

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA TECHNOLOGIÍ A MĚŘENÍ

DIPLOMOVÁ PRÁCE

**Měření mechanických a elektrických vlastností pájeného
spoje**

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Petr MALÝ**

Osobní číslo: **E11N0025P**

Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**

Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**

Název tématu: **Měření mechanických a elektrických vlastností pájeného spoje**

Zadávací katedra: **Katedra technologií a měření**

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

1. Popište základní technologické postupy používané při výrobě pájených spojů i jednotlivé vlivy mající přímou vazbu na spolehlivost pájeného spoje.
2. Popište základní principy, konstrukční uspořádání a měřicí postupy používané při měření přechodového odporu a mechanické pevnosti pájených spojů.
3. Pro dodané vzorky solárních článků změřte přechodový odpor pájeného spoje na přechodu "solární článek-sběrnice" a sílu nutnou k odtržení připájené sběrnice.
4. Proveďte základní statistickou analýzu naměřených dat a korelační analýzu výsledků mechanických a elektrických zkoušek.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**

Rozsah pracovní zprávy: **30 - 40 stran**

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**


Seznam odborné literatury:

1. M. Ashby, H. Shercliff and D. Cebon. **Materials: engineering, science, processing and design. 2nd ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2010. ISBN 978-185-6178-952.**
2. **České technické normy.**
3. **Elektronické informační zdroje (databáze SCIENCE DIRECT, Interscience-Wiley apod.)**


Vedoucí diplomové práce: **Doc. Ing. Radek Polanský, Ph.D.**
Katedra technologií a měření

Datum zadání diplomové práce: **15. října 2012**

Termín odevzdání diplomové práce: **9. května 2013**


Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.
děkan




Doc. Ing. Vlastimil Skočil, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2012

Abstrakt

Cílem diplomové práce „Měření mechanických a elektrických vlastností pájeného spoje“ je experimentálně změřit zadané vzorky solárních článků a určit teplotu a čas pájení, které jsou optimální pro výrobu daného pájeného spoje. Nejdříve byl u testovaných vzorků změřen přechodový odpor, jehož hodnota byla nejnižší u článků s teplotou pájení 160,75 °C. Přechodový odpor byl měřen nepřímou metodou pomocí nanovoltmetru a zdroje konstantního proudu. Poté následovalo měření mechanické pevnosti pájeného spoje. Toto měření bylo provedeno na zkušebním trhacím stroji. Nejvyšší mechanickou pevnost opět vykazovaly sběrnice solárních článků pájené při teplotě 160,75 °C. Výsledky měření prokázaly, že optimální podmínky pro výrobu sběrnice solárního článku jsou teplota pájení 160,75 °C a čas pájení 30 ms.

Klíčová slova

Fotovoltaický článek; pájený spoj; přechodový odpor; mechanická pevnost; statistická analýza.

Abstract

The aim of the master thesis „Measurement of mechanical and electrical properties of solder connection“ is to carry out an experimental measurement of solar cells and determine the optimum temperature and time for the production of solder connection. At first was in the tested samples measured contact resistance which value was the lowest for cells with soldering temperature 160,75 °C. The contact resistance was measured by an indirect method using nanovoltmeter and constant current source. The measuring of the mechanical strength of the solder connection was the next step of this thesis. This measurement was performed on the universal testing machine. Buses of solar cells which were soldered at a temperature of 160,75 °C showed the highest mechanical strength again. The measurements results showed that the optimum conditions for the production of bus of solar cell are temperature of soldering 160,75 °C and time of soldering 30 ms.

Keywords

Photovoltaic cell; solder connection; contact resistance; mechanical strength; statistical analysis.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této diplomové práce, je legální.

.....
podpis

V Plzni dne 1.5.2013

Bc. Petr Malý

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Radku Polanskému, Ph.D., za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce. Dále bych rád poděkoval společnosti LINTECH-SOLAR, jmenovitě Ing. Václavu Šavelovi, Ph.D. za poskytnutí vzorků pro experimentální měření.

Obsah

OBSAH	7
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	9
ÚVOD	10
1 PÁJENÍ	11
1.1 RUČNÍ PÁJENÍ	13
1.2 STROJNÍ PÁJENÍ	14
1.2.1 Pájení přetavením	14
1.2.2 Pájení vlnou	15
1.3 VLASTNOSTI PÁJENÉHO SPOJE	16
1.3.1 Životnost pájeného spoje.....	16
1.3.2 Spolehlivost pájeného spoje.....	17
2 MECHANICKÉ VLASTNOSTI PÁJENÉHO SPOJE	19
2.1 ZÁKLADNÍ DRUHY ZKOUŠEK MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ	20
2.2 ÚVOD DO MECHANICKÝCH ZKOUŠEK	20
2.3 ZKOUŠKA PEVNOSTI V TAHU	21
3 PŘECHODOVÝ ODPOR PÁJENÉHO SPOJE	23
3.1 PŘECHODOVÝ ODPOR ELEKTRICKÉHO KONTAKTU	23
3.2 MĚŘENÍ PŘECHODOVÉHO ODPORU	24
4 FOTOVOLTAICKÝ ČLÁNEK	26
4.1 HISTORIE FOTOVOLTAICKÉHO ČLÁNKU	26
4.2 DĚLENÍ FOTOVOLTAICKÝCH ČLÁNKŮ	27
4.2.1 Monokrystalické články.....	27
4.2.2 Polykrystalické články.....	28
4.2.3 Tenkovrstvé články.....	29
4.3 KONSTRUKCE, VÝROBA A RECYKLACE FOTOVOLTAICKÝCH PANELŮ.....	30
5 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST PRÁCE	33
5.1 PARAMETRY SOLÁRNÍCH ČLÁNKŮ	33
5.2 ZNAČENÍ SOLÁRNÍCH ČLÁNKŮ	35
5.3 PŘÍPRAVA VZORKŮ PŘED MĚŘENÍM	36
5.4 MĚŘENÍ PŘECHODOVÉHO ODPORU	38
5.4.1 Zpracování hodnot.....	40
5.4.2 Naměřené a zpracované hodnoty z první části měření.....	40
5.4.3 Naměřené a zpracované hodnoty z druhé části měření.....	43
5.5 MĚŘENÍ MECHANICKÉ PEVNOSTI.....	47
5.5.1 Zpracování hodnot.....	49
5.5.2 Naměřené a zpracované hodnoty z první části měření.....	49
5.5.3 Naměřené a zpracované hodnoty z druhé části měření.....	52
6 KORELAČNÍ ANALÝZA VÝSLEDKŮ MĚŘENÍ	56
6.1 VÝPOČET KORELAČNÍHO KOEFICIENTU A TEST VÝZNAMNOSTI.....	56
6.2 PRVNÍ ČÁST MĚŘENÍ	58
6.3 DRUHÁ ČÁST MĚŘENÍ	59
7 DOSAŽENÉ VÝSLEDKY MĚŘENÍ	65
8 ZÁVĚR	66

SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	67
SEZNAM PŘÍLOH.....	69
PŘÍLOHY	70
PŘÍLOHA A FOTODOKUMENTACE Z VÝROBNY SOLÁRNÍCH PANELŮ.....	70
PŘÍLOHA B PODROBNÁ SPECIFIKACE POUŽITÝCH MĚŘICÍCH PŘÍSTROJŮ	76
PŘÍLOHA C NAMĚŘENÉ HODNOTY PŘECHODOVÉHO ODPORU Z PRVNÍ ČÁSTI MĚŘENÍ.....	80
PŘÍLOHA D NAMĚŘENÉ HODNOTY PŘECHODOVÉHO ODPORU Z DRUHÉ ČÁSTI MĚŘENÍ.....	85
PŘÍLOHA E SOLÁRNÍ ČLÁNKY PŘED A PO TESTOVÁNÍ PEVNOSTI V TAHU	94
PŘÍLOHA F UKÁZKA STATISTICKÉ ANALÝZY V PROGRAMU MINITAB	95
PŘÍLOHA G PRŮBĚHY SÍLY ZAZNAMENANÉ Z PRVNÍ ČÁSTI MĚŘENÍ	95
PŘÍLOHA H PRŮBĚHY SÍLY ZAZNAMENANÉ Z DRUHÉ ČÁSTI MĚŘENÍ.....	107

Seznam použitých symbolů a zkratk

FV..... Fotovoltaický

ppm..... Parts per million

DPS..... Deska plošných spojů

SMD..... Surface mount device

THT..... Through-hole technology

ČSN..... Česká technická norma

EN..... Evropská norma

ISO..... International Organization for Standardization

EVA..... Ethylen Vinyl Acetate

Úvod

Žijeme ve světě, který potřebuje stále větší množství elektrické energie. Převážná část této energie je vyprodukována z neobnovitelných zdrojů (ropa, uhlí, zemní plyn). Tyto neobnovitelné zdroje se postupně spotřebovávají a tak nastává otázka „Co bude dál?“. Tento problém částečně řeší obnovitelné zdroje, mezi které patří např. větrná energie, vodní energie, nebo sluneční záření. Právě energie získaná pomocí slunečního záření představuje ideální nevyčerpatelný zdroj energie. Obor zabývající se přeměnou slunečního záření na elektrickou energii se nazývá fotovoltaika. Přeměna slunečního záření na elektrickou energii je popsána fotovoltaickým jevem. Zařízením, které tento převod realizuje, je solární článek. Nejpoužívanějším materiálem pro výrobu solárních článků je křemík, který dosahuje dobré účinnosti přeměny slunečního záření na elektrickou energii.

Fotovoltaika je dnes velmi žádaným a leckdy jediným možným řešením. Je tedy důležité tuto technologii neustále vyvíjet a inovovat. Měření a soustavné zlepšování výrobních procesů je součástí každého průmyslového odvětví a u alternativních zdrojů energie to platí dvojnásob. Předložená diplomová práce se zabývá měřením přechodového odporu a mechanické pevnosti pájeného spoje solárního článku. Na tomto projektu se podílela Katedra technologií a měření Fakulty elektrotechnické Západočeské univerzity ve spolupráci se společností LINTECH-SOLAR, která vyrábí fotovoltaické panely.

1 Pájení

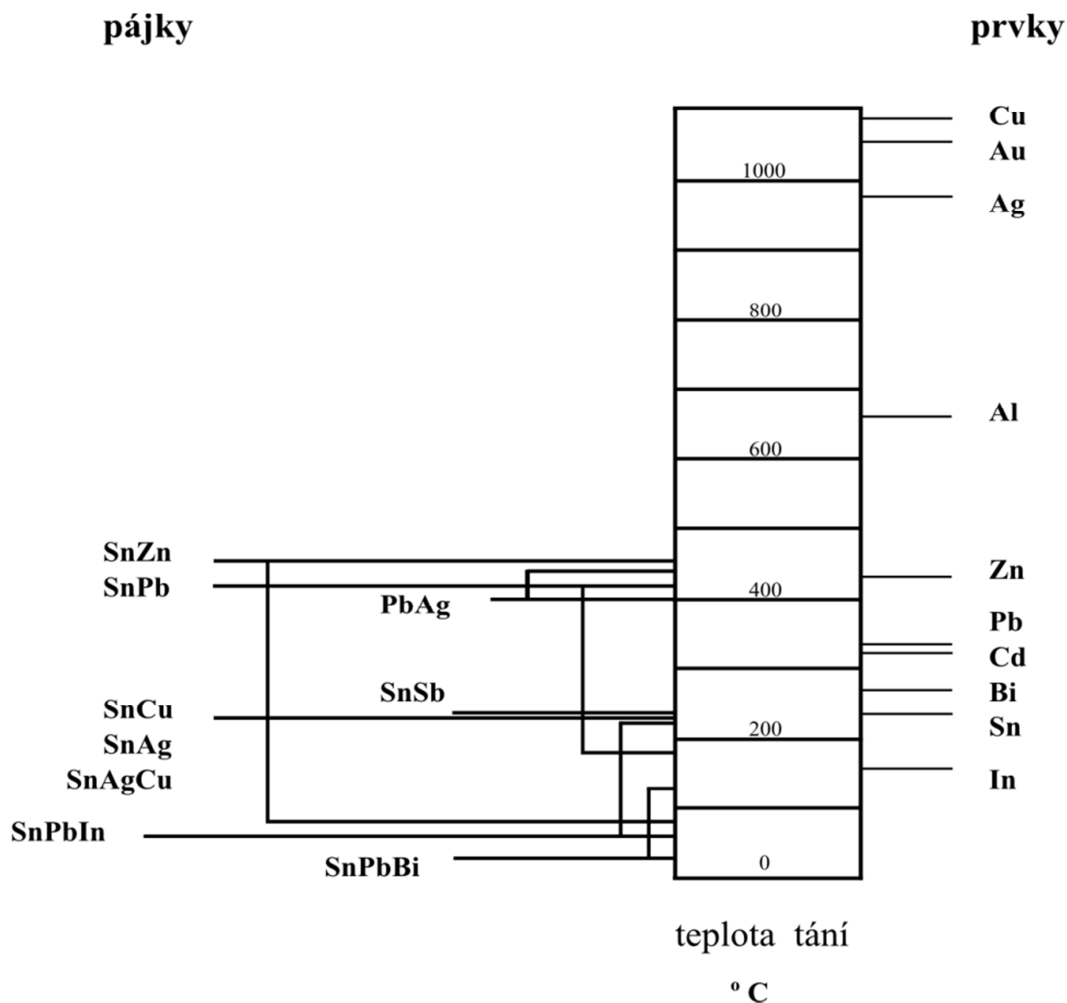
První kapitolou této diplomové práce je pájení. Tato kapitola je v práci uvedena, jelikož všechna měření spojená s touto diplomovou prací probíhala na pájených spojích (sběrnicích) solárních článků.

Pájení je metalurgický způsob spojování materiálů. U pájení se na rozdíl od svařování netaví spojované díly, a tedy nevzniká z nich nová slitina. Taví se jen přídatný kovový materiál, který následně tuhne. Tento přídatný materiál je pájecí slitina (pájka). Teplota tavení pájky musí být vždy nižší, než je teplota tavení spojovaných částí. Pro obvyklé montážní práce v elektronice se užívá tzv. měkké pájení, které je charakterizováno teplotou tavení do 450 °C. Pájky pro měkké pájení jsou v elektronice tvořeny těžkými kovy s nízkou teplotou tavení. Dříve byly pájky tvořeny především slitinami olova a cínu, ke kterým se přidávalo několik procent dalšího kovu, nejčastěji stříbra či antimonu. Použití olova¹ je dnes ale silně omezeno. Dle legislativy Evropské unie musely být staženy z trhu zařízení, která obsahovala větší množství nebezpečných látek. Nebezpečné látky jsou především těžké kovy, mezi které olovo jednoznačně patří. Na *Obr. 1* jsou znázorněny materiály, které se používají pro měkké pájky a jejich slitiny. Nejpoužívanějším typem pájek jsou pájky cínové, které se výborně spojují skoro se všemi kovy. [1, 2, 3]

V pájecím procesu se vyskytuje ještě jedna velice důležitá složka, která nesmí být opomíjena, tavidlo. Základním úkolem tavidla je redukovat oxidové vrstvy, které vznikají v průběhu pájení na povrchu pájeného předmětu. Povrch musí dobře smáčet, ale také chránit již očištěný kov a pájku před další oxidací. Tavidlo musí mít správnou viskozitu, aby napomohlo k dobrému roztékání pájky. Každý pájený spoj proto musí mít jak funkční spolehlivost², tak časovou stálost požadovaných vlastností. Pájené spoje se nehodnotí pouze z pohledu tvorby pájeného spoje, ale také z hlediska možného ohrožení budoucí funkce elektronického zařízení. Při procesu pájení se totiž vytvářejí korozně aktivní a elektricky vodivé zbytky tavidel, které jsou nežádoucí a jejich odstranění je nesnadné a někdy i finančně nákladné. Nejrozšířenějšími tavidly jsou tavidla kalafunová, jejichž základem je přírodní pryskyřice. [2]

¹ Více o použití olova a o bezolovnatém pájení např. v [3].

