 10 % roztoku NaCl a slepení epoxidovou pryskyřicí ChS Epoxy 371 s přídavkem 1 g Fe₂O₃ na 10 g ChS Epoxy 371.

3.9 Odmaštění lepených ploch

Lepené plochy byly odmaštěny technickým benzínem.

3.10 Příprava lepidla

Epoxidová pryskyřice ChS Epoxy 371 byla smíchána s ChS tvrdidlem P 11 v poměru 100 : 6,5 [10]

Pro jednotlivé dávky lepidla bylo vždy naváženo na digitální váze 10g epoxidové pryskyřice ChS Epoxy 371 a toto množství bylo smícháno s 0,7 ml ChS tvrdidla P 11. Po dokonalém promíchání byla tato kompozice nanесena vždy na jednu stranu lepeného spoje.

Lepené vzorky byly zafixovány v lepicím přípravku zhotoveném z krabičky od kinofilmu.

3.10.1 Výpočet množství ChS tvrdidla P 11

ísící poměr 100 : 6,5 [10]

100 g ChS Epoxy 371.....6,5 g P 11

10 g ChS Epoxy 371.....x g P 11

$$x / 6,5 = 10 / 100$$

$$\underline{\underline{x = 0,65 \text{ g}}}$$

Pro snadnější odměřování ChS tvrdidla P 11 byl proveden přepoččet gramů na mililitry.

$$\rho_{P11} = 0,958 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3} \quad [8]$$

$$m = 0,65 \text{ g}$$

$$V = ? \text{ [ml]}$$

$$V = m / \rho \quad (3)$$

$$V = 0,65 / 0,958$$

$$\underline{V = 0,678 \text{ ml} \approx 0,7 \text{ ml}}$$

kde je:

ρ_{P11} ... hustota tvrdidla P11 [$\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$]

m ... hmotnost tvrdidla P11 [g]

V ... objem tvrdidla P11 [ml]

3.11 Zkouška tahem

Zkouška tahem je destruktivní statická zkouška (zatěžování se děje plynule rostoucí silou až do porušení materiálu) za laboratorní teploty. Pro zkoušku lepených spojů se použilo zatěžovací rychlosti $7 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$. Vzorky byly upnuty, pomocí upínacích tyček, do čelistí pro upínání válcových vzorků

3.12 Zkušební zařízení

Zkouška tahem se prováděla na zkušebním zařízení FP 100 – Lab Test II.

3.12.1 Charakteristika zkušebního zařízení

Maximální zatěžovací síla 100 kN

Maximální upínatelná délka 700 mm



Obr. 11 Zkušební zařízení FP 100 – Lab Test II

3.13 Optický profilometr

Ke snímání profilu povrchu zkušebních vzorků bylo použito optického profilometru MicroProf se senzorem CWL.

Na zkušebním vzorku byl nasnímán čtverec o straně 1 mm, se stranovým rozlišením 2 μm (vzdálenost dvou sousedních bodů) a výškovým rozlišením 10 nm.

3.14 Naměřené a vypočtené hodnoty

3.14.1 Obsah lepené plochy

$$d = 30 \text{ mm}$$

$$S = ? \text{ [mm}^2\text{]}$$

$$S = \pi \cdot d^2 / 4 \quad (4)$$

$$S = \pi \cdot 30^2 / 4$$

$$\underline{S = 706,86 \text{ mm}^2}$$

kde je:

d ... průměr vzorku [mm]

S ... plocha lepeného spoje [mm²]

3.14.2 Mez pevnosti

$$F_{\max} \text{ [N]}$$

$$S = 706,86 \text{ mm}^2$$

$$\underline{R_m = ? \text{ [MPa]}}$$

$$R_m = F_{\max} / S \quad (5)$$

kde je:

F_{max} ... Maximální zatěžující síla [N]

S ... plocha lepeného spoje [mm²]

R_m ... mez pevnosti lepeného spoje [MPa]

3.14.3 Směrodatná odchylka

Směrodatná odchylka se vypočítá „tendenční“ metodou neboli metodou „n“.

Směrodatná odchylka je definována následujícím vztahem:

$$\sqrt{\frac{n \sum x^2 - (\sum x)^2}{n^2}} \quad (6)$$

kde je:

x ... argumenty základního souboru]

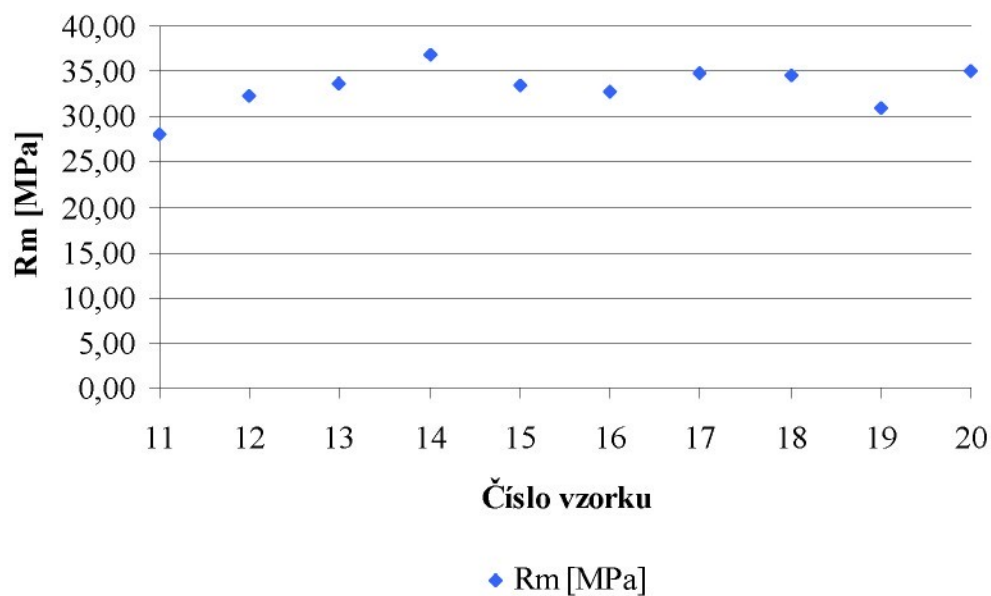
n ... počet argumentů

3.14.4 Vzorky pískované zrny písku o velikosti 0,6 mm

Tab. 5 Vypočtené a naměřené hodnoty vzorků pískovaných zrny písku o velikosti 0,6 mm

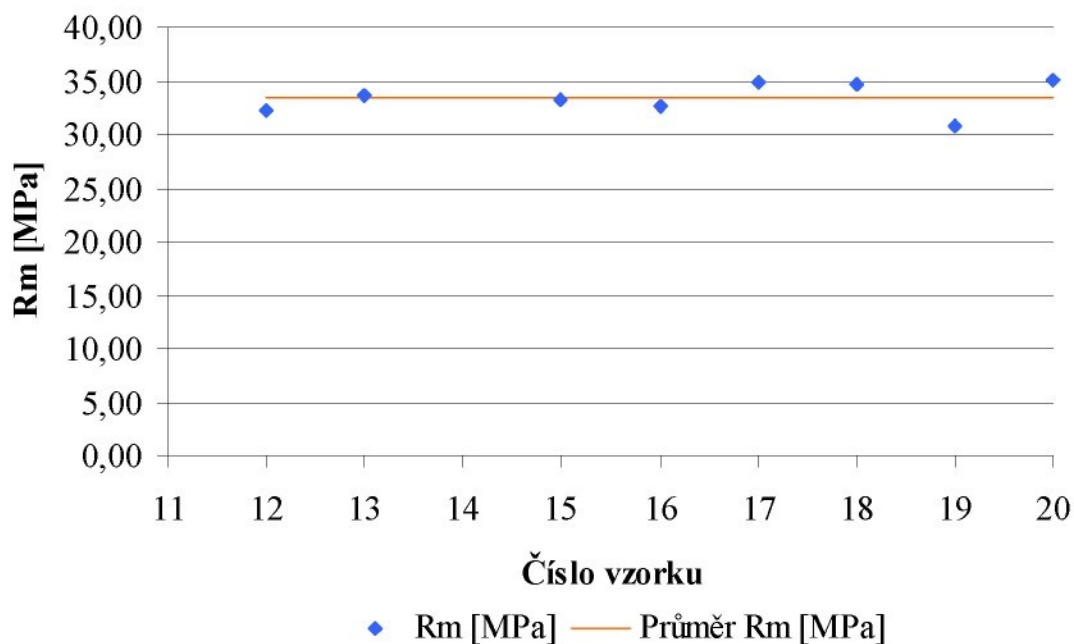
Číslo vzorku	F _{max} [N]	Rm [MPa]	Průměr Rm [MPa]
11	19 856,90	28,09	-
12	22 796,50	32,25	33,40
13	23 733,50	33,58	33,40
14	25 981,80	36,76	-
15	23 566,10	33,34	33,40
16	23 099,30	32,68	33,40
17	24 602,90	34,81	33,40
18	24 460,40	34,60	33,40
19	21 816,60	30,86	33,40
20	24 791,80	35,07	33,40

Směrodatná odchylka: 1,35 MPa

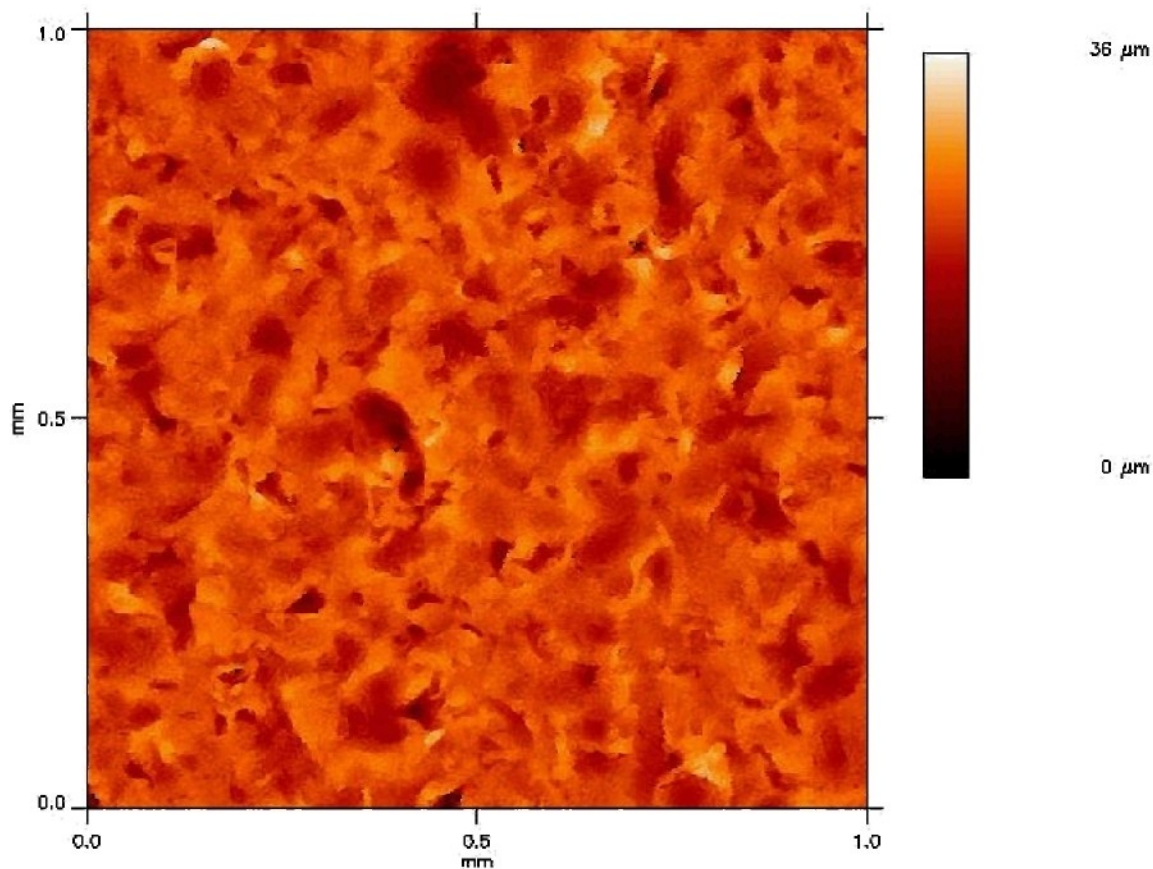


Graf 1 Vypočtené Rm vzorků pískovaných zrny písku o velikosti 0,6 mm

Z Tab. 5 a Grafu 1 vyplývá, že nejnižší hodnoty dosahuje vzorek 11 a nejvyšší hodnoty vzorek 14. Tyto vzorky jsem ze souboru hodnot vyloučil a nezapočítal je do průměrné hodnoty Rm a do směrodatné odchylky.