² Definice spolehlivosti dle ČSN IEC 50 (191): „Spolehlivost je vyjádřena jako pravděpodobnost bezporuchového provozu, to je pravděpodobnost, že objekt může plnit požadovanou funkci v daných podmínkách a v daném časovém intervalu“.



Obr. 1 Prvky pro měkké pájky a jejich slitiny, převzato z [2]

Nově vytvořený pájený spoj by měl zaručovat optimální mechanické a elektrické vlastnosti. Oba tyto v praxi podstatné problémy řeší strojní pájení. Strojní pájení zaručuje standardizované podmínky pro tvorbu pájených spojů zaručující vysokou výtěžnost a minimální chybovost. Výsledkem procesu pájení je tedy vznik pájeného spoje s předem definovanými vlastnostmi. Jestliže nejsou při pájení dodrženy požadované podmínky procesu v příslušných mezích, je jakost³ pájeného spoje nízká. Tento fakt zapříčiňuje snížení nejen spolehlivosti funkce spoje, ale i celého systému, ve kterém je pájený spoj přítomen. [1, 2]

³ Definice jakosti dle prof. Ing. Miloslava Synka, CSc.: „Kvalita (jakost) výrobku je souhrn vlastností vyjadřujících způsobilost výrobku plnit funkce, pro které je určen. Je jedním z rozhodujících činitelů ovlivňujících nejen cenu, ale i pověst podniku, tzv. goodwill“. [3]

K vyrobění kvalitního pájeného spoje je třeba několika základních úkonů: [2]

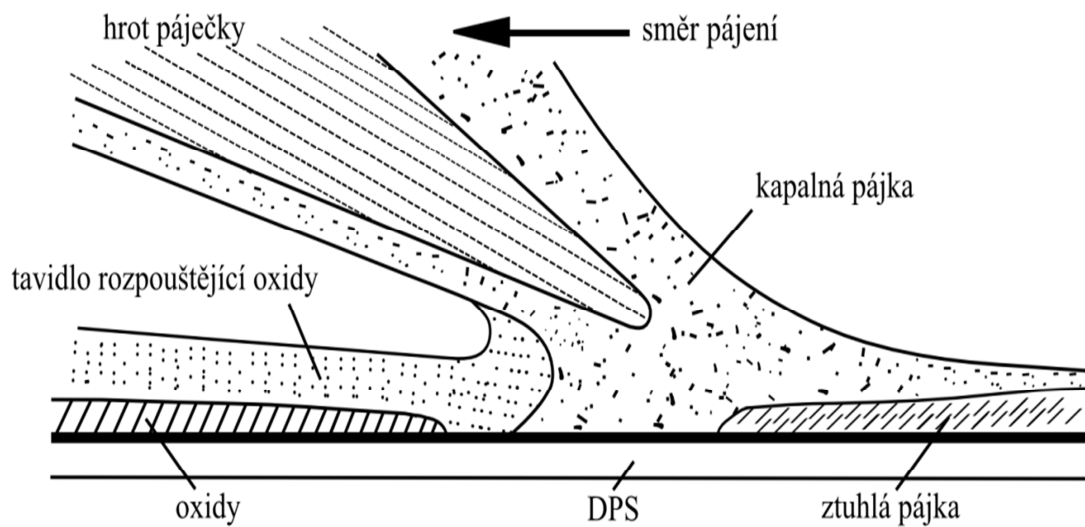
1. Uvedení pájených částí do vhodné vzájemné polohy a její fixace.
2. Nanesení tavidla.
3. Ohřev spoje na pracovní teplotu.
4. Přivedení pájky do spoje.
5. Ochlazení zapájeného spoje.
6. Očištění spoje.

Pájení se v elektronice obvykle dělí na dvě základní skupiny. První skupinou je ruční pájení, které bylo používáno v dobách dřívějších, kdy nebyla výroba zautomatizovaná tak jako je tomu dnes. Druhou skupinou je pájení strojní, které se v technické praxi vyskytuje nejčastěji ve dvou odlišných přístupech, jedná se o pájení vlnou a pájení přetavením.

1.1 Ruční pájení

Ruční pájení je nejstarším způsobem pájení. Jedná se o spojovací metodu s použitím pájedla s upraveným tvarem hrotu⁴ podle typu pájených spojů. Zahřátý hrot pájedla zahřeje zpracovávaný díl za přítomnosti tavidla, pájka se roztaví a zformuje spoj. Ruční pájení je dnes rozšířené hlavně mezi „kutily“. Jedná se o malovýrobu v domácích podmínkách, která je ve srovnání se strojním pájením značně nepřesná a nespolehlivá. Obsluha pájedla při ručním pájení nedokáže dostatečně přesně opakovat všechny úkony důležité pro kvalitu spoje. Lze jen těžko přesně odhadnout množství pájky ve spoji, tepelné zatížení spoje, či dobu pájení. Dnes je již možné toto tvrzení potvrdit, jelikož moderní přístroje jsou schopny kontrolovat kvalitu spoje a potvrzují špatné výsledky, které vznikají při ručním pájení ve srovnání s pájením strojním. Ruční pájení je v dnešní době používáno převážně pro provádění oprav chybně zapájených spojů po strojním pájení. Na *Obr. 2* je znázorněn detail pájecího hrotu v průběhu ručního pájení. [1, 2, 3]

⁴ Pro pájení jsou nejvhodnější krátké a široké tvary hrotů, jejichž základním materiálem je měď s vynikající tepelnou vodivostí. Povrch hrotu je pro dosažení stálosti a životnosti upraven vrstvami Ni a Fe. [3]



Obr. 2 Detail pájecího hrotu v průběhu ručního pájení, převzato z [1]

1.2 Strojní pájení

Strojní pájení je takový druh pájení, při kterém jsou všechny operace prováděny automaticky pomocí pájecího stroje. Při strojním pájení nedochází k přímému zásahu obsluhy. Jakost pájeného spoje, zhotoveného strojním pájením, tedy není závislá na lidském faktoru. Strojní pájení poskytuje vysokou produktivitu práce, úsporu materiálu a energie, vyšší hygienu a kulturu pracovního prostředí. Protože zařízení pro strojní pájení je poměrně jednoduché, postačí pro jeho obsluhu i méně kvalifikovaná síla. Dosáhne se tím značné úspory výrobních nákladů, vysoké reprodukovatelnosti výsledků a zkrácení výrobních časů při tvorbě pájeného spoje, to vše v porovnání s ručním pájením. I přes široké spektrum jsou v praxi používány nejčastěji dvě již zmíněné metody pájení a to pájení vlnou a pájení přetavením. Stále narůstající podíl povrchové montáže ale preferuje spíše pájení přetavením, než pájení vlnou. Tyto dvě technologie pokrývají téměř veškeré požadavky kladené na strojní pájení. Ostatní metody se využívají převážně u speciálních aplikací. Je ovšem pravda, že se stále vyšší miniaturizací součástek i ostatní metody pájení zvyšují svůj podíl ve výrobě. [1, 2]

1.2.1 Pájení přetavením

Pájení přetavením se skládá ze dvou hlavních kroků. Prvním krokem je nanesení pájky ve formě pasty na pájecí vodivou plochu a osazení součástek na substrát. Vývody součástek jsou osazeny na přípojovací plošky s předem nanesenou pájecí pastou. Následuje druhý krok, kterým je přetavení pájecí pasty tepelným ohřevem, který má svůj předem definovaný teplotní

profil. Teplota přetavení musí být vyšší, než je bod tání pájky. Procesy dodání pájecí pasty a ohřev spoje jsou od sebe prostorově i časově oddělené. Největší výhodou pájení přetavením je možnost realizace velmi jemných roztečí (až 0,3 mm). [1, 2, 3]

Dle způsobu ohřevu se rozlišují následující metody pájení přetavením: [3]

- Pájení infračerveným zářením (infraohřev).
- Pájení horkým vzduchem nebo plynem (konvekční ohřev).
- Pájení v kondenzovaných parách (kondenzační pájení).
- Pájení laserem.
- Pájení vyhřívaným nástrojem (impulzní pájení).
- Pájení ohřevem vysokou frekvencí.
- Pájení na horké desce nebo pásu.

Volba typu média, které přetavuje pájecí pastu, závisí na druhu pájených desek. Dále volba druhu pájení přetavením závisí na hustotě a typu součástek, na rozměrech pouzder a jejich variabilitě na pájených deskách, na konstrukci desek plošných spojů a na ekonomických aspektech výrobce či zadavatele. [2]

1.2.2 Pájení vlnou

I přes tvrzení, že pájení přetavením je vhodnější pro povrchovou montáž, než pájení vlnou, má pájení vlnou stále dominantní postavení ve výrobě pájených spojů. Pájení vlnou dnes představuje významnou a velmi rozšířenou oblast montážních technologií v elektronice. Při pájení vlnou je v zásobníku na hladině roztavené pájky vytvořena jedna nebo více vln. Tyto vlny smáčí povrch DPS (desky plošného spoje) procházející nad hladinou na dopravníku. Smáčena je část povrchu desky, na které mají být vytvořeny pájené spoje. Ta část povrchu, na které nemá být aplikována pájka, je chráněna nepájivou maskou⁵. Zde jsou narozdíl od pájení přetavením operace dodání pájecí pasty a ohřev spojeny v jednu. Zařízení jsou obvykle konstruována tak, aby bylo vše součástí jedné výrobní linky. Nové výrobní linky obsahují i zařízení pro nanášení tavidla a zařízení pro předehřev pájených DPS. Vysoký

⁵ Nepájivá maska slouží jako ochranná izolační vrstva spoje, zamezuje přístupu pájky, zjednodušuje optickou kontrolu zapájených součástek a chrání spoj před mechanickými a klimatickými vlivy. Více o nepájivé masce např. v [2].

stupeň automatizace a s tím související ekonomické aspekty výroby jsou největšími výhodami tohoto typu pájení. [1, 2, 3]

1.3 Vlastnosti pájeného spoje

1.3.1 Životnost pájeného spoje

Životnost výrobku je definována jako doba, po kterou výrobek dokáže spolehlivě plnit svoji funkci. Životnost výrobků je většinou několik let a proto se už v minulosti u klasických elektronických součástek⁶ zjišťovala životnost pomocí tzv. zrychlených zkoušek. Tento typ zkoušek je vlastně simulací pracovního režimu výrobku za zvýšené, resp. snížené teploty, případně při zvýšené relativní vlhkosti (např. 95 %), vibrací a podobně. Tyto faktory působí přímo na pájený spoj a svým charakterem urychlují stárnutí. Dochází tak k simulaci vnitřních jevů, které probíhají v pájených spojích a součástkách a je tak urychlena jejich degradace. Jedná se zde především o dva základní degradační procesy, které mají přímou souvislost s životností a spolehlivostí pájeného spoje - elektrochemický proces koroze a fyzikální procesy difuze. Difuze materiálů se projevuje vznikem intermetalických slitin⁷ a jejich nárůstem. Hlavním problémem je snížená elektrická vodivost intermetalických vrstev. Intermetalické vrstvy se postupně zvětšují a rostou a tento proces následně vede k degradaci a k celkové nefunkčnosti pájeného spoje. Dále dochází ke křehnutí spoje, což má za následek snížení jeho mechanické pevnosti. Postupně tak dochází k mechanickému narušení spoje, které může vést až k jeho prasknutí a odtržení. Elektrochemická koroze mění materiálové vlastnosti spoje. Tento proces narušuje homogenitu spoje, zhoršuje adhezi a může vést až k celkové destrukci spoje, která svým charakterem ovlivní celý systém, v němž se pájený spoj vyskytuje. [2, 3]

Nejčastěji se životnost pájených spojů testuje pomocí teplotního cyklování. Teplotní cyklování se provádí při různých teplotních rozdílech (např. od -50 °C do +150 °C), po určitou dobu (např. 1 000 h) nebo pro zvolený počet cyklů (např. 10 000). Během těchto testů se sleduje funkčnost, integrita, vzhled a vodivost pájeného spoje (např. po každých 250 hodinách). Čím větší teplotní rozsah a čím větší počet cyklů je zvolen, tím větší je pravděpodobnost, že dojde k narušení pájeného spoje. Zvolený testovací režim by se ale měl

⁶ Termínem klasická součástka se rozumí součástka s drátovými vývody (THT).

⁷ Intermetalické vrstvy vznikají chemickou reakcí v místě povrchové úpravy DPS a pájky. Tyto vrstvy se vytváří vlivem pohybu hmoty zúčastněných materiálů během pájení. Více o intermetalických sloučeninách např. v [4].

blížit pravděpodobnému pracovnímu prostředí, ve kterém se bude pájený spoj nacházet. Nejběžnější režim teplotního namáhání v současnosti odpovídá cyklování v teplotním rozsahu -55 °C až 125 °C , tj. rozdíl 180 °C . [2, 3]

Stanovení životnosti pájeného spoje je ovlivněno mnoha faktory, a proto není leckdy jednoduché životnost spoje správně určit. Mezi základní faktory ovlivňující životnost pájeného spoje patří vlivy, které působí na pájený spoj během výrobního procesu, dále také vlivy výkonového zatížení spoje a vlivy prostředí, zejména teplota a vlhkost. [2, 3]

Pro stanovení spolehlivosti a životnosti pájeného spoje se nejčastěji používají následující testy: [3]

- Test teplotním cyklováním.
- Test teplotními šoky.
- Test vysokoteplotními rázy.
- Testy zjišťování mechanických vlastností (tah, střih, ohyb).
- Test vibracemi.
- Test migrace.

1.3.2 Spolehlivost pájeného spoje

Předem je potřeba zmínit, že spolehlivost a životnost spoje spolu velmi úzce souvisí a jeden faktor bez druhého nemá význam. Spolehlivost pájeného spoje může být posuzována z různých hledisek. Z optického hlediska je to tvar pájeného spoje, z funkčního hlediska je rozhodujícím parametrem elektrická vodivost. Spolehlivost pájeného spoje je vlastně čas, po který je zaručena spolehlivá funkce, to znamená předem definovaná vodivost spoje. Tepelné namáhání, mechanické namáhání a stárnutí materiálu jsou hlavními faktory, které přímo ovlivňují spolehlivost pájeného spoje. Při testování spolehlivosti pájeného spoje se nejčastěji využívá tepelného namáhání a účinků s tímto namáháním spojených, jak již bylo zmíněno výše. Tepelné namáhání může být vyvoláno důsledkem tepla, které působí na pájený spoj z okolí nebo vzniká v obvodu jako vedlejší produkt v důsledku průchodu proudu nebo vyzařovaného ztrátového výkonu, což se děje ve většině případů. Působení tepla na materiály způsobuje fyzikální a chemické děje, které mohou být buď nevratné, tj. stárnutí materiálu v důsledku změny struktury, difuze apod. nebo vratné, tj. mechanické prodlužování, smršťování nebo průhyby materiálu. Během testování spolehlivosti pájeného spoje se sleduje

celá řada vlastností. Sledované vlastnosti jsou poté vyhodnoceny některým z mnoha spolehlivostních testů. Mezi základní diagnostické testy patří následující: [2]

- Sledování struktury materiálu spojů.
- Sledování tvaru spojů.
- Sledování elektrických vlastností spojů.
- Sledování adheze spojů.
- Sledování migrace iontů.

V průběhu tepelného nebo kombinovaného stárnutí⁸ se sledují změny ve struktuře pájeného spoje pomocí optické mikroskopie nebo rastrovací elektronové mikroskopie. Tvar pájeného spoje bývá sledován pomocí optické mikroskopie. Tvar pájeného spoje především úzce souvisí s kvalitou pájky, typem použité pájky, typem použitého tavidla a také na zvolené technologii pájení. Z elektrických vlastností pájených spojů je nejvíce sledovaným parametrem odpor. Odpor přímo souvisí s vodivostí spoje, která dále rozhoduje o kvalitě celého elektrického systému. Mluví-li se o mechanických vlastnostech spoje, poté se jistě musí mluvit i o adhezi spoje. Adheze je ve většině případů měřena tzv. „pull-off“ testem, kdy je spoj odtržen silou kolmou k rovině propojovací desky. Posledním důležitým sledovaným parametrem je iontová migrace. Iontová migrace je nebezpečná zejména u lepených spojů a provádí se většinou optickým či elektronovým mikroskopem. [2]

⁸ Kombinované stárnutí je tepelné stárnutí za zvýšené vlhkosti.

2 Mechanické vlastnosti pájeného spoje

V úvodu této práce bylo zmíněno, že jejím těžištěm je měření mechanických a elektrických vlastností pájeného spoje. Z toho důvodu se dále budu touto problematikou zabývat. Abychom mohli správně a hospodárně využívat technické materiály, musíme dobře znát jejich chování a umět jej co nejlépe interpretovat. Každý materiál je definován svými vlastnostmi, které jsou určeny zejména chemickým složením a strukturou. Z hlediska použití materiálů je obvyklé dělení na vlastnosti fyzikální, chemické, mechanické, elektrické, technologické, atd. [5]

Mechanické vlastnosti slouží k popisu chování materiálu za působení určitého namáhání. Toto namáhání je důsledkem působení vnějších sil a okolního prostředí (teplota, koroze apod.). Vlastnosti jsou projevy hmoty, které člověk pozoruje a zkoumá ze svého pohledu, se zaměřením na užité vlastnosti. Mechanické vlastnosti jsou popsány charakteristikami a spolu s velikostí a charakterem namáhání umožňují přesně dimenzovat komponenty systémů. Dále umožňují stanovit funkční spolehlivost, která určuje tzv. mezní stav daného prvku. O mezním stavu mluvíme v případě, že součásti či sestavy nejsou schopné plnit funkci, ke které jsou určeny. Mezní stavy jsou ovlivňovány vnějšími a vnitřními faktory. Mezi vnější faktory se řadí např. teplota, druh a časový průběh zatěžování, rychlost deformace nebo okolní prostředí. Naopak vnitřními faktory jsou např. chemické složení a struktura materiálu, velikost a tvar či stav povrchu součásti. Typickým příkladem mezního stavu je např. lom materiálu, nadměrné opotřebení součásti nebo nadměrná plastická deformace. [5, 6] Mezi nejdůležitější mechanické vlastnosti technických materiálů se řadí: [6]

- **Pružnost** (elasticita) - Pružnost je schopnost materiálu deformovat se před porušením pružně. Pružná deformace je vratná, protože při odlehčení se rozměry tělesa vrací na původní hodnoty.
- **Tvárnost** (plasticita) - Plasticita je schopnost materiálu deformovat se před porušením plasticky. Plastická deformace je děj nevratný, protože při odlehčení se rozměry tělesa nevrací na původní hodnoty.
- **Pevnost** - Pevnost je definována jako odolnost materiálu vůči trvalému porušení soudržnosti částic.

- **Houževnatost** - Houževnatost je odolnost materiálu vůči vzniku deformace nebo porušení. Mírou houževnatosti je množství mechanické práce potřebné k vytvoření deformace nebo k porušení materiálu.

2.1 Základní druhy zkoušek mechanických vlastností

Z hlediska působení síly na zkušební těleso se mechanické zkoušky dělí do třech skupin: [7]

- **Statické zkoušky** – Jsou typem zkoušek, u kterých se zatížení zvětšuje pozvolna. Toto zatížení působí obvykle minuty nebo při dlouhodobých zkouškách až dny a roky, např. zkouška pevnosti v tahu, ohybu, stříhu, tlaku a krutu.
- **Dynamické zkoušky** – Jsou zkoušky, při kterých zatěžovací síla působí zlomek sekundy nebo velmi krátký časový úsek, např. zkoušky rázové houževnatosti (Charpyho kladivo).
- **Únavové zkoušky** – Únavové zkoušky jsou založeny na postupném cyklickém zatěžování, např. zkoušky mívající, střídavé či pulzující.

2.2 Úvod do mechanických zkoušek

Zkoušky pro zjišťování mechanické pevnosti se vykonávají z těchto důvodů: [5, 6]

- Pro kontrolu kvality (buď u výrobce nebo u odběratele, nebo obojí).
- K řešení specifických problémů (vývoj nových materiálů nebo jedinečná zakázka, většinou na základě dohody mezi dodavatelem a odběratelem).
- Pro správný výběr materiálu pro určitou konstrukční aplikaci (tento výběr většinou realizuje podnikový technolog či materiálový specialista).

Základ těchto typů zkoušek je vždy stejný. Nejdříve je nutné vyrobit z určitého materiálu zkušební těleso. Dále nechat působit na nově vyrobené zkušební těleso vnější faktory a na závěr vyhodnotit chování tělesa podle určitého, předem definovaného postupu. Získaný výsledek, zpravidla číselná hodnota, je materiálová charakteristika, která je mírou určité vlastnosti. Získaná hodnota mechanických charakteristik je samozřejmě závislá na materiálu, ale také na způsobu zatěžování (rychlost zatěžování, teplota, tvar zkušební tělesa). Jak již bylo zmíněno výše, při měření je nutné dodržet určitý postup, aby bylo možné získat hodnoty, které budou srovnatelné s hodnotami referenčními. K zajištění tohoto problému slouží technické normy (standards). V České republice mají technické normy

označení ČSN (Česká technická norma). Tvorbu a vydávání ČSN v současné době zajišťuje Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví. Jelikož Česká republika leží v srdci Evropy, tak pro usnadnění obchodu a pro jednodušší vzájemnou spolupráci s ostatními evropskými zeměmi, postupně dochází k přejímání evropských norem (EN). Převzaté (harmonizované) Evropské normy se označují původním označením, před které je přidána zkratka ČSN. Norma tak může být označena například ČSN EN 10 002, což je norma pro zkoušku tahem kovových materiálů (již neplatná). Vedle evropských norem existují ještě další, mezinárodně (celosvětově) uznávané normy, které mají označení ISO. Je tedy dnes zcela běžné setkat se s normou s označením ČSN EN ISO XXXX, jelikož se jedná o normy ISO převzaté do systému evropských norem a dále převzaté ČSN. [5, 6]

Měření mechanických vlastností se provádí v laboratořích mechanických zkoušek. Již v 19. století se objevily první laboratoře tohoto typu, které se zabývaly měřením pevnostních charakteristik oceli. Tyto laboratoře byly vybaveny třemi základními zkušebními stroji, mezi které patřil zkušební univerzální stroj, tvrdoměr a kyvadlové rázové kladivo. Zkoušky prováděné na těchto zařízeních byly časově nenáročné, a proto se někdy označují jako zkoušky krátkodobé, ale především jako zkoušky srovnávací. Srovnávací z toho důvodu, jelikož získané číselné hodnoty se srovnávají s hodnotami v nějakém standardu (materiálovém listu), nebo jsou hodnoty porovnávány navzájem. Základní požadavky na tyto zkoušky jsou jednoduchost, nízká cena a snadná reprodukovatelnost dosažených výsledků. K pevnostním výpočtům konstrukčních částí slouží zkoušky, které se podmínkami zatěžování (teplota a rychlost zatěžování) a tvarem zkušební tělesa blíží skutečným provozním podmínkám. Hlavním zástupcem těchto zkoušek je zkouška pevnosti v tahu, která je základem experimentálního měření předložené diplomové práce. [5, 6]

2.3 Zkouška pevnosti v tahu

Zkouška pevnosti v tahu je popsána normou ČSN EN ISO 6892-1 (dříve ČSN 42 0310). Jedná se o nejrozšířenější statickou zkoušku vůbec. Tato zkouška je oblíbená z toho důvodu, jelikož z ní lze vyčíst základní hodnoty potřebné k výpočtu konstrukčních prvků a k určení volby vhodnosti použitého materiálu. Při zkoušce tahem sledujeme chování materiálu za působení klidných, plynule a spojitě se měnících sil, bez rázů, při současném zjišťování závislosti mezi působící silou a deformací zkušební tyče (vzorku). Zatěžování zkušební tělesa pokračuje plynule až do jeho přetržení. Zkouška tahem se zpravidla nevykonává přímo

na vyrobené součásti, ale na zmíněných zkušebních tyčích, jejichž tvary a rozměry jsou normalizovány (tzv. lopatky, *Obr. 3*). [5]



Obr. 3 Typický tvar zkušební tyče pro zkoušku pevnosti v tahu, převzato z [5]

Experimentální měření mechanické pevnosti pájeného spoje solárního článku, které je základem této práce, však probíhala přímo na testovaných solárních článcích na zkušebním stroji od společnosti LaborTech na půdě Fakulty elektrotechnické, viz *Obr. 4*.



Obr. 4 Zkušební trhací stroj do 3 kN od společnosti LaborTech

3 Přechodový odpor pájeného spoje

Další část mé práce se věnuje problematice přechodového odporu a jeho měření. Tato kapitola je v práci zařazena, jelikož přechodový odpor byl jedním ze dvou parametrů, které byly měřeny na dodaných solárních článcích.

3.1 Přechodový odpor elektrického kontaktu

Elektrickým spojem (kontaktem) se nazývá místo, kde se dva vodiče vodivě dotýkají, což má za následek průchod proudu v místech jejich vzájemného styku. Jelikož žádná plocha není absolutně rovná, elektrický proud prochází jen určitými body. Dochází tak k úžinovému jevu a vzniká první, hlavní složka přechodového odporu. Druhou složkou přechodového odporu kontaktu je tzv. odpor přechodových vrstev. Na povrchu každého materiálu (mimo zlata) se tvoří vrstvička oxidů, která má jiné vlastnosti než původní kov. V případě, že by byla vrstvička oxidů velmi tenká, mohl by jí elektrický proud pronikat tzv. tunelovým jevem. Chování takové vrstvy by bylo velmi podobné chování čistého kovu. Reálně je ale tato vrstva oxidů mnohem větší a tak dochází ke vzniku odporu přechodových vrstev. Odpor přechodových vrstev tedy tvoří druhou složku přechodového odporu kontaktu. [8]

Elektrické kontakty jsou silně namáhané součásti elektrických spínacích zařízení a na jejich materiály jsou kladeny následující požadavky: [7]

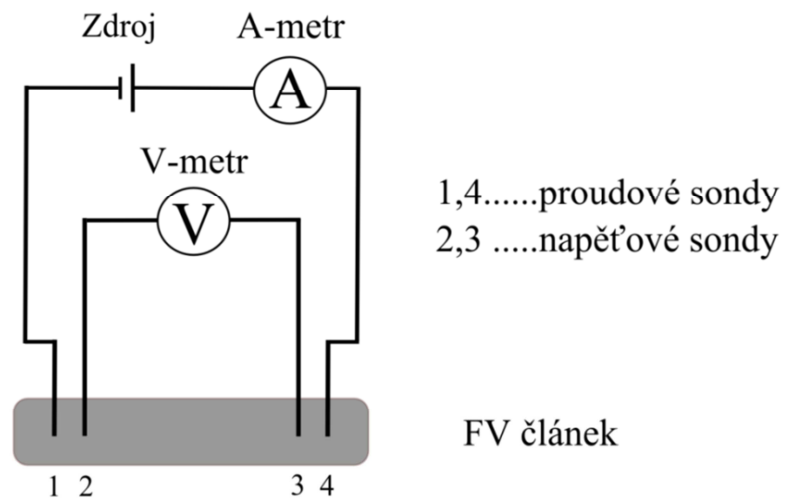
- Co nejmenší a neměnný přechodový odpor.
- Vysoká elektrická vodivost.
- Vysoká tepelná vodivost.
- Vysoká teplota tání.
- Odolnost vůči opalu.
- Odolnost vůči elektrickému oblouku.
- Odolnost vůči opotřebení.
- Odolnost vůči mechanickému narušení.
- Odolnost proti oxidaci.

Pro výrobu elektrických kontaktů se používají nejčastěji tyto materiály: [7]

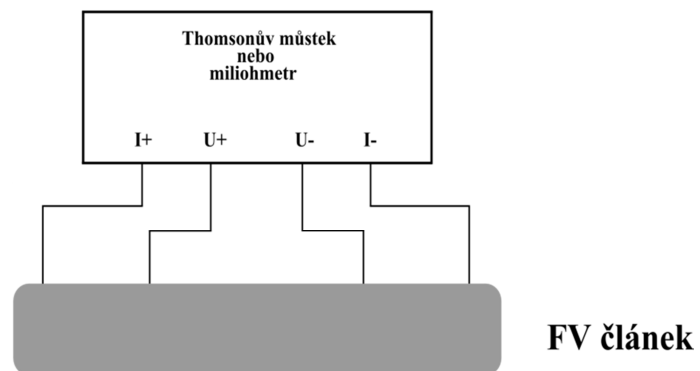
- **Čisté kovy** – Cu (levné kontakty), Ag (plátované kontakty), W a Mo (vysokotavitelné kovy).
- **Slitiny kovů** – nejpočetnější skupina materiálů, které mají zpravidla lepší vlastnosti, než čisté kovy, např. Au, Ag, Pt s Cu, Pd, Ni, W a jiné.
- **Slinuté materiály** – jde o heterogenní soustavy dvou a více kovů, které jsou vyráběny buď slinováním směsí prášků nebo sycením základního pórovitého materiálu druhým, např. W-Cu, W-Ag, Ni-Ag, Ag-C a jiné.
- **Grafit** – speciální materiál používaný pro kluzné kontakty, uhlík je velmi odolný vůči opalu a je také vysoce chemicky a teplotně stabilní.