Graf 2 Vypočtené Rm vzorků pískovaných zrny písku o velikosti 0,6 mm porovnané s průměrnou hodnotou Rm



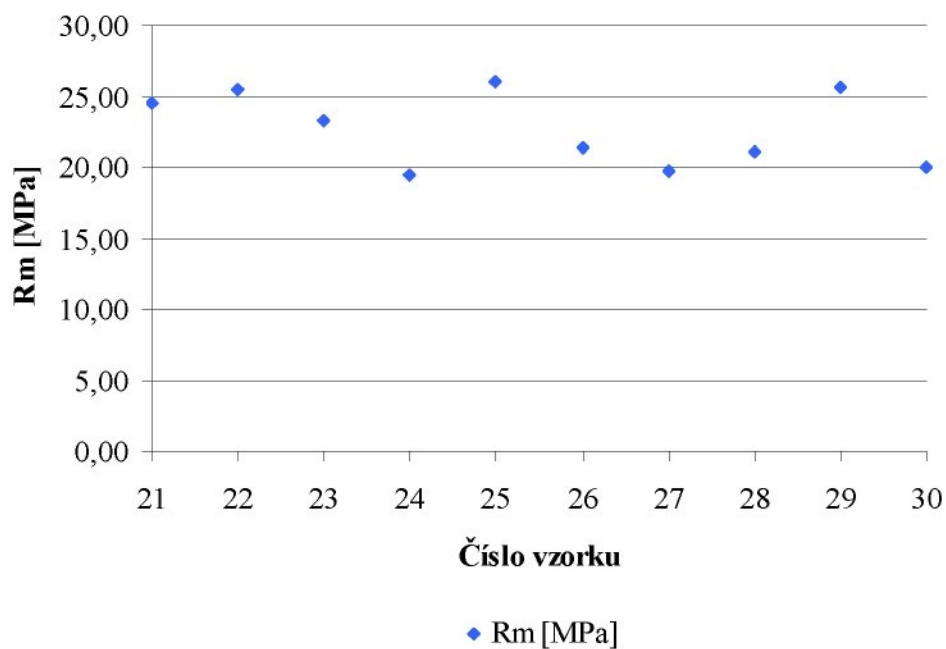
Obr. 12 Povrch vzorku pískovaného zrný písku o velikosti 0,6 mm

3.14.5 Vzorky broušené na sucho brusným papírem o zrnitosti 100

Tab. 6 Vypočtené a naměřené hodnoty vzorků broušených na sucho brusným papírem o zrnitosti 100

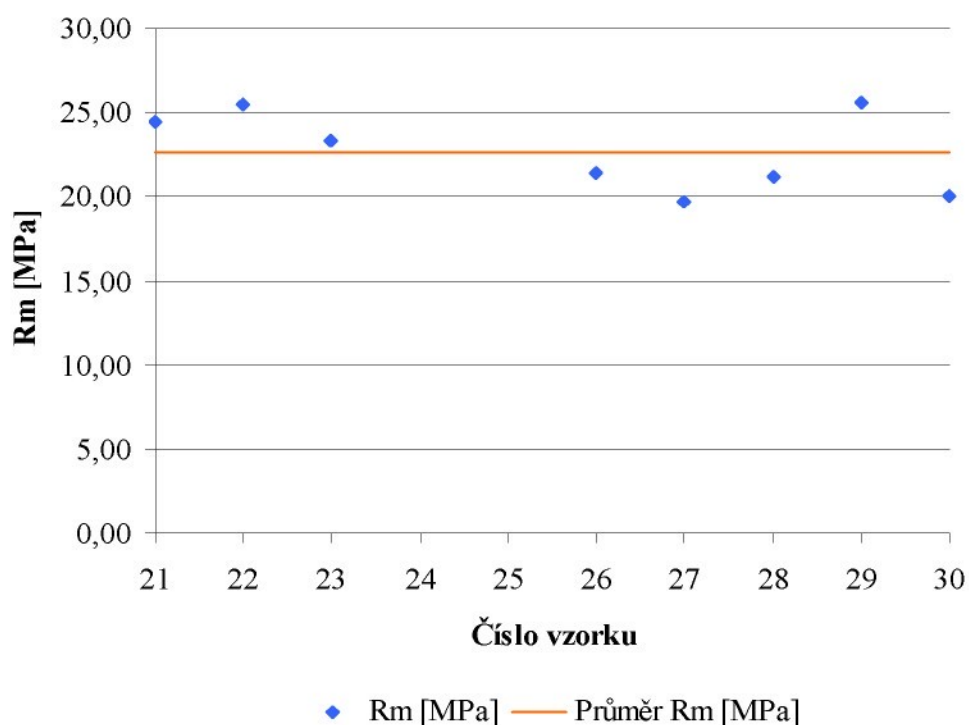
Číslo vzorku	$F_{\max}$ [N]	R_m [MPa]	Průměr R_m [MPa]
21	17 295,10	24,47	22,62
22	17 972,10	25,43	22,62
23	16 475,60	23,31	22,62
24	13 792,60	19,51	-
25	18 442,40	26,09	-
26	15 082,40	21,34	22,62
27	13 899,50	19,66	22,62
28	14 947,00	21,15	22,62
29	18 107,50	25,62	22,62
30	14 134,70	20,00	22,62

Směrodatná odchylka: 2,24 MPa

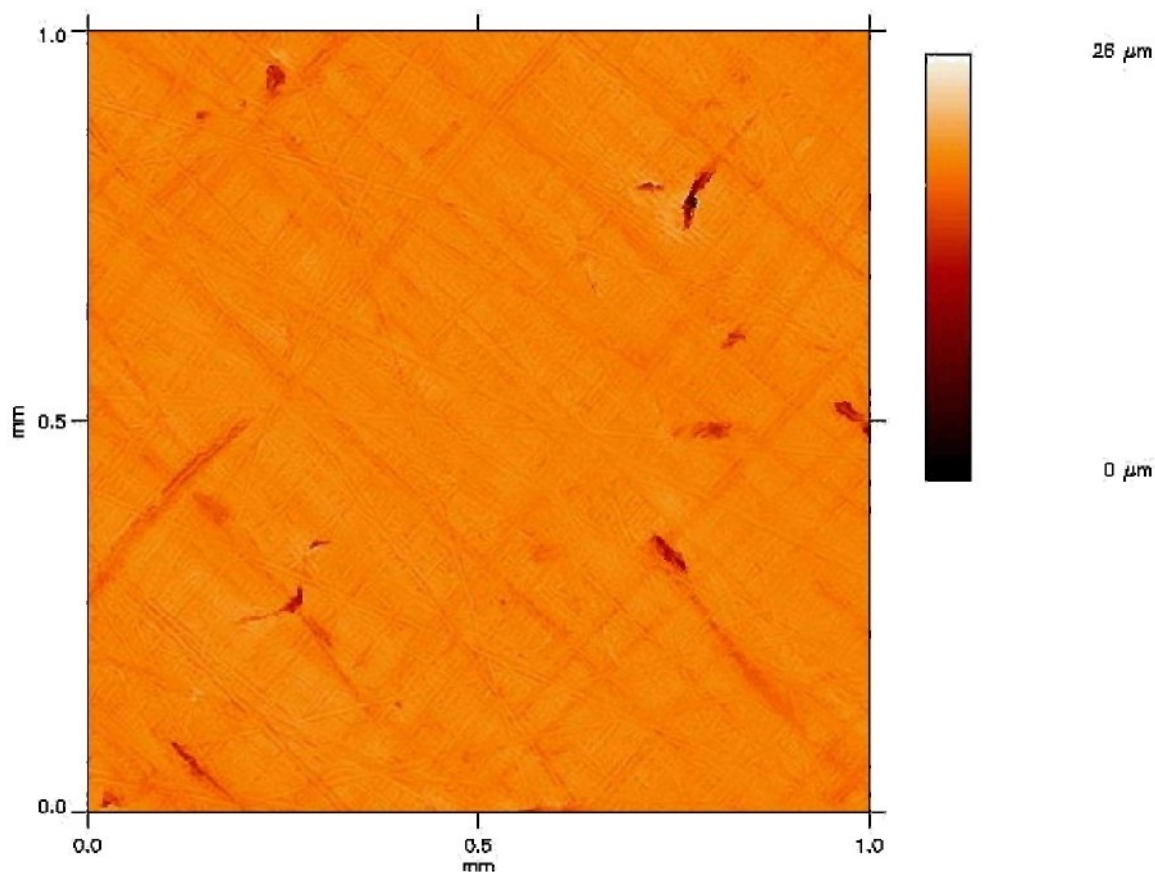


Graf 3 Vypočtené Rm vzorků broušených na sucho brusným papírem o zrnitosti 100

Z Tab. 6 a Grafu 3 vyplývá, že nejnižší hodnoty dosahuje vzorek 24 a nejvyšší hodnoty vzorek 25. Tyto vzorky jsem ze souboru hodnot vyloučil a nezapočítal je do průměrné hodnoty Rm a do směrodatné odchylky.