3.2 Měření přechodového odporu

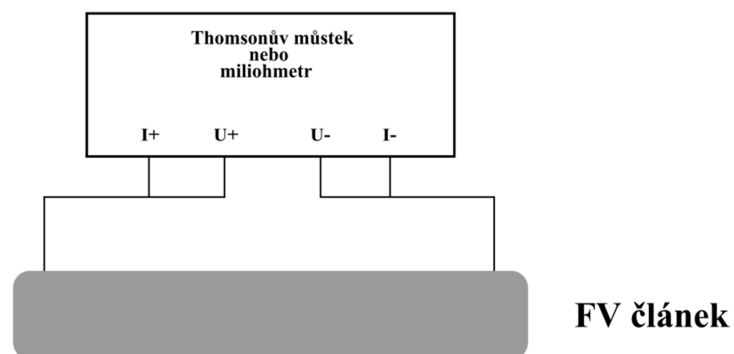
Přechodový odpor se měří buď přímou nebo nepřímou metodou. Nepřímou metodou se rozumí takový způsob měření, kdy hodnotu přechodového odporu zjišťujeme nepřímo pomocí voltmetru a ampérmetru (*Obr. 5*), tzv. voltampérová metoda. Naopak přímá metoda je takový způsob měření, kdy měřená veličina je zjišťována přímo a to buď pomocí miliohmetru nebo Thomsonova můstku. Měřicí proud u obou metod měření musí být větší než 200 mA a zjištěný přechodový odpor by neměl být větší než 0,1 Ω . Při použití voltampérové metody potřebujeme k měření přechodového odporu zdroj stejnosměrného proudu. Tento proudový zdroj by měl mít možnost proudové regulace. Měřicí proud se na začátku měření nastavuje dle měřeného přechodového odporu a dle citlivosti připojeného voltmetru. Vhodným nastavením měřicího proudu si lze usnadnit následný výpočet přechodového odporu. Měřicí kabely přivádějící do měřeného obvodu elektrický proud musí být připojeny do bodů vzdálenějších od měřeného přechodu než svorky, které snímají na daném přechodu napětí. Při měření miliohmetrem a nebo Thomsonovým můstkem by měl být měřicí přístroj zapojen čtyřvodičově (*Obr. 6*). Tyto čtyři vodiče jsou zapojeny stejně jako tomu bylo u voltampérové metody. Proudové svorky jsou opět připojeny k bodům vzdálenějším než svorky napěťové. Čtyřvodičové zapojení vylučuje přechodové odpory v přívodech kabelů k měřicímu místu. Pokud bychom museli použít pouze dvou vodičů (*Obr. 7*), nesmíme následně zapomenout odečíst vnitřní odpor přívodních kabelů. [9]



Obr. 5 Zapojení pro měření přechodového odporu – nepřímá metoda, převzato z [9]



Obr. 6 Zapojení pro měření přechodového odporu – přímá metoda se čtyřmi vodiči, převzato z [9]



Obr. 7 Zapojení pro měření přechodového odporu – přímá metoda se dvěma vodiči, převzato z [9]

4 Fotovoltaický článek

Vzhledem k tomu, že se tato diplomová práce zabývala měřením mechanických a elektrických vlastností pájeného spoje právě na zmíněných fotovoltaických článcích, bude se následující kapitola ve stručnosti věnovat problematice solárních článků a panelů.

4.1 Historie fotovoltaického článku

Fotovoltaický jev byl objeven v roce 1839 francouzským fyzikem Alexandrem Edmondem Becquerelem. První funkční solární článek pak sestrojil v roce 1884 americký vynálezce Charles Fritts, tedy celých 45 let po Becquerelově objevu fotovoltaického jevu. Frittsův článek byl vyroben ze selenového polovodiče, který byl potažen velmi tenkou vrstvičkou zlata a měl účinnost přibližně 1 %. Tyto selenové články neměly vzhledem k nízké účinnosti a vysoké ceně žádnou šanci na uplatnění při hromadné výrobě elektřiny. Selenové články se nicméně začaly využívat jako světelný senzor pro určování času expozice snímku ve fotoaparátech. Frittsův vynález se takto používal až do roku 1960. Vynálezcem solárního článku takového, jak ho známe dnes, je Russell Ohl. Tento americký inženýr pracoval ve 30. letech 20. století na výzkumu materiálů pro telekomunikační firmu AT&T Bell Labs. V roce 1939 stál za objevem PN přechodu⁹, který je od té doby využíván v některých polovodičových součástkách. Mezi nejznámější patří tranzistor, při jehož vzniku byl solární článek objeven jako vedlejší produkt materiálového výzkumu, v té době nazvaný jako "světlocitlivé zařízení" s konverzní účinností okolo 5 %. Vynález si Russell Ohl nechal patentovat roku 1946. Křemíkové solární články byly pak v 50. letech 20. století vylepšeny v Bell Laboratories, kde se náhodou přišlo na skutečnost, že křemíkový polovodič s některými příměsemi výrazně reaguje na světlo. Fotovoltaické zdroje dnes nacházejí své uplatnění v mnoha oblastech. Malé solární články napájí kapesní kalkulačky, větší solární panely mohou sloužit jako zdroj elektrické energie v místech bez připojení k elektrické síti a velké fotovoltaické systémy jsou schopny dodávat energii přímo do běžné rozvodné sítě. [11, 12, 13]

⁹ PN přechod je oblast na rozhraní polovodiče typu P a polovodiče typu N. Více o PN přechodu např. v [10].

4.2 Dělení fotovoltaických článků

Vývoj v oblasti fotovoltaiky se v poslední době vydal více směry. Od původního směru pro špičkové vědecké aplikace, v němž šlo o dosažení co největší účinnosti, se pod vlivem společenské poptávky vytvořily další větve výzkumu, zohledňující jiné faktory, než jen účinnost transformace slunečního záření na elektrickou energii. Základním faktorem, který ovlivňuje poptávku po fotovoltaice, je dnes cena. Dalším významným faktorem může být např. množství vynaložené energie nebo použitého materiálu při výrobě na jednotku jmenovitého výkonu. Jak se totiž ukazuje, pro hromadné použití fotovoltaických článků nemusí být vždy nejvhodnějším řešením vybrat typ článků s nejlepší účinností, ale s nejlepším poměrem cena / jmenovitý výkon. Pokud používáme fotovoltaické články primárně z ekologických důvodů, pak by měla být rozhodujícím parametrem energetická návratnost¹⁰, tj. poměr spotřebované energie při výrobě a vyrobené energie za předpokládanou dobu životnosti. [14]

Solární články lze rozdělovat podle mnoha hledisek. Nejvíce rozšířeným typem jsou solární články na bázi křemíku¹¹. Je tomu tak, protože křemík jako materiál, má řadu výhod. Je hojně zastoupen v zemské kůře dokonce jako druhý nejrozšířenější prvek. Proto je relativně levný, je snadno dostupný, není jedovatý a je i nejlépe prozkoumaným polovodičem co se týče zvládnuté technologie výroby technicky velmi čistého křemíku. [16] Dále jsou uvedeny v praxi nepoužívanější skupiny solárních článků:

4.2.1 Monokrystalické články

Monokrystalické články jsou články, které se skládají z jediného krystalu. Tyto články jsou většinou čtvercového provedení¹². Typické rozměry jsou 156 x 156 mm. Nově vzniklé články jsou většinou vybaveny třemi vodivými pásky (sběrníci). Jak již bylo zmíněno výše, články jsou tvořeny jediným krystalem a jejich povrch je homogenně tmavomodrý až černý. Nové monokrystalické články dosahují účinnosti transformace slunečního záření na elektrickou energii přes 21 %. Při výrobě monokrystalického křemíku se většinou používá

¹⁰ Při určování energetické návratnosti se využívá metody EPBT – „Energy pay-back time“. Je definována jako časová návratnost energie nutné k výrobě fotovoltaického panelu, který následně sám elektrickou energii vyrábí, více např. v [15].

¹¹ Více o křemíku používaném v technické praxi např. v [16].

¹² Jedná se o čtvercové provedení se zaoblenými rohy, tzv. semisquare, více např. v [17].

Czochralského metoda¹³. Při této metodě se pomocí ponořeného zárodka krystalu postupně z čisté křemíkové taveniny vytahuje (při velmi nízké rychlosti otáčení) čistá monokrystalická tyč. Takto vzniklá tyč často dosahuje několika metrů délky o průměru až 30 cm. Kulatá tyč se upraví na čtvercový průřez (se zaoblenými rohy) a poté se rozřeže na destičky (wafery) o tloušťce 0,3 mm. [17]



Obr. 8 Monokrystalický solární článek, převzato z [18]

4.2.2 Polykrystalické články

Polykrystalické (mnohokrystalické) články jsou charakteristické svou modře se třpytící krystalickou strukturou. Tyto články jsou opět čtvercové (s ostrými rohy) a rozměry jejich stran jsou od 10 až po 21 cm. Účinnost těchto článků je však oproti článkům monokrystalickým nižší. Obvyklé účinnosti polykrystalických článků leží v rozmezí 13 až 16 %. Výroba polykrystalického křemíku je však jednodušší a levnější než výroba křemíku monokrystalického. Při výrobě polykrystalického křemíku se používá metoda blokového lití¹⁴. Následující výrobní postupy (opracování, řezání, metalizace, atd.) jsou již stejné jako je tomu u monokrystalických solárních článků. [17]

¹³ Více o Czochralského metodě např. v [16].

¹⁴ Více o metodě blokového lití např. v [17].



Obr. 9 Polykrytalický solární článek, převzato z [19]

4.2.3 Tenkovrstvé články

Klasickým materiálem používaným v tenkovrstvých technologiích je amorfni křemík. Amorfni křemík netvoří pravidelnou krystalickou strukturu, ale neuspořádanou síť. V tomto případě jsou vrstvy amorfniho křemíku nanášeny na nepolovodičový substrát. Typickým příkladem nepolovodičového substrátu používaného v tenkovrstvých článcích je sklo. Existují ale také články, které pro nosný substrát využívají plastu, kovových fólií či papíru. Při výrobě tenkovrstvého článku se materiál solárních článků nanáší v tenoučké vrstvičce několika mikrometrů na zmiňovaný nosný substrát. Hlavní výhodou tenkovrstvých solárních článků je menší spotřeba materiálu při výrobě ve srovnání s předchozími typy článků. Naopak nevýhodou tenkovrstvých článků je jejich menší účinnost při porovnání s krystalickými křemíkovými články, která dosahuje jen asi poloviny jejich hodnoty. [16, 17]



Obr. 10 Tenkovrstvý solární článek, převzato z [20]

4.3 Konstrukce, výroba a recyklace fotovoltaických panelů

Fotovoltaický panel je složen z různého počtu solárních článků, které jsou zapojeny paralelně (pro zvýšení proudu) a sériově (pro dosažení vyššího napětí). Standardní počet solárních článků ve fotovoltaickém panelu je dnes 60. Solární panel musí zajišťovat jak mechanickou, tak i klimatickou podporu pro solární články.

Přední strana FV panelu je vyrobena z tvrzeného solárního skla, které musí zajišťovat ochranu solárních článků proti kroupám, dešti, prachu a jiným formám mechanického a klimatického poškození. Solární sklo musí mít vysokou propustnost a co nejmenší odrazivost slunečních paprsků. Tvrzené solární sklo musí také splňovat požadavky kladené na stabilitu z hlediska degradace optických vlastností a nesmí docházet ke snížení propustnosti skla (menší účinnost FV systému). Vrstva, která zajišťuje oddělení solárních článků od solárního skla, je vyrobena z Ethylen Vinyl Acetátové fólie (EVA). Je to zkratka pro speciální materiál, který byl společností Specialized Technology Resources modifikován pro fotovoltaický průmysl. EVA je vysoce světlopropustná fólie, která se nanáší ve vakuu při teplotě 150 °C. Při této teplotě se vytvoří 70 % až 80 % EVA gelu, který vytváří mechanickou podporu pro solární články. EVA fólie může vykazovat při silném ozáření UV světlem efekt „žloutnutí“¹⁵ a může tedy docházet ke snížení optické transparentnosti s nepříznivým vlivem na množství generované elektrické energie solárními články. Ve struktuře panelu následují již zmíněné solární články, které tvoří srdce celého solárního systému. Spodní část solárních článků je chráněna laminátem. Tento zadní laminát má zejména ochrannou funkci, skládá se z několika vrstev, které jsou zalaminované polyesterovým pojidlem. Vrchní vrstva je tvořena laminátem, který v sobě obsahuje EVA fólii. Prostřední vrstva je tvořena polyesterem, který má excelentní mechanické a izolační vlastnosti. Nejnižší vrstva je vytvořena z Tedlaru¹⁶, který chrání celý panel proti mechanickému poškození. Na zadní části panelu je dále umístěn propojovací box, který slouží k propojení jednotlivých panelů. Tento box je vyroben z plastu tak, aby dokázal odolávat povětrnostním vlivům. Poslední komponentem solárního panelu je rám. Rám je vyroben z hliníku tak, aby tvořil lehkou a pevnou podporu pro celý solární panel. [22, 23]

¹⁵ Více o efektu „žloutnutí“ EVA fólie např. v [21].

¹⁶ Tedlar je obchodní označení pro materiál společnosti DuPont. Jedná se o film z polyvinyl fluoridu (PVF). Tedlar se v FV panelech vyskytuje hlavně díky vynikající odolnosti proti atmosférickým vlivům, mechanickému namáhání a netečnosti vůči chemickým rozpouštědlům a mořidlům. Patří mezi hydrofobní materiály. Vyrábí se v číré nebo barvené verzi. Tedlar vyniká vysokou pevností v tahu, velkou pružností a teplotní stálostí.

Pro názornost je v práci uveden a fotografiemi doložen výrobní postup, který byl získán přímo z výroby FV panelů v Klenčí pod Čerchovem (viz příloha A). Prvním krokem je umístění tvrzeného solárního skla do myčky. V krytém prostoru dojde k jeho opláchnutí za pomoci kartáčů a následuje osušení čistým vzduchem. Na očištěnou a osušenou skleněnou plochu je ručně položena EVA fólie. Dále jsou do zásobníku pájecího stroje manuálně vloženy křemíkové destičky. Pomocí automatického podavače jsou jednotlivé články umístěny na pracovní plochu, kde dochází k vzájemnému propájení článků do jednotlivých řad (stringů). Vzniklá řada je pomocí lay-up manipulátoru¹⁷ umístěna na kontrolní plochu, kde průmyslová kamera vyhodnotí kvalitu pájených spojů. Po kontrole spojů následuje přemístění stringů na skleněnou tabuli s EVA fólií. Tento proces se opakuje do té doby, než je na skleněné tabuli umístěn správný počet řad s propájenými články (obvykle 6). Dalším stanovištěm je pracoviště s manuálním letováním, kde dochází k propojení jednotlivých řad článků. Dále je na vzniklý polotovár položena opět fólie EVA a backsheet fólie (zadní podkladová vrstva). Nově vzniklý polotovár, který je složen ze skla, EVA fólie, solárních článků a dvou zadních fólií je vložen do laminátoru. Proces laminace probíhá v uzavřeném prostoru za vysoké teploty a ve vakuu. Doba laminace FV panelu je cca 15 minut. Následuje ruční ořezání přebytečného laminátu a automatické rámování. Každý nově vzniklý FV panel je navíc testován ve slunečním simulátoru.

Výrobní proces FV panelů jsem ve společnosti LINTECH-SOLAR zdokumentoval v roce 2011, kdy jsem výrobní závod z vlastní iniciativy navštívil a nabytá fakta a poznatky, které jsem touto návštěvou získal, jsem použil v mé bakalářské práci, která se zabývala recyklací FV panelů.

Solární panely jsou vyhovující i po stránce recyklace¹⁸. Existence prvních FV panelů se datuje už od počátku 90. let. Odhadovaná životnost solárního systému je 25 let a více a tudíž již pomalu nastává otázka, co se bude s vysloužilými panely dít po uplynutí doby jejich životnosti. V současném procesu recyklace se všechny panely, ať už kompletní či drcené, tepelně zpracovávají. Nejdříve pomocí tepla dojde k odstranění EVA fólie a poté následuje rozdělení panelu na jednotlivé složky. Přední sklo může být odstraněno a použito při recyklaci skla a nosný hliník může být použit při standardní recyklaci hliníku. Křemíkové články jsou

¹⁷ Lay-up manipulátor je zařízení pro manipulaci s propájenými články (Viz příloha A: Obr. A-4).

¹⁸ V Evropě existuje sdružení výrobců FV panelů, kteří v rámci své iniciativy založili společnost PV cycle, která se zabývá recyklací a ekologickou likvidací FV odpadu. Více na: www.pvcycle.org

pak leptáním a sérií podobných procesů zpracovány tak, aby se odstranily vrstvy metalizace a antireflexní vrstvy. Při odstraňování vrstvy metalizace stříbra, obvykle se nacházející ve starších panelech, se rozpustí stříbro v kyselinách a potom se sráží a je separováno elektrolýzou. Recyklace křemíku musí být rozvinuta do té míry, aby poskytovala surovinu s vysokou čistotou, která je vhodná pro nové solární články. Efektivní recyklace bude v porovnání s primární produkcí křemíku vždy přínosem pro životní prostředí, ale také bude vždy výhodná z ekonomického hlediska. [24]

5 Experimentální část práce

5.1 Parametry solárních článků

Úkolem experimentálního měření bylo určit přechodový odpor a mechanickou pevnost pájené sběrnice FV článku. Toto měření bylo rozděleno do dvou částí. V první části bylo k dispozici od společnosti LINTECH-SOLAR 15 solárních článků (Tab. 1), které byly rozděleny do třech skupin podle průměrné teploty a času pájení. V druhé části měření bylo poskytnuto 25 solárních článků (Tab. 2). Tyto solární články byly rozděleny do pěti skupin opět dle teploty a času pájení.

Tab. 1 Rozdělení solárních článků do skupin – 1. část měření

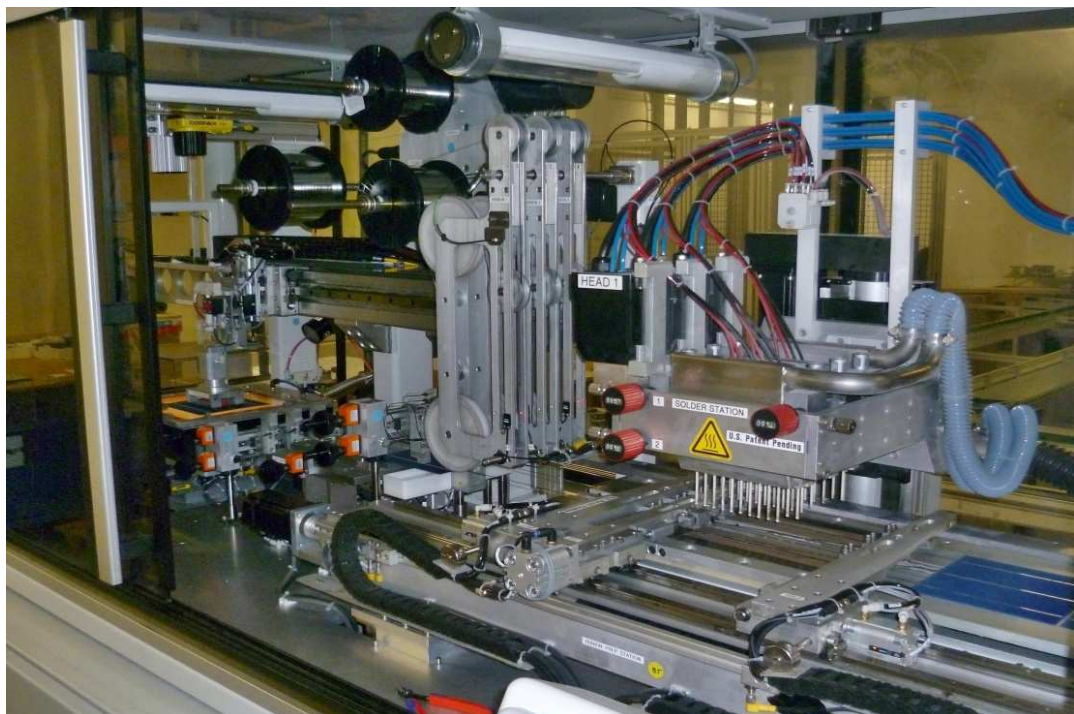
Skupina vzorků	Průměrná teplota [°C]	Hlava č. 1 [°C]	Hlava č. 2 [°C]	Hlava č. 3 [°C]	Čas pájení [ms]
A	160,75	190	203	220	30
B	148,75	180	195	210	10
C	205,75	210	225	238	150

Tab. 2 Rozdělení solárních článků do skupin – 2. část měření

Skupina vzorků	Průměrná teplota [°C]	Hlava č. 1 [°C]	Hlava č. 2 [°C]	Hlava č. 3 [°C]	Čas pájení [ms]
A	212	185	220	230	100
B	222	195	230	240	100
C	212	185	220	230	140
D	202	175	210	220	100
E	212	185	220	230	60

Každá skupina byla tedy zastoupena pěti solárními články. Sběrnice těchto článků by v ideálním případě měly mít stejné elektrické i mechanické vlastnosti (v rámci skupiny a sběrnice). Tyto skupiny, jak již bylo zmíněno výše, se od sebe lišily rozdílnou teplotou a časem pájení. Průměrná teplota z první části měření (*Tab. 1*) byla zaznamenána strojem na vzájemné proletování křemíkových článků (Komax Xcell 3400). V druhé části měření (*Tab. 2*) byla průměrná teplota vypočítána pomocí aritmetického průměru z jednotlivých teplot nastavených na pájecích hlavách letovacího přístroje. Pájecí zařízení (*Obr. 11*) se skládá ze třech pájecích hlav a dochází tedy k propájení všech třech sběrnic v jednom okamžiku. Na pájecích hlavách jsou v rámci skupiny nastaveny rozdílné teploty pájení (*Tab. 1* a *2*). Je důležité zmínit, že se jednalo o měření srovnávací, kdy měla být vybrána optimální teplota a čas pájení pro výrobu pájeného spoje solárního článku.

Po dokončení první části měření FV článků (*Tab. 1*) následovalo představení a prezentování výsledků technickému řediteli společnosti LINTECH-SOLAR Ing. Šavelovi Ph.D., na půdě Fakulty elektrotechnické ZČU pod dohledem doc. Ing. Polanského, Ph.D. Na základě spokojenosti s měřením ze strany společnosti LINTECH-SOLAR byla dodána druhá sada solárních článků a začalo nové testování (*Tab. 2*).



Obr. 11 Pájecí zařízení

5.2 Značení solárních článků

Před samotným měřením bylo nutné zavést jednotné značení testovaných solárních článků. Solární článek se skládá z horní a dolní strany. Na každé straně článku jsou dále umístěny tři sběrnice. Je nutné tyto sběrnice předem jednoznačně očíslovat, tak aby bylo možné následné dohledání daného článku a také dané sběrnice při analýze výsledků. Pro přehlednost byl zaveden způsob značení, kde byl každý testovaný článek označen čtyřmístným kódem. První znak kódu určuje do jaké skupiny (rozdělení podle teploty a času pájení) daný solární článek patří. Tuto skupinu lze dohledat v *Tab. 1* a *2*. Druhým znakem je číslice, ta určuje pořadí článku ve skupině. Jak již bylo zmíněno výše, solární články byly rozděleny do skupin a v každé skupině se nachází 5 článků. Toto číslo může nabývat hodnot od jedné do pěti (každý článek byl popsán lihovým fixem na zadní straně číslicí 1 - 5). Třetím znakem je písmeno a to buď H nebo S. Tato písmena prezentují horní či spodní stranu solárního článku. Posledním znakem je opět číslice, která uvádí číslo sběrnice. Na *Obr. 12* je takto označený solární článek. Pod textem je příklad značení pro vzorek A1H1. Vyskytuje-li se v textu značení např. AH1, jedná se o porovnání pěti solárních článků v rámci jedné skupiny a také v rámci jedné sběrnice. Je totiž možné porovnávat pouze ty sběrnice, které byly propájeny stejnou pájecí hlavou stroje, jelikož by tyto sběrnice měly mít v ideálním případě stejné vlastnosti.

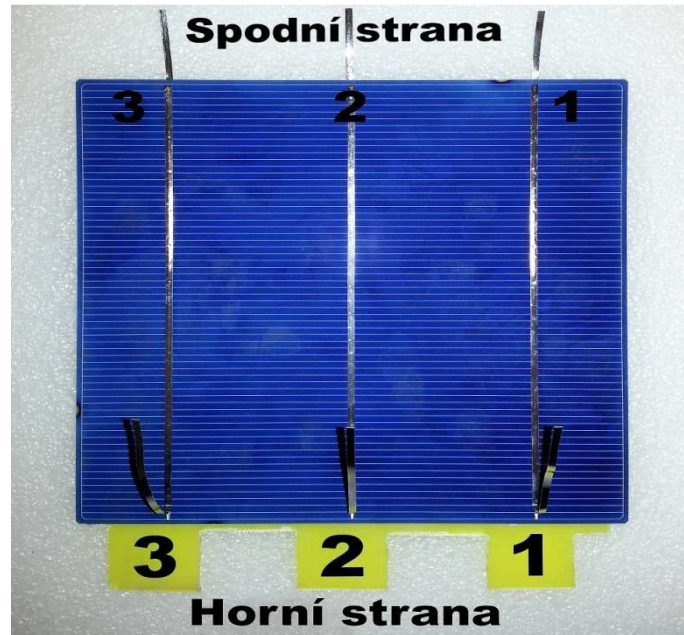
Příklad značení měřeného vzorku: A1H1

A: Vybraný vzorek je ze skupiny A.

1: Pořadí ve skupině A. Bude měřen první vzorek ze skupiny A.

H: Měřena bude horní strana článku.

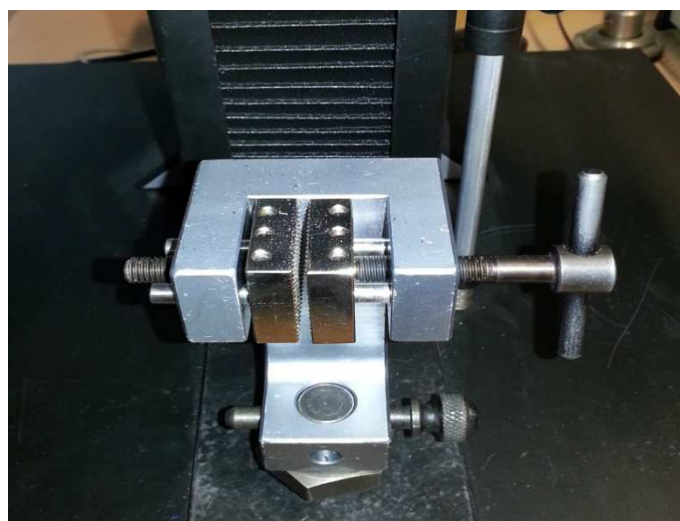
1: Měřena bude sběrnice označená číslem 1.



Obr. 12 Značení testovaných solárních článků

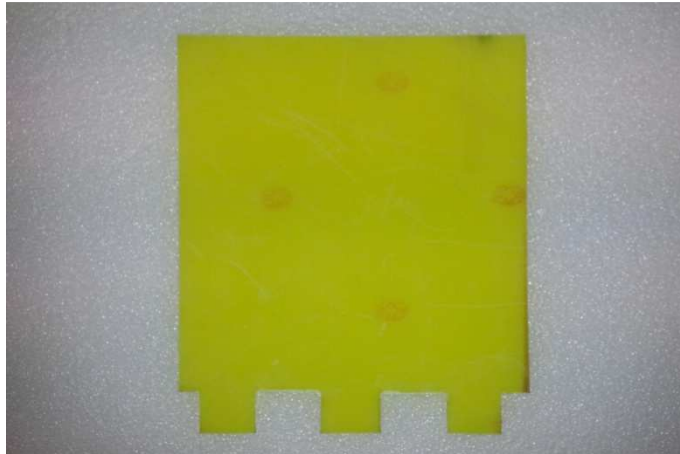
5.3 Příprava vzorků před měřením

Solární články jsou velmi křehký materiál. Před samotným měřením a v průběhu měření došlo u některých článků ke zlomení či prasknutí. Křehkost solárních článků byla hlavním problémem při měření mechanické pevnosti pájeného spoje FV článku. V průběhu přípravy měření bylo zjištěno, že solární články není možné upnout přímo do čelistí zkušebního trhačího stroje (Obr. 13).



Obr. 13 Detailní pohled na dolní čelisti zkušebního stroje

Solární články bylo proto nutné nalepit spodní stranou na sklotextitové desky, které nemohly mít pouze tvar FV článku, ale musely mít ve své dolní části výřezy pro zafixování desky do čelistí zkušebního stroje. Tyto desky tedy pomocí pily a padacích nůžek byly opracovány do potřebných rozměrů (*Obr. 14*).