Graf 4 Vypočtené Rm vzorků broušených na sucho brusným papírem o zrnitosti 100 porovnané s průměrnou hodnotou Rm



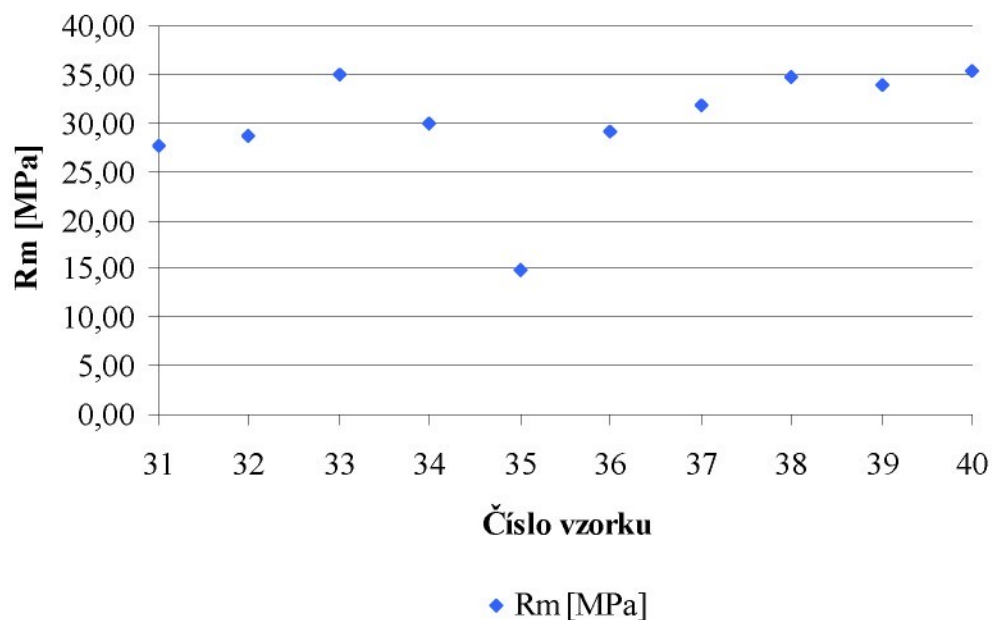
Obr. 13 Povrch vzorku broušeného na sucho brusným papírem o zrnitosti 100

3.14.6 Vzorky broušené na sucho brusným papírem o zrnitosti 220

Tab. 7 Vypočtené a naměřené hodnoty vzorků broušených na sucho brusným papírem o zrnitosti 220

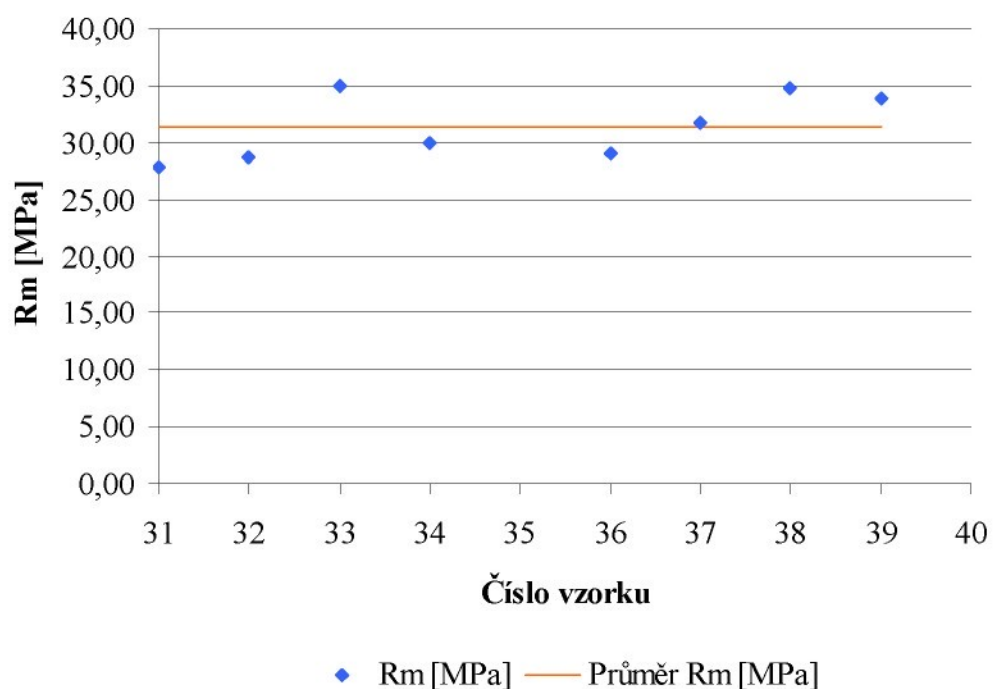
Číslo vzorku	$F_{\max}$ [N]	R_m [MPa]	Průměr R_m [MPa]
31	19 600,40	27,73	31,34
32	20 266,70	28,67	31,34
33	24 674,20	34,91	31,34
34	21 164,60	29,94	31,34
35	10 446,90	14,78	-
36	20 523,20	29,03	31,34
37	22 479,30	31,80	31,34
38	24 585,10	34,78	31,34
39	23 933,10	33,86	31,34
40	24 955,70	35,31	-

Směrodatná odchylka: 2,71 MPa

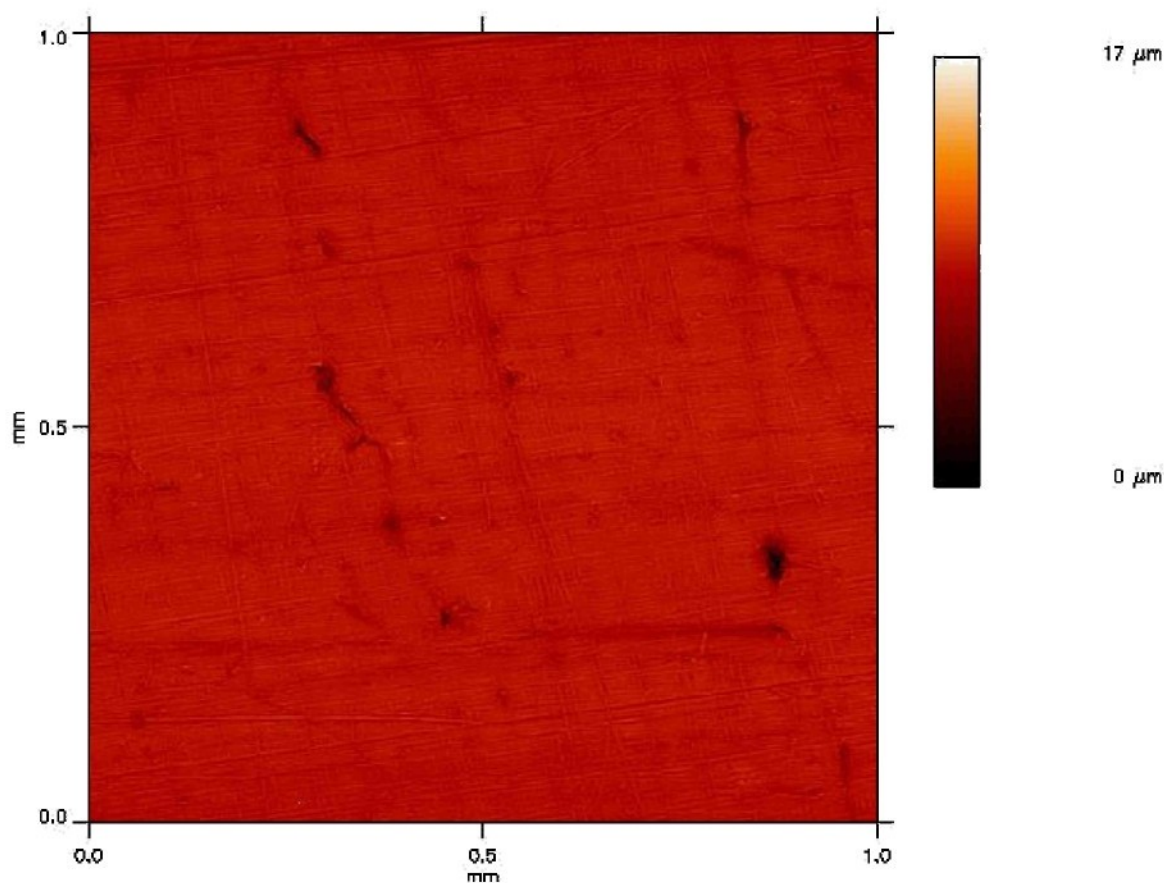


Graf 5 Vypočtené Rm vzorků broušených na sucho brusným papírem o zrnitosti 220

Z Tab. 7 a Grafu 5 vyplývá, že nejnižší hodnoty dosahuje vzorek 35 a nejvyšší hodnoty vzorek 40. Tyto vzorky jsem ze souboru hodnot vyloučil a nezapočítal je do průměrné hodnoty Rm a do směrodatné odchylky.



Graf 6 Vypočtené Rm vzorků broušených na sucho brusným papírem o zrnitosti 220 porovnané s průměrnou hodnotou Rm



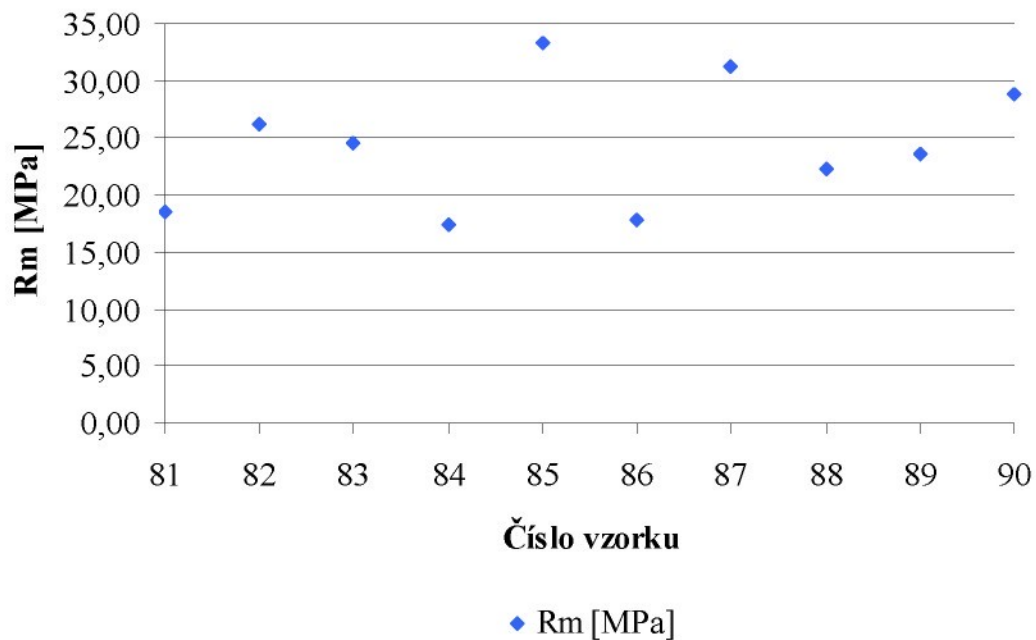
Obr. 14 Povrch vzorku broušeného na sucho brusným papírem o zrnitosti 220

3.14.7 Vzorky broušené na sucho brusným papírem o zrnitosti 320

Tab. 8 Vypočtené a naměřené hodnoty vzorků broušených na sucho brusným papírem o zrnitosti 320