Obr. 14 Sklotextitová deska potřebných rozměrů

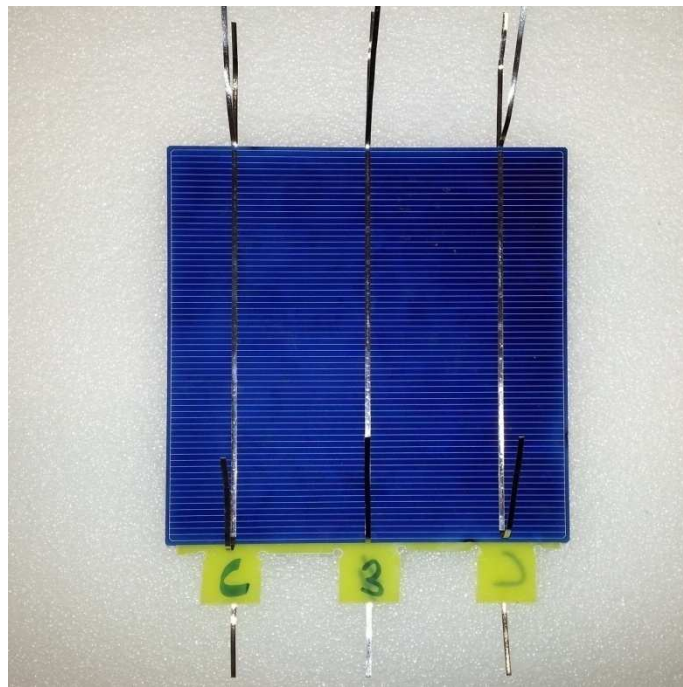
Dále následovalo lepení, kdy se solární články svou spodní stranou lepily na připravené desky. Na každé desce byl z každé strany nalepen jeden solární článek. Bylo tedy nutné vyrobit a opracovat 20 sklotextitových desek a postupně nalepit 40 solárních článků. Při samotném lepení se kladl důraz na nanesení lepidla na pozici, kde se bude po nalepení vyskytovat sběrnice článku (*Obr. 15*). Jelikož spodní strana článků nemohla být u mechanické pevnosti měřena, není proto uvedena ve srovnávacích grafech a v korelační analýze.



Obr. 15 Sklotextitová deska s naneseným lepidlem

Lepidlo bylo takto na desky nanášeno, jelikož hrozilo odtrhnutí či prasknutí článku v místech, kde je umístěna sběrnice. Největší síla totiž při zkoušce tahem působí právě na

testovanou sběrnici solárního článku. Opracované sklotextitové desky s nalepenými FV články byly poté připraveny k samotnému měření (Obr. 16). Z výše uvedeného textu je patrné, že měření přechodového odporu (není potřeba žádná úprava dodaných vzorků před měřením) muselo předcházet zmiňovaným mechanickým zkouškám, při kterých dochází k částečné destrukci článku.

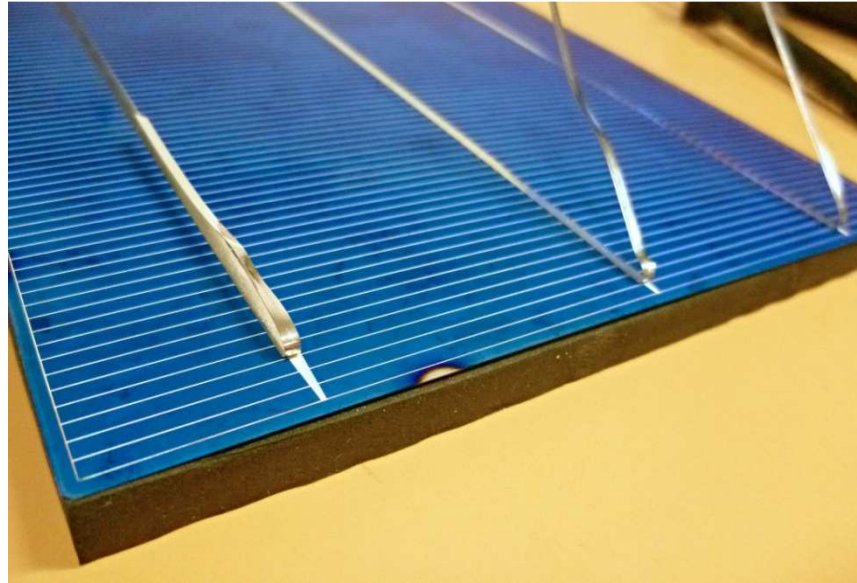


Obr. 16 Sklotextitová deska s oboustranně nalepenými solárními články

5.4 Měření přechodového odporu

K měření přechodového odporu na přechodu solární článek - sběrnice bylo využito nepřímé metody (voltampérová metoda). Přechodový odpor byl měřen mezi solárním článkem (vodivý spoj FV článku je většinou vyroben z Ag/Al pasty) a sběrnicí (Obr. 17). Sběrnice FV článků jsou většinou vyrobeny z měděných pocínovaných pásků.

Při měření bylo použito stabilizovaného stolního zdroje (STATRON 3254.1), nanovoltmetru (KEITHLEY 2182A) a multimetru (METEX M-3890D). Zmiňovaný multimetr (ampérmetr) měřil na jemném rozsahu proud zdroje, který byl po celou dobu konstantní, 300 mA. Při měření bylo použito speciálních měřících hrotů (Obr. 18) tak, aby byla zajištěna po celou dobu měření stejná přitlačná síla. Tím byla zajištěna opakovatelnost a jednotnost v postupu měření přechodového odporu FV článku.



Obr. 17 Detailní pohled na přechod solární články-sběrnice



Obr. 18 Měřicí přitlačný hrot

K měření byl využit princip čtyřvodičové metody. Při této metodě dochází k vyloučení vlivu přívodních kabelů. Při měření byly dvě svorky zdrojem měřícího proudu a druhé dvě svorky snímaly napětí na přechodu solární články - sběrnice. Proudové svorky musely být vždy zapojené ve větší vzdálenosti od přechodu, než svorky napěťové, tak jak ukazuje dané schéma měření (viz Obr. 5). V příloze B jsou zdokumentovány použité přístroje pro měření přechodového odporu a jejich parametry získané z katalogových listů.

5.4.1 Zpracování hodnot

Při měření bylo pomocí nanovoltmetru od společnosti KEITHLEY změřeno napětí na přechodu solární články - sběrnice. Stabilizovaný stolní zdroj dodával do obvodu, jak již bylo řečeno, po celou dobu měření konstantní proud. Vztah mezi zmiňovanými veličinami a elektrickým odporem definuje Ohmův zákon. Následoval výpočet přechodového odporu jednotlivých sběrnic FV článků. V další části práce budou porovnávány jednotlivé sběrnice FV článků. V práci jsou uvedeny průměrné hodnoty, jelikož byly dodány skupiny solárních článků s četností pět.

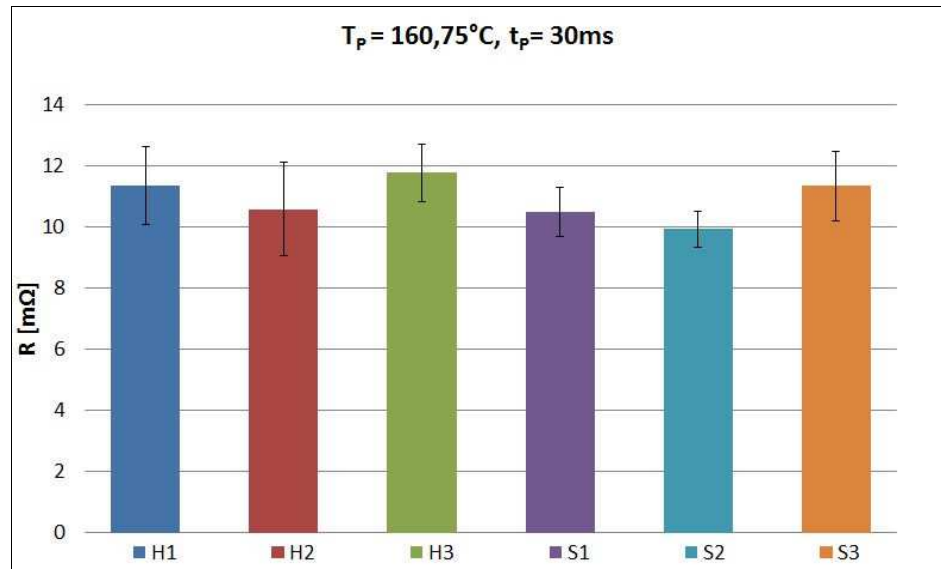
Jak již bylo řečeno, v první části měření byly k dispozici tři skupiny FV článků s velmi odlišnými parametry. Solární články ze skupiny A byly pájeny při průměrné teplotě 160,75 °C a čase pájení 30 ms. Solární články ze skupiny B lze nazvat jako solární články „nedopájené“, jelikož teplota pájení byla pouze 148,75 °C a čas pájení 10 ms. Naopak FV články ze skupiny C lze nazvat jako „přepájené“, protože pájecí teplota u těchto článků byla 205,75 °C při čase pájení 150 ms. V první části měření byly tedy zřetelnější rozdíly mezi výsledky, než tomu bylo u testovaných solárních článků z druhé části měření, kde průměrná teplota a čas pájení nebyly natolik odlišné. V první části měření byly vytvořeny grafy se směrodatnými odchylkami pro každou skupinu FV článků a poté i souhrnný graf pro vzájemné porovnání skupin solárních článků.

V druhé části měření bylo k dispozici pět skupin solárních článků. Skupiny A, C a E se shodovaly v průměrné pájecí teplotě a skupiny A, B a D se shodovaly v čase pájení. Je možné detailněji porovnávat pouze ty sběrnice, které byly pájeny při stejných parametrech (čas nebo teplota). Lze tedy porovnávat vzájemně např. pájecí hlavu číslo jedna u skupin solárních článků A, C a E. V druhé části měření tedy byly vytvořeny grafy pro vzájemné porovnávání skupin FV článků dle shodnosti vstupních parametrů.

5.4.2 Naměřené a zpracované hodnoty z první části měření

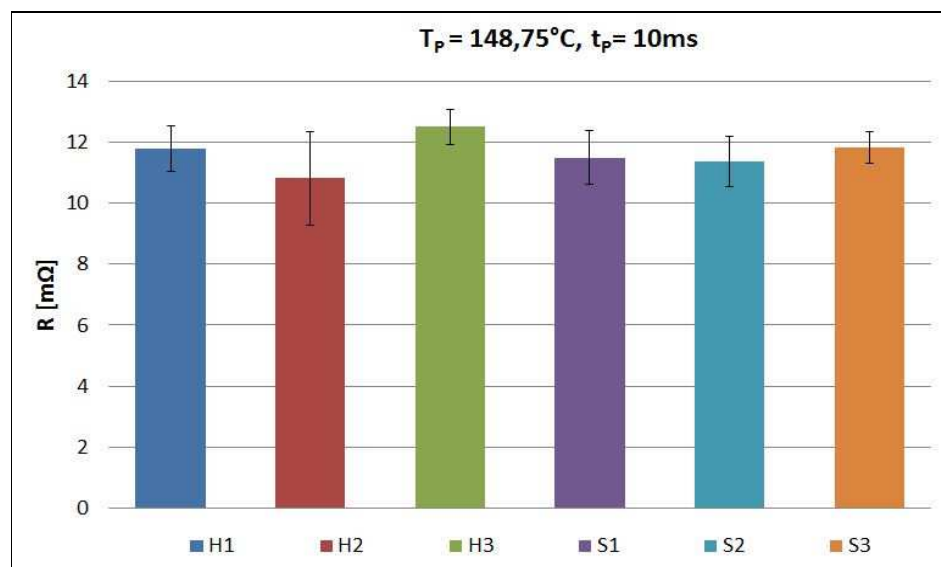
Na *Grafech 1, 2 a 3* jsou zobrazeny přechodové odpory jednotlivých pájených sběrnic FV článků z první části měření. Maximální hodnota naměřeného přechodového odporu ve skupině A byla 12,61 mΩ, naopak nejnižší hodnota v této skupině byla 8,71 mΩ. Nejvyšší průměrný přechodový odpor vykazuje sběrnice číslo 3 (teplota na pájecí hlavě je v rámci skupiny nejvyšší – 220 °C). Naopak nejnižší přechodový odpor byl naměřen u

sběrnice číslo 2. Sběrnice číslo 2 byla pájena při teplotě 203 °C. Z grafu je také patrné, že sběrnice umístěné na horní straně článku mají vždy vyšší přechodový odpor ve srovnání (H1 vs. S1, H2 vs. S2, H3 vs. S3) se sběrnicemi na spodní straně solárního článku.



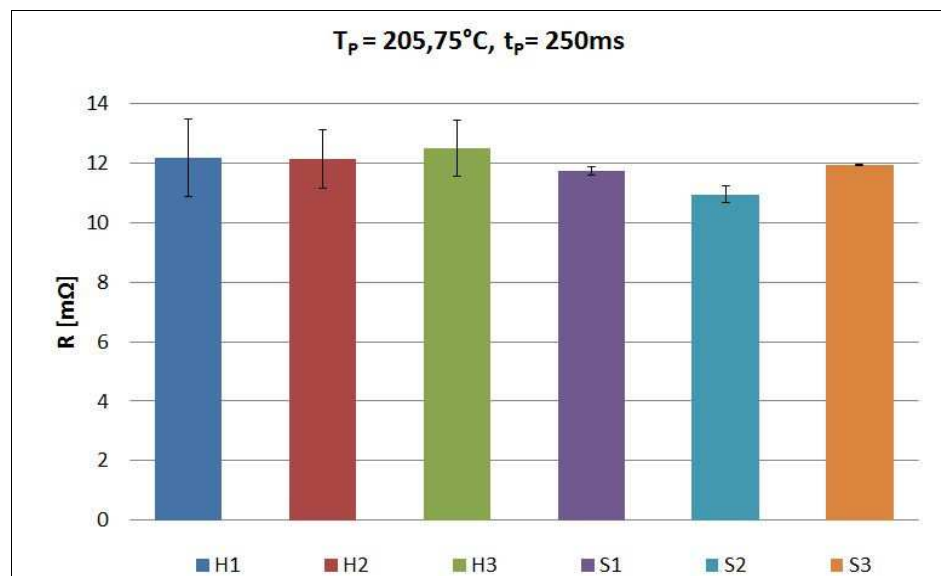
Graf 1 Přechodový odpor – skupina A

Ve skupině B se přechodový odpor pohyboval v intervalu 8,88 - 13,44 mΩ. Nejvyšší průměrný přechodový odpor (Graf 2) opět vykazovala sběrnice číslo 3 (teplota na pájecí hlavě - 210 °C), naopak nejnižší přechodový odpor, tak jako tomu bylo u skupiny A, opět zaznamenala sběrnice číslo 2, která byla pájena při teplotě 195 °C. Přechodový odpor u sběrnic číslo 1 a 3 byl opět vyšší u horní strany FV článku.