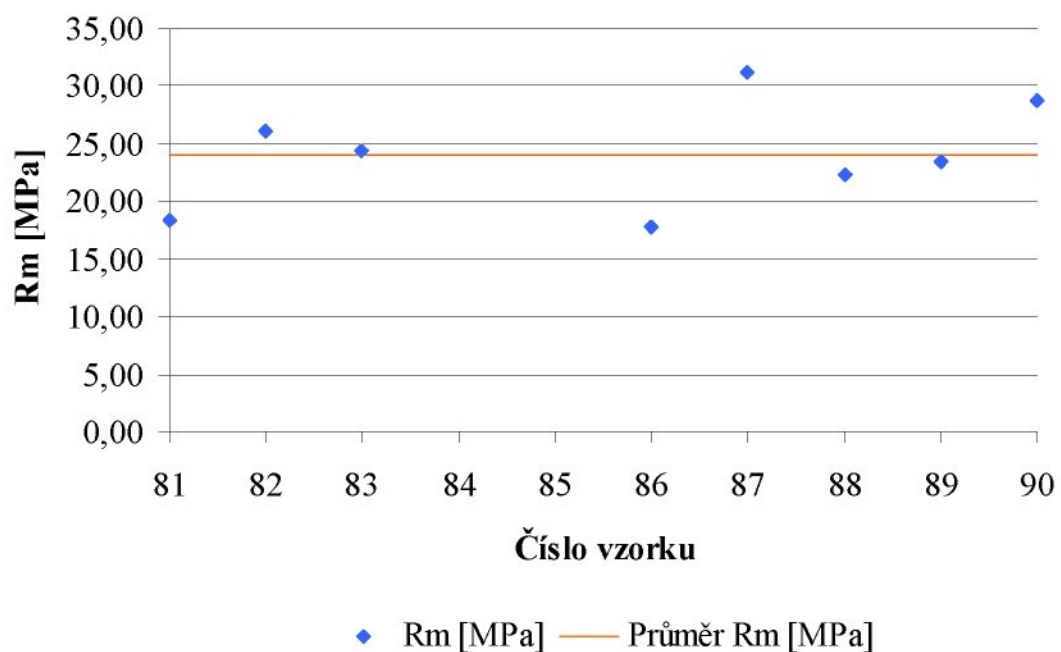
Číslo vzorku	$F_{\max}$ [N]	R_m [MPa]	Průměr R_m [MPa]
81	13 037,20	18,44	24,09
82	18 460,20	26,12	24,09
83	17 266,60	24,43	24,09
84	12 281,90	17,38	-
85	23 551,80	33,32	-
86	12 606,10	17,83	24,09
87	22 076,70	31,23	24,09
88	15 787,90	22,34	24,09
89	16 628,80	23,52	24,09
90	20 366,40	28,81	24,09

Směrodatná odchylka: 4,36 MPa

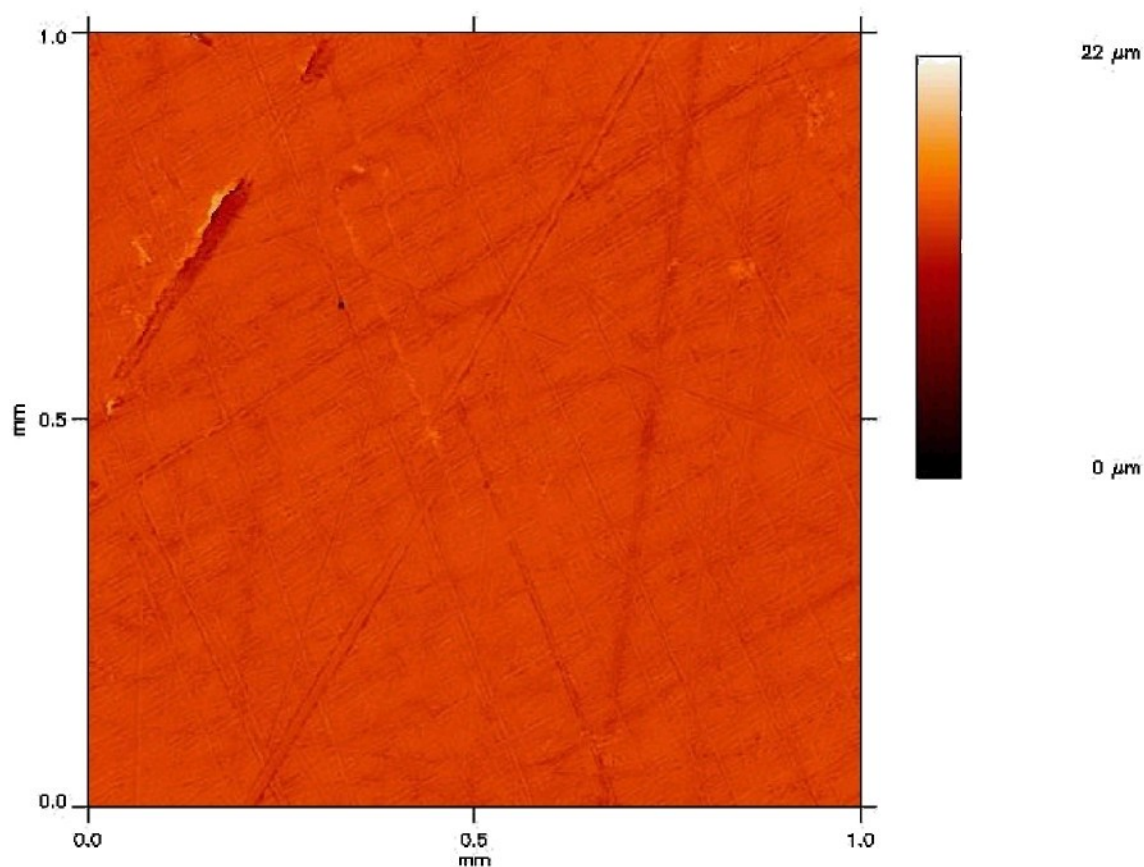


Graf 7 Vypočtené Rm vzorků broušených na sucho brusným papírem o zrnitosti 320

Z Tab. 8 a Grafu 7 vyplývá, že nejnižší hodnoty dosahuje vzorek 84 a nejvyšší hodnoty vzorek 85. Tyto vzorky jsem ze souboru hodnot vyloučil a nezapočítal je do průměrné hodnoty Rm a do směrodatné odchylky.



Graf 8 Vypočtené Rm vzorků broušených na sucho brusným papírem o zrnitosti 320 porovnané s průměrnou hodnotou Rm



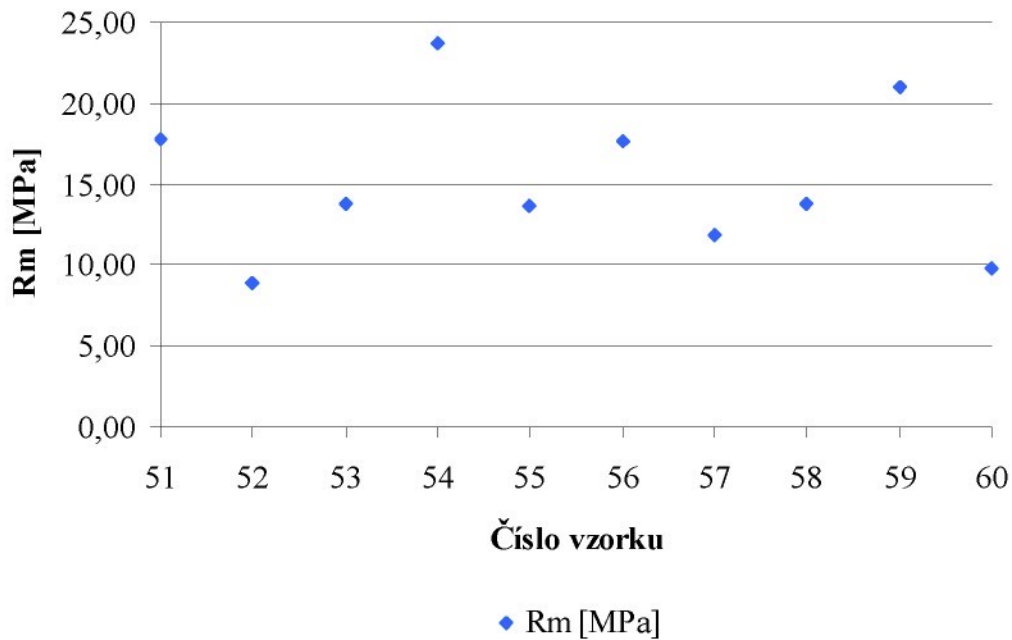
Obr. 15 Povrch vzorku broušeného na sucho brusným papírem o zrnitosti 320

3.14.8 Vzorky broušené pod vodou brusným papírem o zrnitosti 100

Tab. 9 Vypočtené a naměřené hodnoty vzorků broušených pod vodou brusným papírem o zrnitosti 100

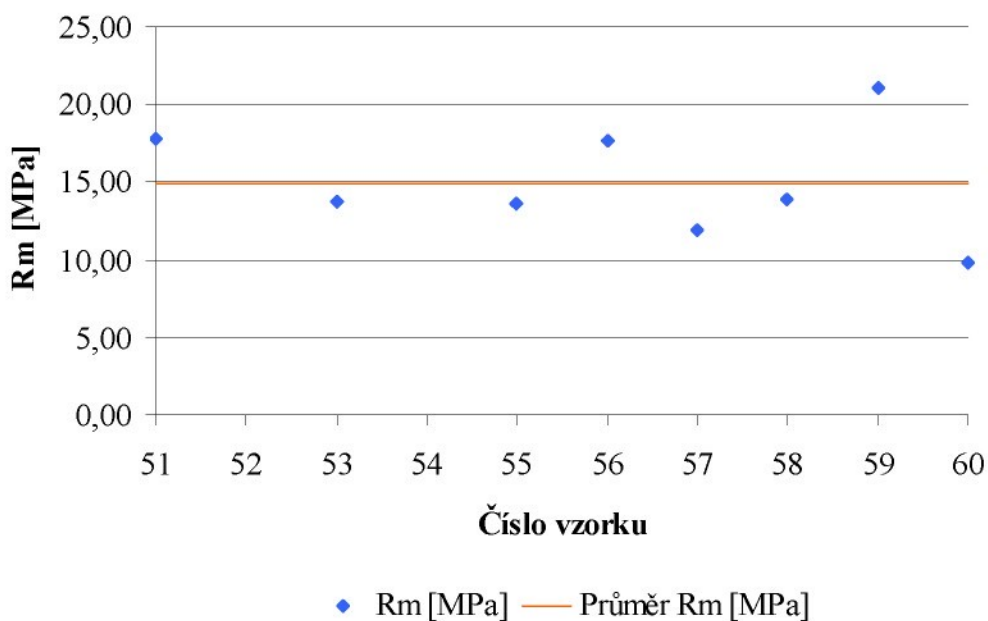
Číslo vzorku	$F_{\max}$ [N]	R_m [MPa]	Průměr R_m [MPa]
51	12 552,70	17,76	14,92
52	6 324,43	8,95	-
53	9 737,84	13,78	14,92
54	16 728,60	23,67	-
55	9 623,82	13,61	14,92
56	12 467,10	17,64	14,92
57	8 387,44	11,87	14,92
58	9 762,78	13,81	14,92
59	14 875,80	21,04	14,92
60	6 940,84	9,82	14,92

Směrodatná odchylka: 3,40 MPa



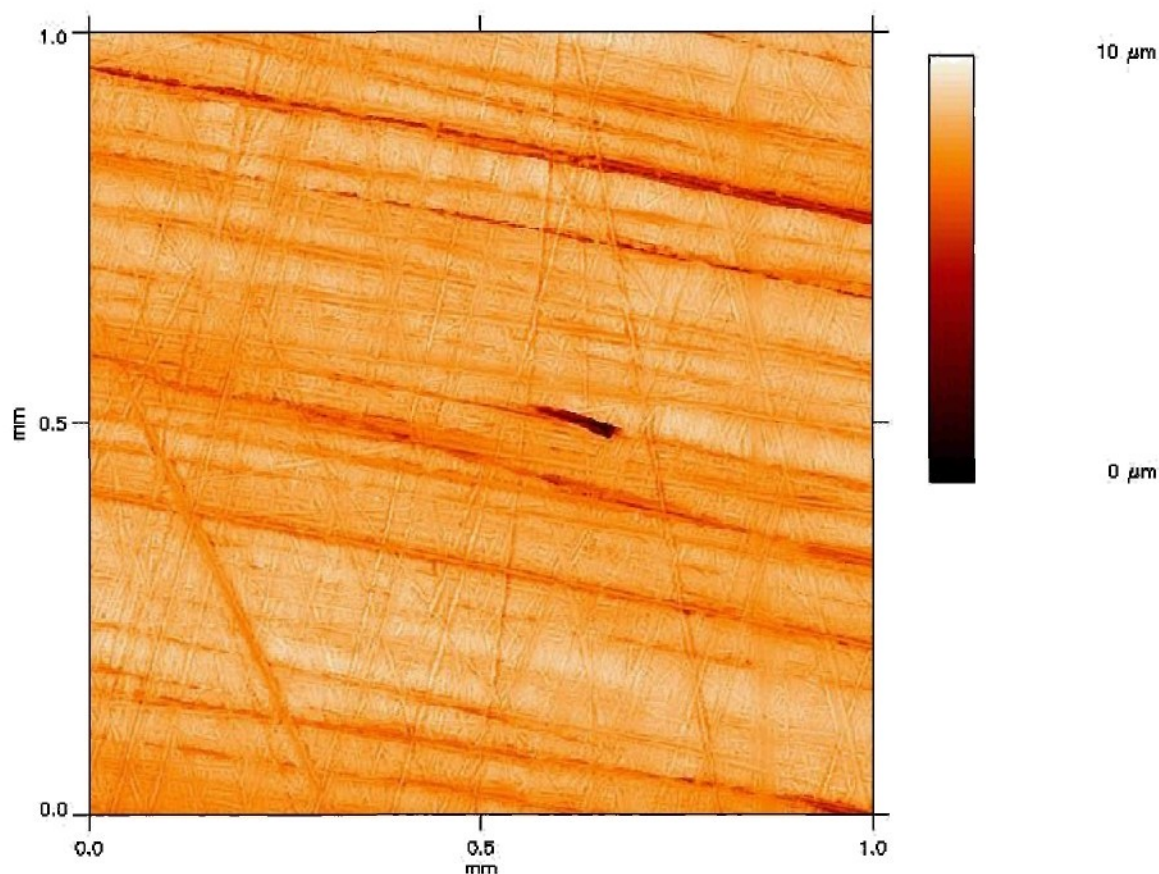
Graf 9 Vypočtené Rm vzorků broušených pod vodou brusným papírem o zrnitosti 100

Z Tab. 9 a Grafu 9 vyplývá, že nejnižší hodnoty dosahuje vzorek 52 a nejvyšší hodnoty vzorek 54. Tyto vzorky jsem ze souboru hodnot vyloučil a nezapočítal je do průměrné hodnoty Rm a do směrodatné odchylky.



Graf 10

Vypočtené Rm vzorků broušených pod vodou brusným papírem o zrnitosti 100 porovnané s průměrnou hodnotou Rm



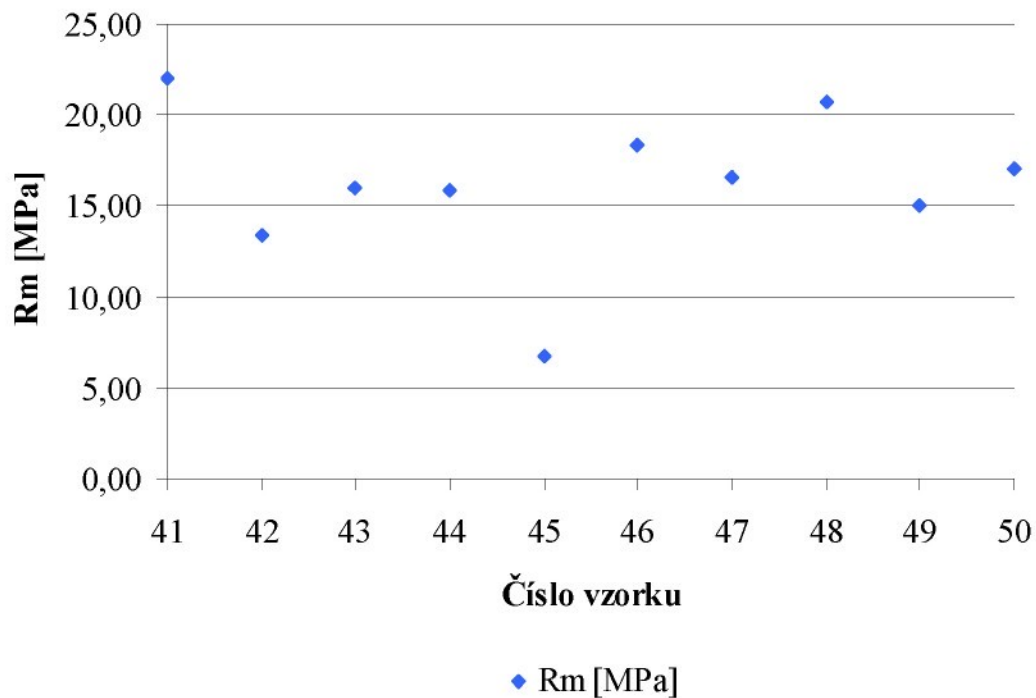
Obr. 16 Povrch vzorku broušeného pod vodou brusným papírem o zrnitosti 100

3.14.9 Vzorky broušené pod vodou brusným papírem o zrnitosti 220

Tab. 10 Vypočtené a naměřené hodnoty vzorků broušených pod vodou brusným papírem o zrnitosti 220

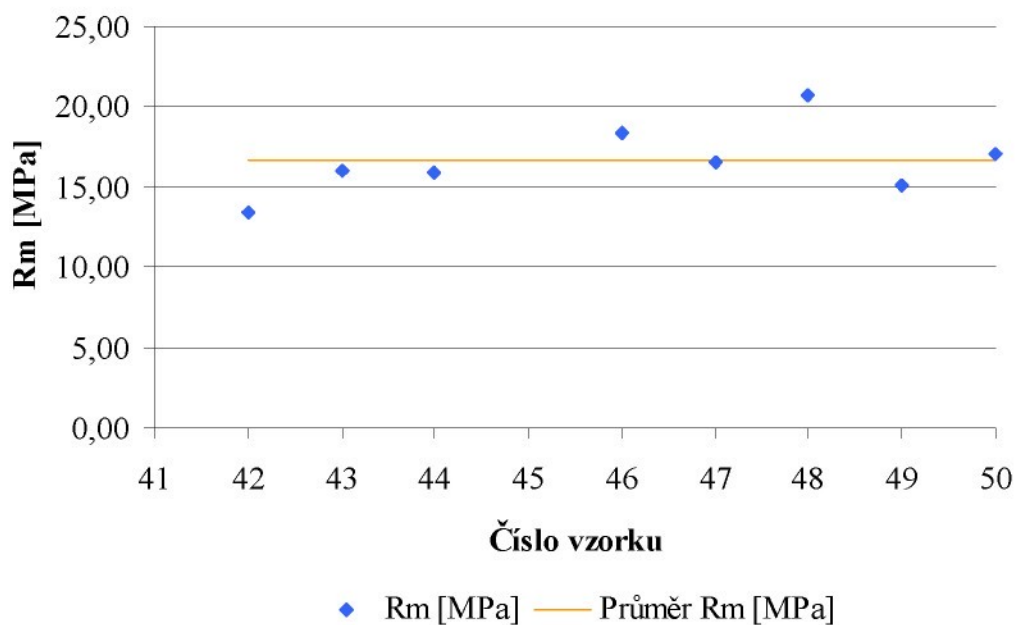
Číslo vzorku	$F_{\max}$ [N]	R_m [MPa]	Průměr R_m [MPa]
41	15 567,00	22,02	-
42	9 445,67	13,36	16,63
43	11 319,80	16,01	16,63
44	11 230,80	15,89	16,63
45	4 749,56	6,72	-
46	12 990,90	18,38	16,63
47	11 718,90	16,58	16,63
48	14 640,60	20,71	16,63
49	10 642,90	15,06	16,63
50	12 075,20	17,08	16,63

Směrodatná odchylka: 2,06 MPa

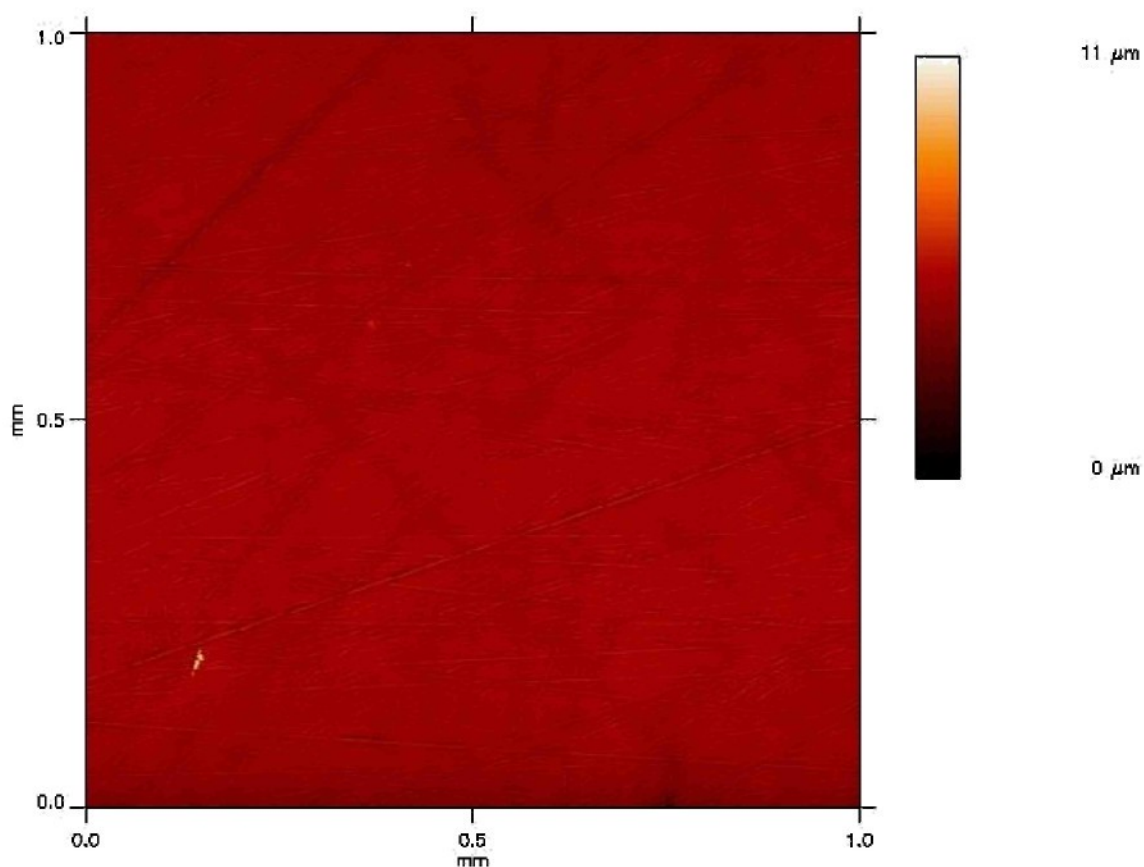


Graf 11 Vypočtené R_m vzorků broušených pod vodou brusným papírem o zrnitosti 220

Z Tab. 10 a *Grafu 11* vyplývá, že nejnižší hodnoty dosahuje vzorek 45 a nejvyšší hodnoty vzorek 41. Tyto vzorky jsem ze souboru hodnot vyloučil a nezapočítal je do průměrné hodnoty R_m a do směrodatné odchylky.