Graf 2 Přechodový odpor – skupina B

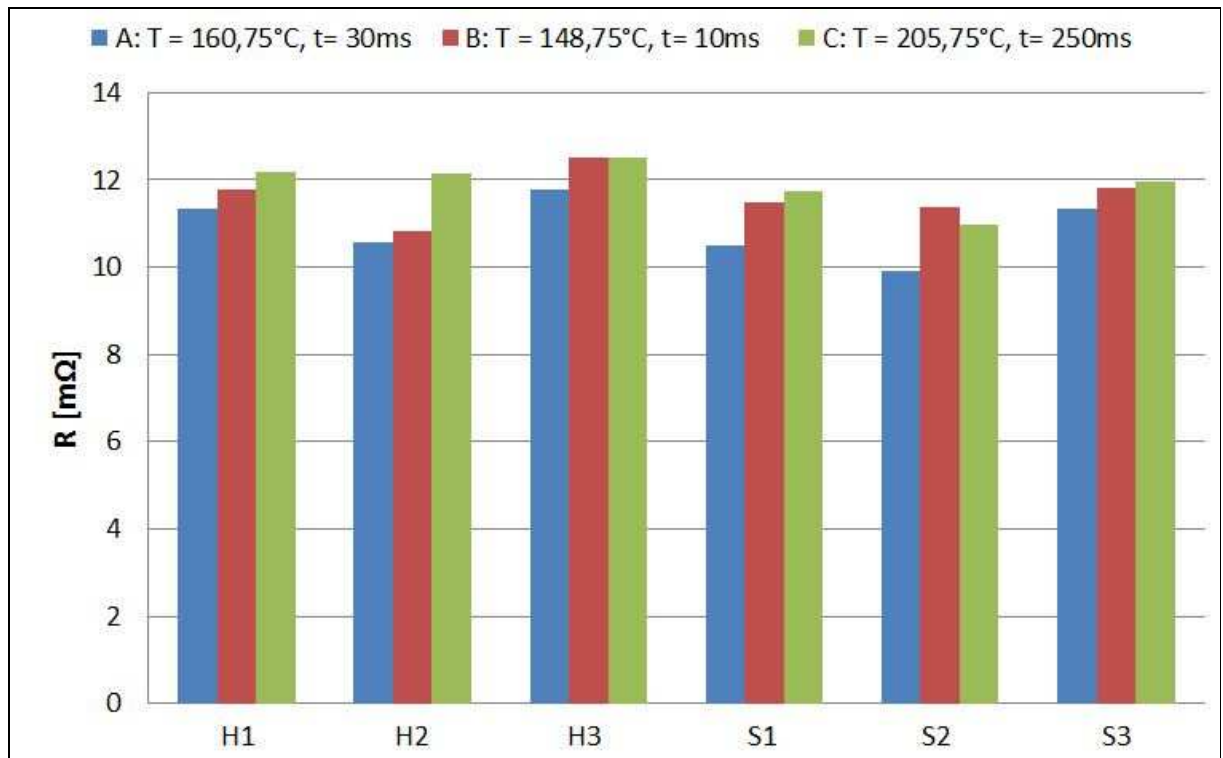
V poslední skupině první části měření, tedy ve skupině C, byl naměřen přechodový odpor solárního článku v rozmezí 10,48 - 14,13 mΩ. Tato skupina vykazovala nejvyšší průměrný přechodový odpor na všech sběrnicích v porovnání s ostatními skupinami z první části měření. Nejvyšší přechodový odpor byl opět naměřen u sběrnice přiletované pájecí hlavou číslo 3 (teplota na pájecí hlavě byla 238 °C) a naopak nejnižší přechodový odpor byl opět zaznamenán u sběrnice číslo 2. Sběrnice číslo 2 byla pájena při teplotě 225 °C. U této skupiny FV článků opět platí, že vyšší přechodový odpor vykazovala horní strana solárního článku, oproti straně spodní.



Graf 3 Přechodový odpor – skupina C

Přehledné srovnání v *Grafu 4* potvrzuje výše uvedené dílčí závěry: nejvyšší přechodový odpor vykazuje skupina C (nejvyšší průměrná teplota a čas pájení), nejnižší přechodový odpor vykazuje skupina A (teplota pájení 160,75 °C, čas pájení 30 ms). Tyto rozdíly jsou ovšem minimální, řádově desetiny mΩ. Nejvyšší přechodový odpor vykazovaly sběrnice pájené hlavou číslo tři. Naopak sběrnice pájené hlavou číslo dva vykazovaly přechodový odpor nejnižší. Na pájecí hlavě číslo jedna byla nastavena vždy nejnižší teplota pájení v rámci testované skupiny. Se zvyšující se teplotou pájení by měl do určitého bodu tavení pájky klesat přechodový odpor a spoj by měl být kvalitněji připájen. Toto tvrzení se potvrdilo a nejnižší průměrný přechodový odpor vykazovaly sběrnice pájené hlavou číslo dva. Na této sběrnicí byla nastavena vyšší teplota pájení než tomu bylo u pájecí hlavy číslo jedna. Přechodový odpor dosáhl své nejnižší hodnoty a se zvyšující se teplotou pájení opět rostl (pájecí hlava číslo 3). Měření také prokázalo, že přechodový odpor je vyšší na horní straně

solárního článku. Z měření vyplývá, že optimální pro výrobu pájeného spoje jsou články ze skupiny A, tedy články ze skupiny s teplotou pájení 160,75 °C a časem pájení 30 ms. Naměřené číselné hodnoty k jednotlivým grafům jsou uvedeny v příloze C.



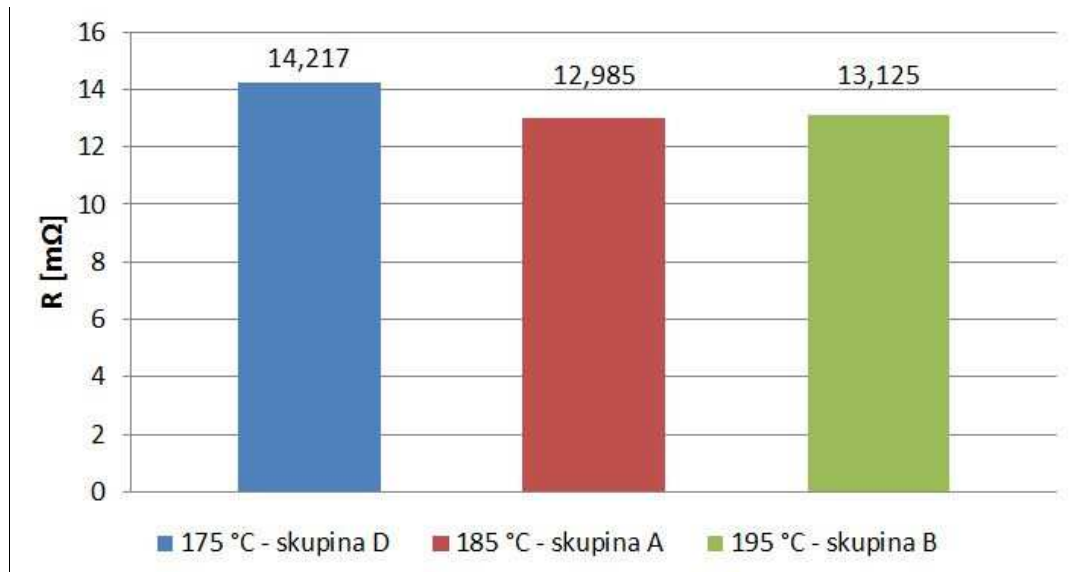
Graf 4 Srovnání přechodového odporu

5.4.3 Naměřené a zpracované hodnoty z druhé části měření

Přechodový odpor z druhé části měření byl v rámci skupin podobný, a proto v práci nejsou zařazeny průběhy přechodového odporu jednotlivých skupin solárních článků, tak jako tomu bylo v první části měření. Ze stejného důvodu není ve srovnávacích grafech uveden přechodový odpor spodní strany FV článku, který byl opět nižší než přechodový odpor na horní straně. Naměřené hodnoty přechodového odporu jednotlivých sběrnic FV článků jsou uvedeny v příloze D (horní i spodní strana FV článků).

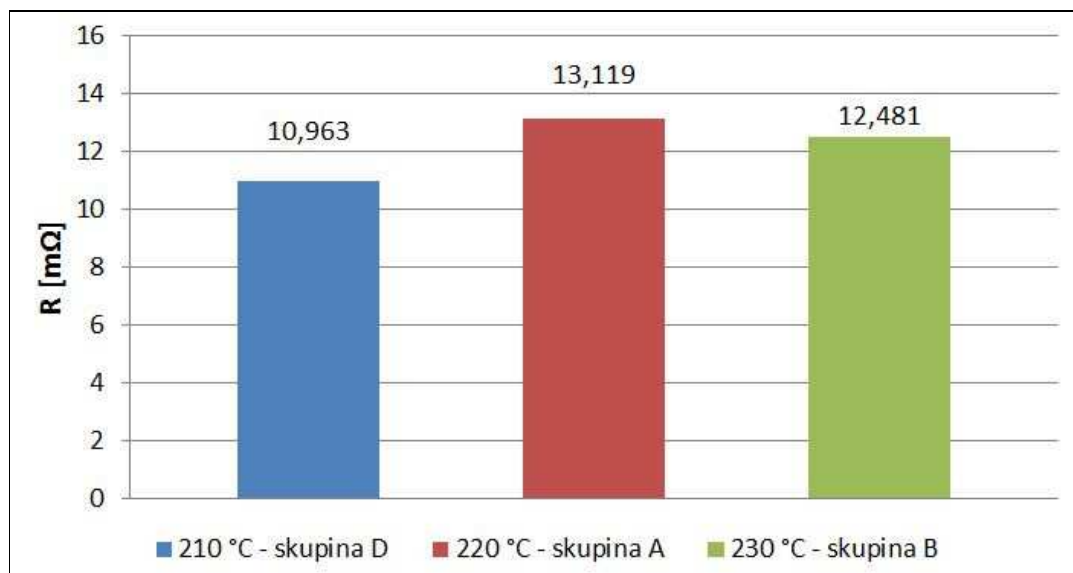
Grafy 5, 6 a 7 znázorňují průměrné hodnoty přechodového odporu jednotlivých sběrnic pro různé pájecí teploty **za konstantního času pájení** (100 ms). Z Grafu 5 je patrné, že při teplotě pájení 175 °C skupina D vykazuje nejvyšší průměrný přechodový odpor. Se zvyšující se teplotou pájení se snižuje přechodový odpor a při teplotě 185 °C skupina A vykazuje průměrný přechodový odpor 12,99 $m\Omega$. Při dalším zvýšení pájecí teploty již

přechodový odpor mírně roste a při teplotě 195 °C dosahuje průměrné hodnoty 13,13 mΩ (skupina B).



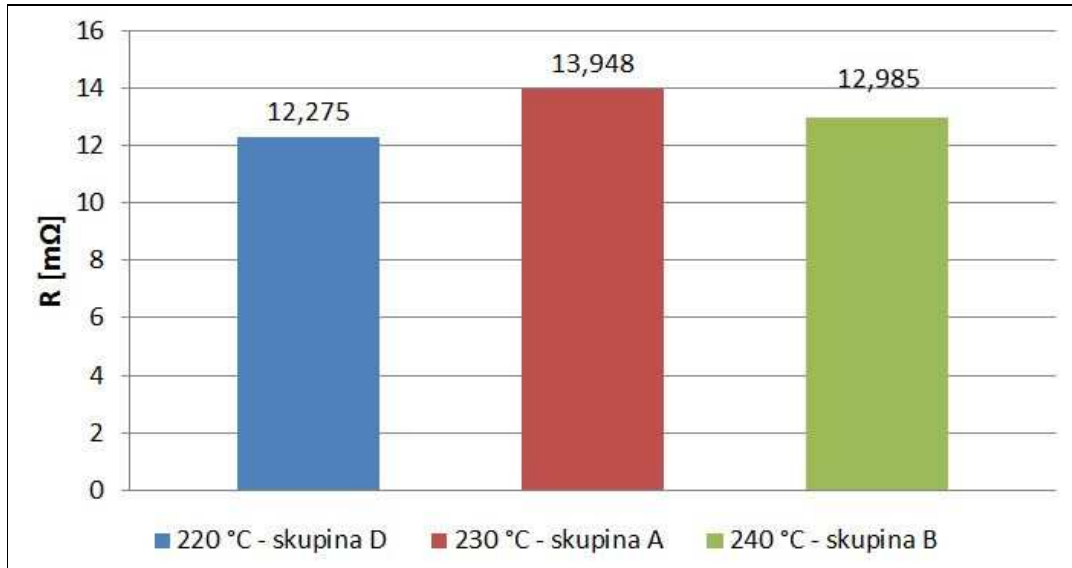
Graf 5 Pájecí hlava číslo 1 – čas pájení 100 ms

Průměrný přechodový odpor na druhé pájecí hlavě je nejnižší při teplotě pájení 210 °C (skupina D). Se zvyšující se teplotou pájení přechodový odpor roste a dosahuje nejvyšší hodnoty. V intervalu mezi 220 °C a 230 °C přechodový odpor opět o několik desetin mΩ klesá.



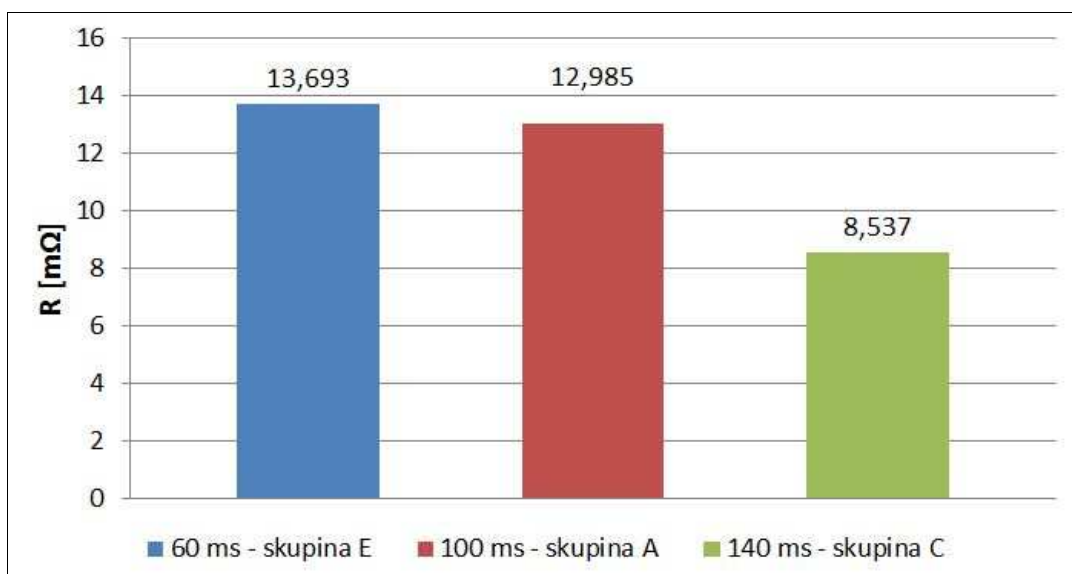
Graf 6 Pájecí hlava číslo 2 – čas pájení 100 ms

Přechodový odpor na pájecí hlavě číslo tři je nejnižší při teplotě pájení 220 °C (skupina D). Se zvyšující se teplotou pájení opět přechodový odpor roste až na průměrnou hodnotu 13,95 mΩ (skupina A) a poté o několik desetín mΩ klesá.