Graf 12 Vypočtené R_m vzorků broušených pod vodou brusným papírem o zrnitosti 220 porovnané s průměrnou hodnotou R_m



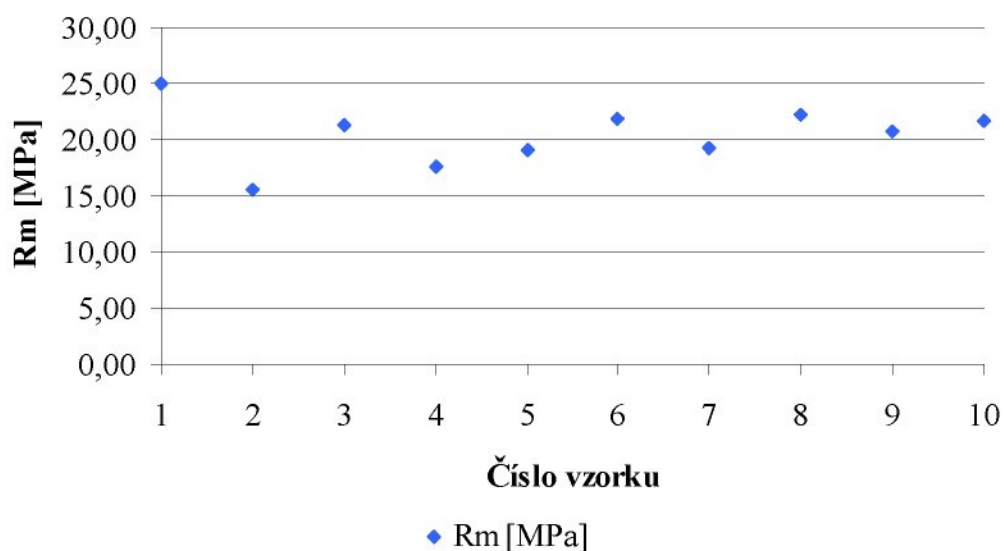
Obr. 17 Povrch vzorku broušeného pod vodou brusným papírem o zrnitosti 220

3.14.10 Vzorky broušené pod vodou brusným papírem o zrnitosti 320

Tab. 11 Vypočtené a naměřené hodnoty vzorků broušených pod vodou brusným papírem o zrnitosti 320

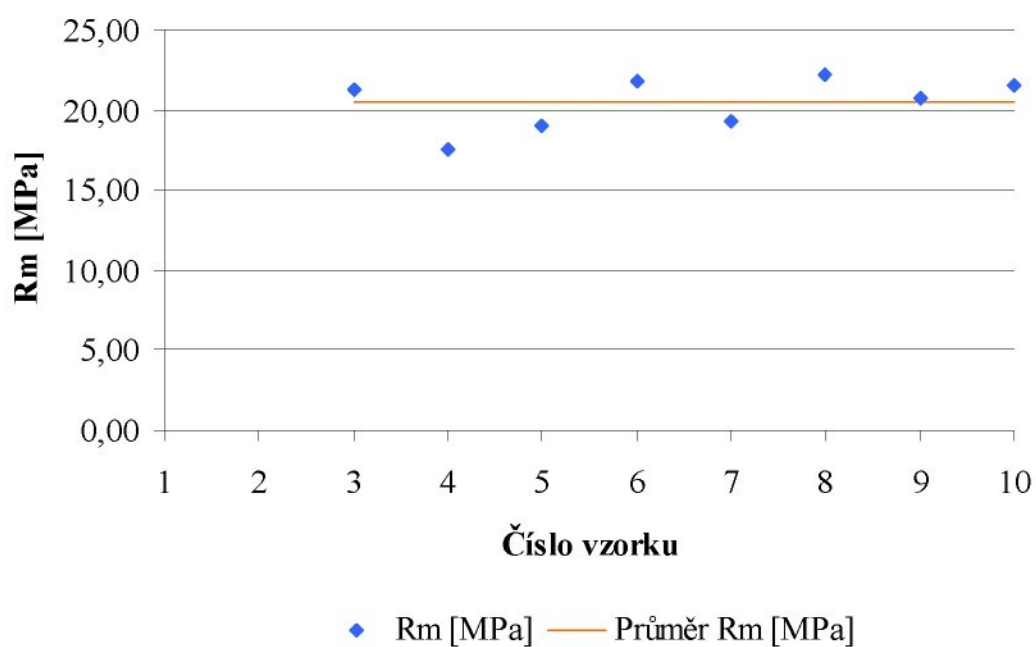
Číslo vzorku	$F_{\max}$ [N]	R_m [MPa]	Průměr R_m [MPa]
1	17 690,60	25,03	-
2	11 034,80	15,61	-
3	15 061,00	21,31	20,45
4	12 424,40	17,58	20,45
5	13 471,90	19,06	20,45
6	15 392,40	21,78	20,45
7	13 625,10	19,28	20,45
8	15 688,10	22,19	20,45
9	14 690,50	20,78	20,45
10	15 260,60	21,59	20,45

Směrodatná odchylka: 1,52 MPa

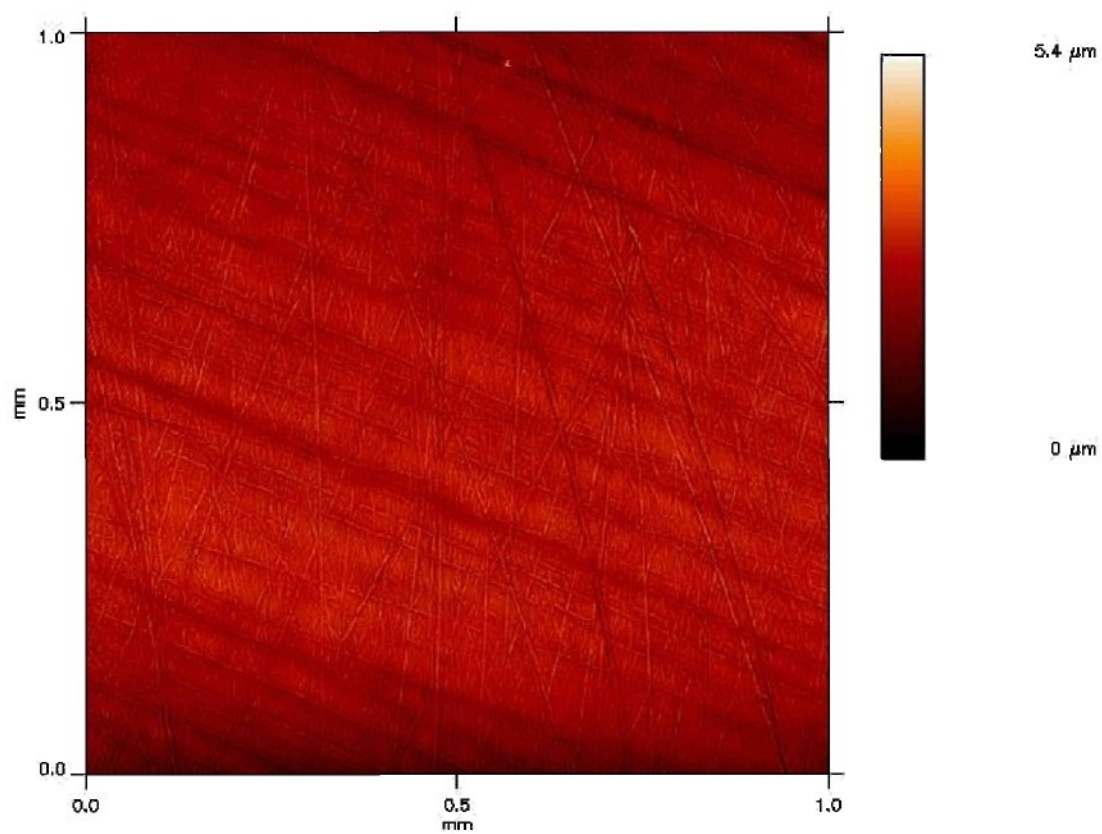


Graf 13 Vypočtené Rm vzorků broušených pod vodou brusným papírem o zrnitosti 320

Z Tab. 11 a Grafu 13 vyplývá, že nejnižší hodnoty dosahuje vzorek 2 a nejvyšší hodnoty vzorek 1. Tyto vzorky jsem ze souboru hodnot vyloučil a nezapočítal je do průměrné hodnoty Rm a do směrodatné odchylky.



Graf 14 Vypočtené Rm vzorků broušených pod vodou brusným papírem o zrnitosti 320 porovnané s průměrnou hodnotou Rm



Obr. 18 Povrch vzorku broušeného pod vodou brusným papírem o zrnitosti 320

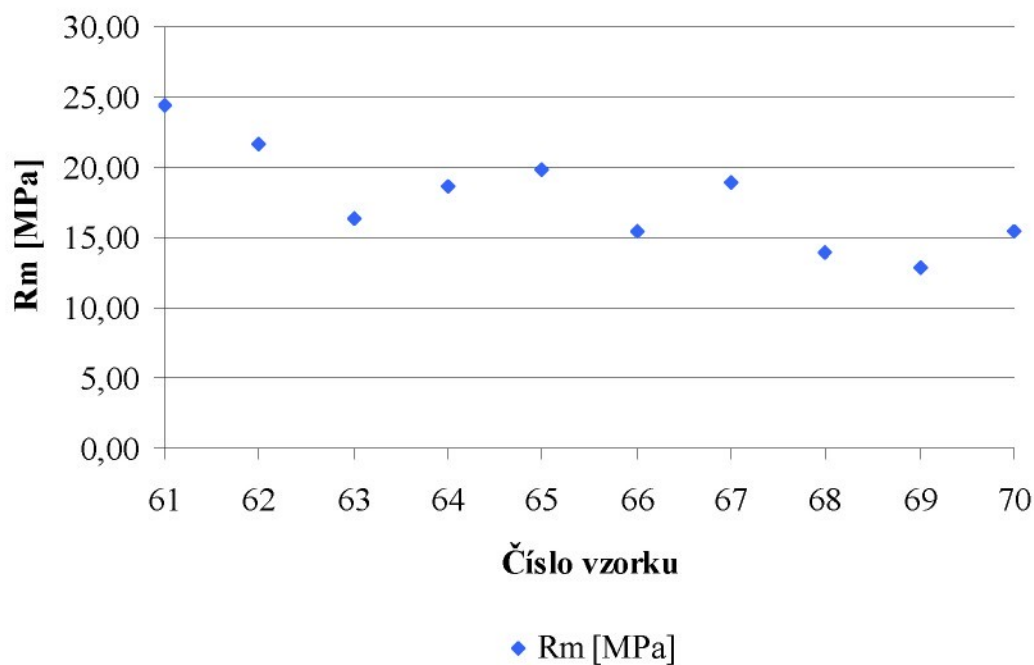
3.14.11 Vzorky vystavené čtyřdennímu působení par 10 % roztoku NaCl

Vzorky byly před působením par 10 % roztoku NaCl broušeny na sucho kombinací brusných papírů o zrnitosti 100 a 220.

Tab. 12 Vypočtené a naměřené hodnoty vzorků vystavených čtyřdennímu působení par 10 % roztoku NaCl

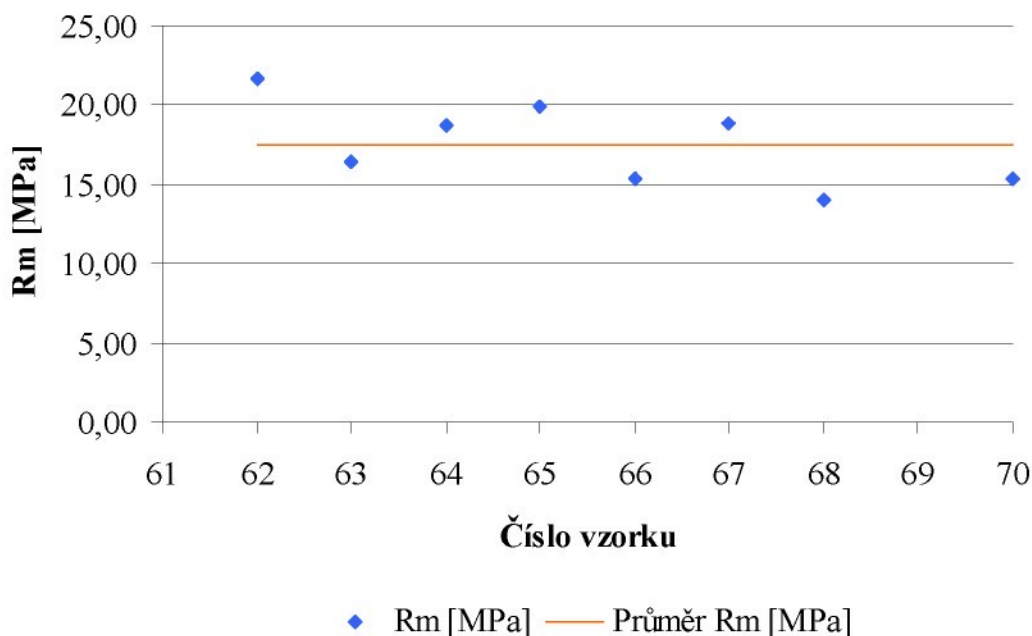
Číslo vzorku	$F_{\max}$ [N]	R_m [MPa]	Průměr R_m [MPa]
61	17 291,50	24,46	-
62	15 317,60	21,67	17,54
63	11 604,90	16,42	17,54
64	13 204,70	18,68	17,54
65	14 045,60	19,87	17,54
66	10 881,60	15,39	17,54
67	13 368,60	18,91	17,54
68	9 891,05	13,99	17,54
69	9 121,43	12,90	-
70	10 899,40	15,42	17,54

Směrodatná odchylka: 2,47 MPa



Graf 15 Vypočtené R_m vzorků vystavených čtyřdennímu působení par 10 % roztoku NaCl

Z Tab. 12 a Grafu 15 vyplývá, že nejnižší hodnoty dosahuje vzorek 2 a nejvyšší hodnoty vzorek 1. Tyto vzorky jsem ze souboru hodnot vyloučil a nezapočítal je do průměrné hodnoty R_m a do směrodatné odchylky.



Graf 16 Vypočtené R_m vzorků vystavených čtyřdennímu působení par 10 % roztoku NaCl porovnané s průměrnou hodnotou R_m

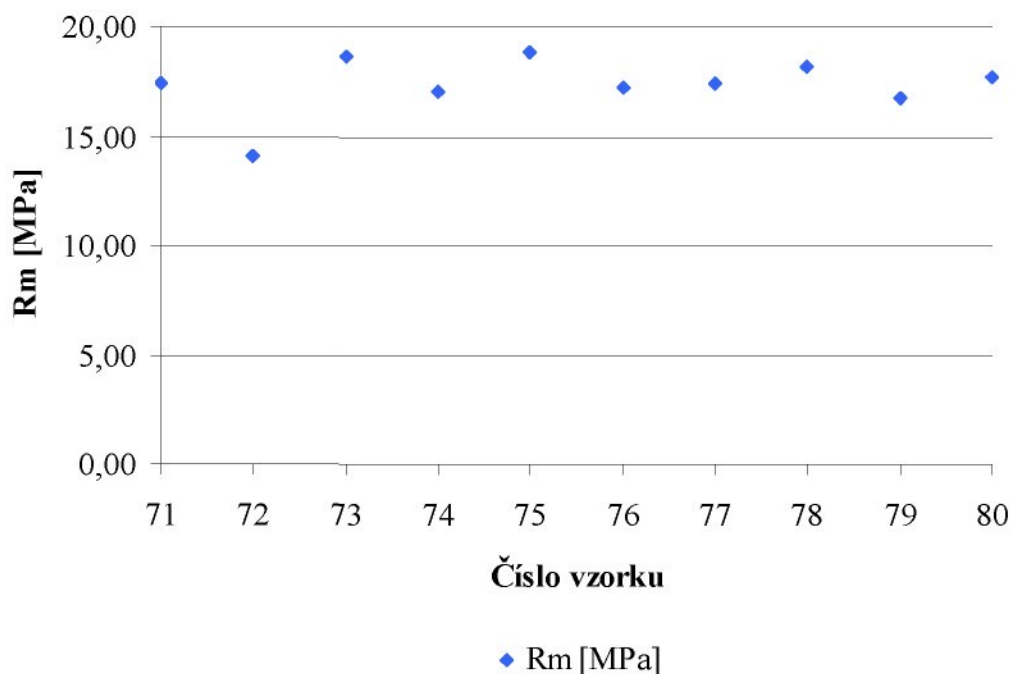
3.14.12 Vzorky vystavené čtyřdennímu působení par 10 % roztoku NaCl a slepeno epoxidovou pryskyřicí ChS Epoxy 371 s přídavkem 1 g Fe_2O_3 na 10 g ChS Epoxy 371

Vzorky byly před působením par 10 % roztoku NaCl broušeny na sucho kombinací brusných papírů o zrnitosti 100 a 220.

Tab. 13 Vypočtené a naměřené hodnoty vzorků vystavených čtyřdennímu působení par 10 % roztoku NaCl a slepených epoxidovou pryskyřicí ChS Epoxy 371 s přídavkem 1 g Fe₂O₃ na 10 g ChS Epoxy 371

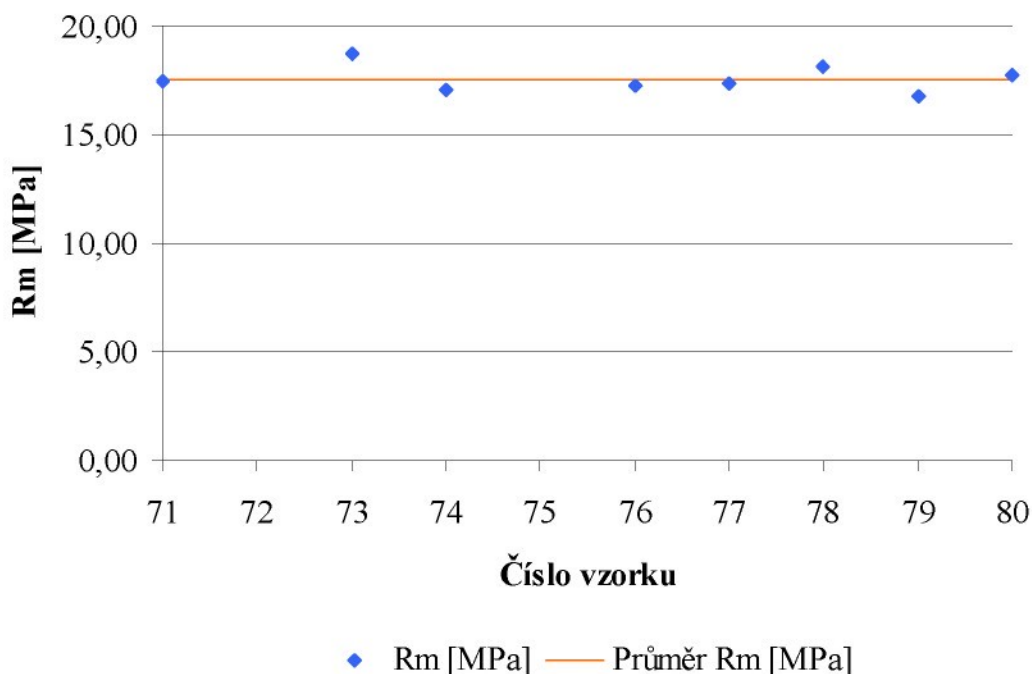
Číslo vzorku	F _{max} [N]	Rm [MPa]	Průměr Rm [MPa]
71	12 331,70	17,45	17,56
72	9 958,75	14,09	-
73	13 222,50	18,71	17,56
74	12 032,50	17,02	17,56
75	13 308,00	18,83	-
76	12 192,80	17,25	17,56
77	12 289,00	17,39	17,56
78	12 830,60	18,15	17,56
79	11 840,00	16,75	17,56
80	12 538,40	17,74	17,56

Směrodatná odchylka: 0,59 MPa



Graf 17 Vypočtené Rm vzorků vystavených čtyřdennímu působení par 10 % roztoku NaCl a slepených epoxidovou pryskyřicí ChS Epoxy 371 s přídavkem 1 g Fe₂O₃ na 10 g ChS Epoxy 371

Z Tab. 13 a Grafu 17 vyplývá, že nejnižší hodnoty dosahuje vzorek 2 a nejvyšší hodnoty vzorek 1. Tyto vzorky jsem ze souboru hodnot vyloučil a nezapočítal je do průměrné hodnoty R_m a do směrodatné odchylky.



Graf 18 Vypočtené R_m vzorků vystavených čtyřdennímu působení par 10 % roztoku NaCl a slepených epoxidovou pryskyřicí ChS Epoxy 371 s přídavkem 1 g Fe_2O_3 na 10 g ChS Epoxy 371 porovnané s průměrnou hodnotou R_m

4 HODNOCENÍ A DISKUSE VÝSLEDKŮ

Porovnáním naměřených hodnot pevností lepeného spoje pro různé povrchové úpravy zkušebních vzorků jsem dospěl k těmto závěrům:

Nejvyšší hodnoty pevnosti byly naměřeny u vzorků s povrchy pískovanými zrny písku o velikosti 0,6 mm.

Druhá nejvyšší pevnost byla zjištěna u vzorků broušených na sucho brusným papírem o zrnitosti 220.

Nejnižší pevnosti byly naměřeny u vzorků s povrchem upraveným broušením pod vodou brusným papírem o zrnitosti 100.

Druhá nejnížší pevnost byla zjištěna u vzorků broušených pod vodou brusným papírem o zrnitosti 220.

Vzorky broušené pod vodou dosahovaly nižších pevností než vzorky broušené na sucho. Hlavní příčinou byla pravděpodobně rychlejší oxidace povrchu než u vzorků broušených na sucho, která způsobila změnu smáčecího úhlu i volné povrchové energie lepené plochy, z čehož by poté vyplynula menší adheze lepidla k povrchu vzorku.

Tato oxidace by mohla být vysvětlena přítomností vody při broušení a jejího působení na povrchu vzorku v době mezi broušením a sušením vzorku. Přestože jsem se snažil tuto dobu zkrátit na minimum došlo ke snížení pevnosti lepeného spoje.

Vliv koroze na pevnost lepeného spoje prokázalo i čtyřdenní působení par 10 % vodného roztoku NaCl. Přestože tyto vzorky byly broušeny na sucho, nejvhodnější kombinací brusných papírů, byla při čtyřdenním působení par 10 % roztoku NaCl a následném slepení zjištěna nižší pevnost lepeného spoje než u vzorků broušených na sucho. Na zvýšení pevnosti lepeného spoje u takto upravených lepených ploch (čtyřdenní působení par 10 % roztoku NaCl) nemělo vliv ani přidání 1 g Fe_2O_3 do 10 g epoxidové pryskyřice ChS Epoxy 371.

Snížení pevnosti lepeného spoje v případě povrchu broušeného pod vodou by mohlo být také způsobeno stopovým (mikroskopickým) množstvím vody, jejíž zbytky mohou ulpět na dnech nerovností a v pórech materiálu.

Ze snímků povrchů po jednotlivých úpravách je zřejmé, že povrchy vzorků se výrazně liší. Jak je patrné z obrázků, povrchy upravené pískováním mají větší měrný povrch než povrchy upravené broušením pod vodou a současně dosahují nejvyšších hodnot pevností lepeného spoje.

5 ZÁVĚR

Cílem bakalářské práce bylo zhodnotit pevnost lepeného spoje a vlivy, které tuto pevnost mohou ovlivnit, především úpravy povrchu spoje.

Bakalářská práce je rozdělena do dvou hlavních částí.

V teoretické části jsou popsány vlastnosti lepeného spoje, jeho poruchy. Dále je v teoretické části uvedeno rozdělení lepidel vhodných k lepení konstrukčních materiálů.

V experimentální části je charakterizováno lepidlo, tvrdidlo a je zde uveden popis zkušebních vzorků a jejich povrchových úprav. Dále je v experimentální části popsána metoda měření, jsou zde uvedeny naměřené hodnoty, postup jejich vyhodnocení a následné porovnání výsledků v grafech a tabulkách.

Vliv způsobu povrchové úpravy na pevnost lepeného spoje byl hodnocen pomocí mechanické zkoušky tahem.

Pro nasnímáné profilu povrchu zkušebního vzorku bylo použito optického profilometru MicroProf se senzorem CWL.

Výsledky měření lze shrnout do následujících doporučení:

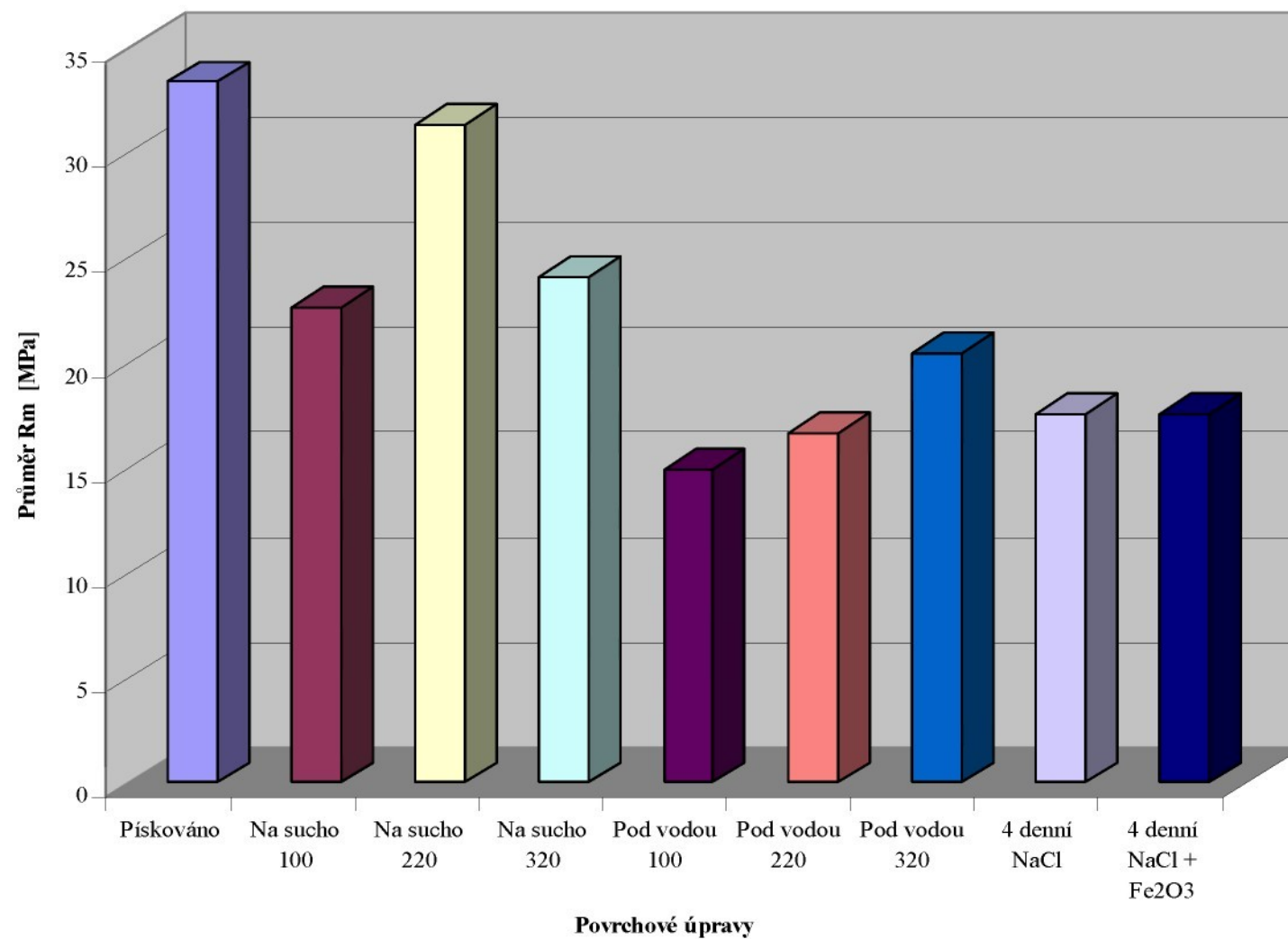
- 1) zajistit podmínky technologie lepení tak, aby byl celý povrch lepeného spoje upravován pískováním;
- 2) upřednostnit úpravy povrchu na sucho;
- 3) zajistit co nejkratší dobu mezi úpravou povrchu a vlastním lepením.

6 POUŽITÁ LITERATURA

- [1] Peterka, J. *Lepení konstrukčních materiálů ve strojírenství*. 1. vydání. Praha. SNTL. 1980. ISBN-.
- [2] Lidařík, M. a kol. *Epoxidové pryskyřice*. Makromolekulární látky. svazek 6. 3. vydání. Praha. SNTL. 1983. ISBN-.
- [3] SPOLCHEMIE, *Technický list ChS Epoxy 371 – (podniková norma)*. [online]. [cit. 10. 2. 2006]. dostupné na: http://www.havel-composites.com/proddocs/techlist_080604232326tech.listCHS-EPOXY371.pdf
- [4] SPOLCHEMIE, *Datasheet. ChS tvrdidlo P 11*. [online]. [cit. 10. 2. 2006]. dostupné na: <http://www.spolchemie.cz/eDoc/dts/4E22D1A2-3DA2-46AD-B658-E42270F1C54F.pdf>
- [5] Kolibal, Z., Vavřík, I., Knoflíček, R. *Studijní opora – interní učební texty-Přednášky z předmětu: „Technologičnost konstrukce oprav (retrofitingu) výrobních strojů“*. [online]. Brno: VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ, FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ, ÚSTAV VÝROBNÍCH STROJŮ, SYSTÉMŮ A ROBOTIKY, listopad 2003. [cit. 10. 2. 2006]. dostupné na: <http://www.fme.vutbr.cz/opory/pdf/uvssr/retrofit/retrofit.pdf>
- [6] Humár, A. Ústav strojírenské technologie. *Sylaby předmětu TECHNOLOGIE MONTÁŽE - kap. Montážní spoje*. [online]. [cit. 10. 2. 2006]. dostupné na: <http://www.fme.vutbr.cz/opory/pdf/TechnMontaze.pdf>
- [7] Osten, M., Mleziva, J. *Práce s lepidly a tmely*. Grada Publishing. 1996
- [8] SPOLCHEMIE, *Bezpečnostní karta. ChS tvrdidlo P 11*. [online]. [cit. 10. 2. 2006]. dostupné na: <http://www.spolchemie.cz/eDoc/BKV/B41AFD9C-5287-428B-90F4-5734BF706204.pdf>
- [9] Förlbacher, I., Macek, K., Steidl, J. a kol. *Lexikon technických materiálů*. svazek 1. Verlag Dashöfer. březen 2006
- [10] Etiketa na plechovce epoxidové pryskyřice ChS Epoxy 371
- [11] Webová prezentace firmy ALTECO. [online]. [cit. 16. 5. 2006]. dostupné na: <http://www.alteco.cz/>
- [12] Webová prezentace firmy UHU. [online]. [cit. 16. 5. 2006]. dostupné na: <http://www.uhu.cz/>

7 SEZNAM PŘÍLOH

1. Výkres zkušebního vzorku
2. Výkres upínací tyče
3. Výkres brusného přípravku
4. Graf porovnání průměrných hodnot pevností



Příloha 4. Graf porovnání průměrných hodnot pevností