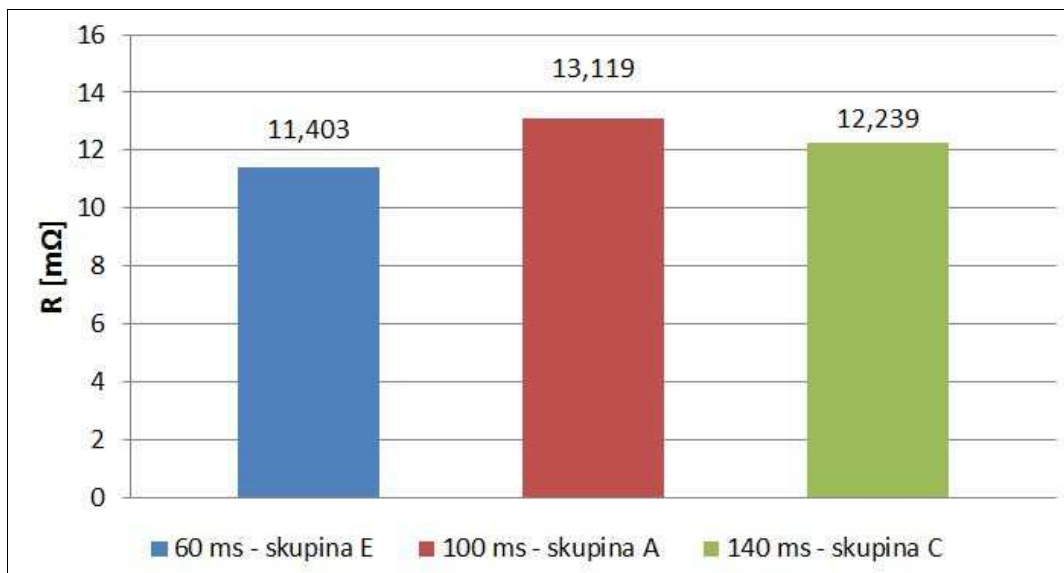
Graf 7 Pájecí hlava číslo 3 – čas pájení 100 ms

Závislost přechodového odporu na čase pájení **za konstantní teploty pájení** je znázorněna na *Grafech 8, 9 a 10*. Při tomto měření byla na pájecí hlavě číslo jedna konstantní teplota (185 °C) ve skupinách A, C a E. Nejvyšší přechodový odpor na první pájecí hlavě byl změřen u skupiny E. Tedy u skupiny s nejkratším časem pájení. Naopak nejlepších vlastností dosahují pájené sběrnice FV článků ze skupiny C, tedy ze skupiny s nejdelším časem pájení.



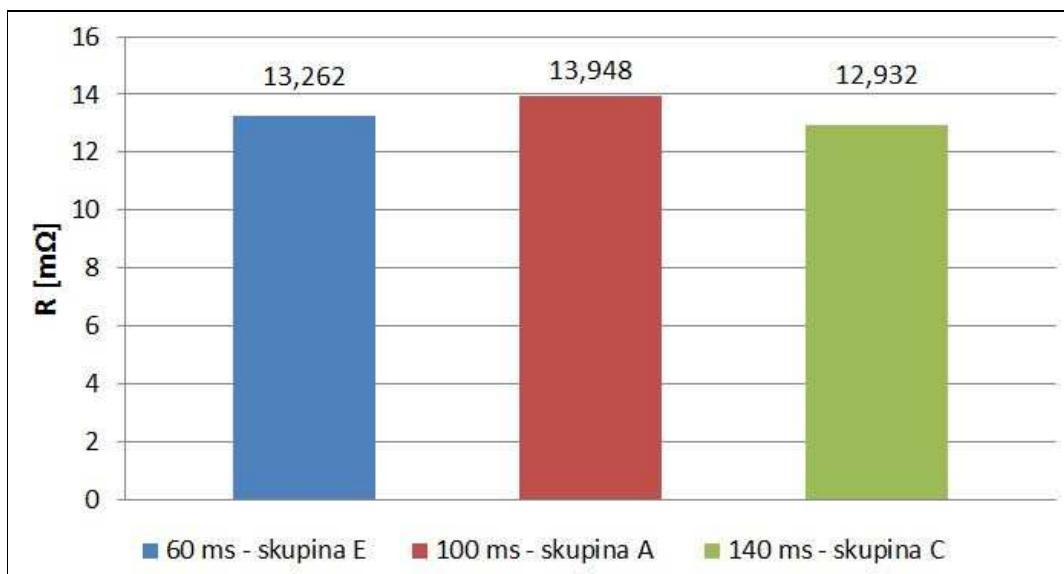
Graf 8 Pájecí hlava číslo 1 – teplota pájení 185 °C

Graf 9 opět představuje závislost mezi přechodovým odporem a časem pájení, nyní ale na letovací hlavě číslo dva. Na této hlavě byla nastavena teplota 220 °C. Nejmenší přechodový odpor vykazovala sběrnice ze skupiny E (čas pájení 60 ms). Při zvýšení času pájení na 100 ms přechodový odpor vzrostl a při čase pájení 140 ms opět klesl.



Graf 9 Pájecí hlava číslo 2 – teplota pájení 220 °C

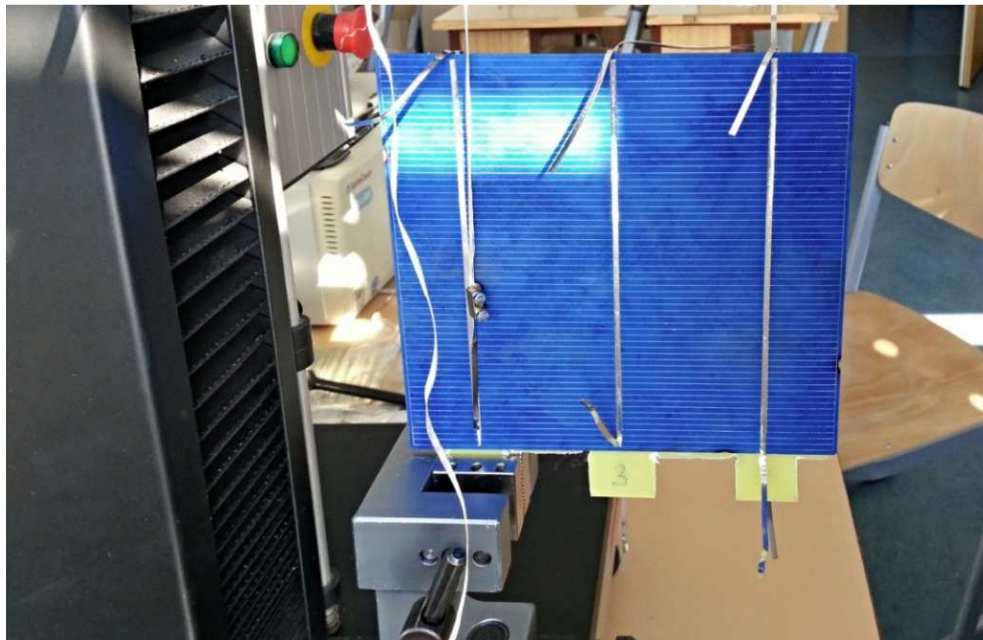
Při výrobě sběrnic FV článků byla v tomto případě na pájecí hlavě číslo tři nastavena teplota 230 °C. Nejnižší přechodový odpor byl zde naměřen při nejdelším čase pájení (140 ms). Naopak nejvyšší přechodový odpor vykazovaly sběrnice pájené při čase 100 ms.



Graf 10 Pájecí hlava číslo 3 – teplota pájení 230 °C

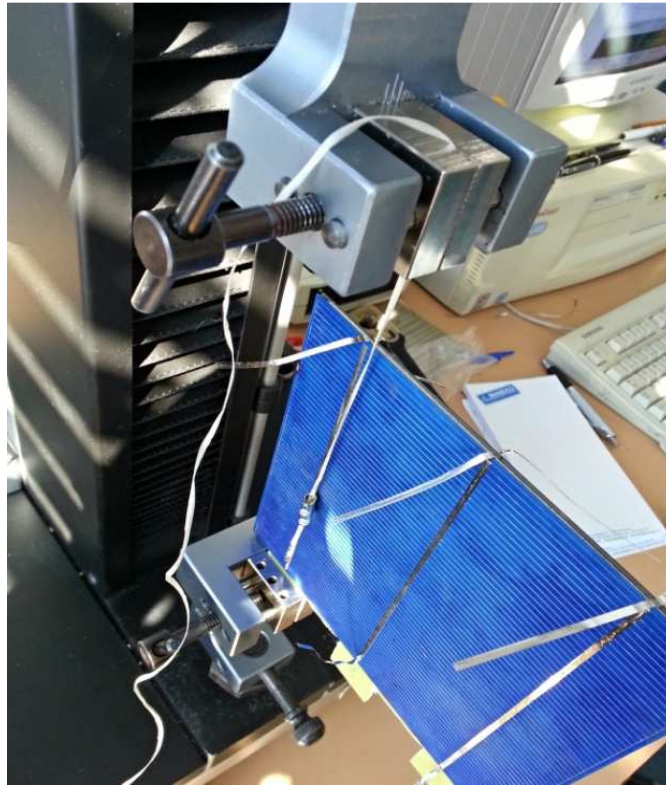
5.5 Měření mechanické pevnosti

V praxi se mechanická pevnost pájeného spoje solárního článku měří pomocí siloměru, kdy obsluha pod definovaným úhlem (obvykle 45°) odtrhne pájenou sběrnici od solárního článku. Při takovém postupu obsluha obvykle zaznamená pouze maximální hodnotu, která je potřebná k odtržení sběrnice. Tato maximální hodnota ale nemá dostatečnou vypovídající schopnost. Maximální hodnota pouze uvádí, že existuje na sběrnici místo, kde je spoj kvalitně připájen, ale nedokáže definovat, jak je spoj propájený v celé jeho délce. Dalším problémem při měření pomocí ručního siloměru je úhel a rychlost odtržení pájené sběrnice od FV článku. Obsluha totiž není schopna odtrhávat sběrnici pod neustále stejným úhlem a při stejné rychlosti. Oba zmíněné faktory ovlivňují sílu potřebnou k odtržení sběrnice. Z těchto závěrů vyplývá, že opakovatelnost měření při použití ručního siloměru je velmi malá a chyba takového měření je naopak velká. Právě z těchto důvodů se společnost LINTECH-SOLAR rozhodla spolupracovat s Fakultou elektrotechnickou. K měření bylo využito zkušebního trhacího stroje (Obr. 4), který zajistil opakovatelnost a správnost měření. Toto zařízení umožňuje záznam padesáti hodnot síly za vteřinu. Postup měření byl tedy následující. Sklotextitová deska se solárním článkem byla upnuta do čelistí zkušebního stroje tak, aby vertikální osy sklotextitové desky a stroje byly rovnoběžné (Obr. 19).



Obr. 19 Sklotextitová deska se solárními články upnutá v čelistech trhacího stroje

Následovalo upevnění volného konce měřené sběrnice (Obr. 20). K tomu bylo využito šroubového kontaktu a lanka, které bylo zafixováno do horní čelisti zkušebního stroje.



Obr. 20 Upevnění volného konce měřené sběrnice

Dalším krokem bylo spuštění programu zkušebního trhačího stroje. Program trhačího stroje byl nastaven tak, aby se horní čelist pohybovala svisle nahoru do vzdálenosti 30 cm a po dokončení testu se opět vrátila do své výchozí polohy. Po spuštění programu se tedy horní čelist trhačího stroje začala postupně pohybovat svisle nahoru a docházelo k napínání zafixovaného lanka. Když bylo lanko zcela napnuté (horní čelist popojela cca o 10 cm), začalo odtrhávání testované sběrnice. Hodnoty síly zaznamenané počítačem při napínání lanka byly vynulovány a v grafech jsou pouze ty hodnoty síly, při kterých docházelo k odtrhávání pájené sběrnice. Měřítka však zůstala stejná a proto je v grafech uvedena vzdálenost 30 cm. V grafech tedy 2 cm měřítka znamenají cca 1 cm na pájené sběrnici. V průběhu testu tedy byla pomocí softwaru od společnosti LaborTech zaznamenána hodnota síly a vzdálenosti pohybující se čelisti. Jak již bylo zmíněno výše, cca po 30 cm došlo k úplnému odtržení sběrnice od solárního článku a program se automaticky ukončil. Celý postup se opakoval na další sběrnici. Doba zkoušky jedné sběrnice byla cca 120 s, při rychlosti posuvu horní čelisti cca 2,5 mm za sekundu. V příloze E je zobrazen solární článek

před testováním a po testování mechanické pevnosti. Při měření ale nebyla zaznamenávána mechanická pevnost jako podíl síly a plochy. Při měření pevnosti v tahu byl zaznamenán průběh síly nutné k odtržení pájené sběrnice od FV článku vztažený k poloze horní čelisti zkušebního trhačského stroje.

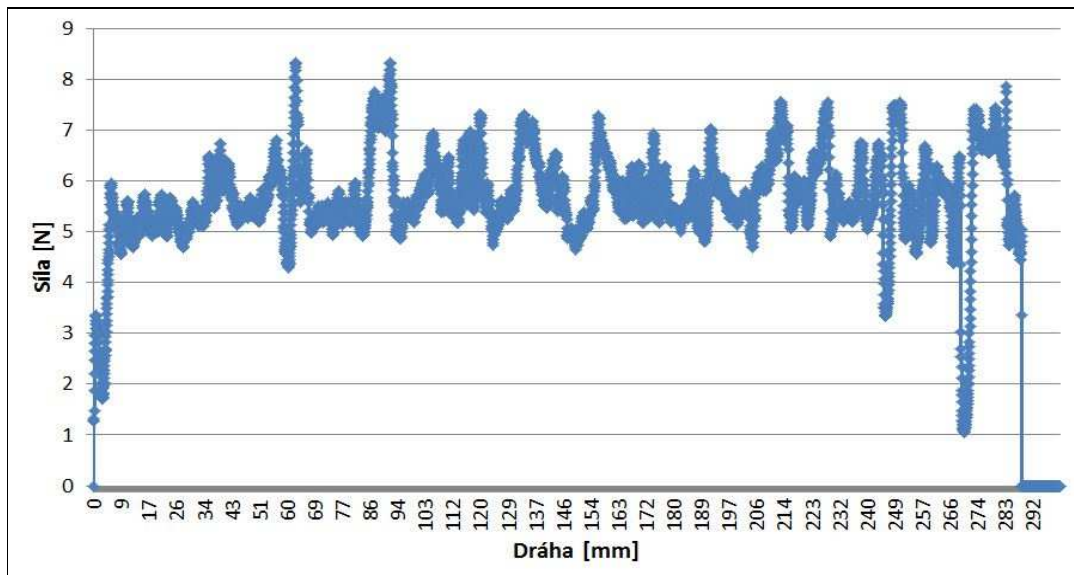
5.5.1 Zpracování hodnot

Při testování každé sběrnice bylo zaznamenáno cca šest tisíc hodnot síly a vzdálenosti posuvu horní čelisti. Dále bylo nutné získané hodnoty převést do programu Microsoft Excel, kde byly vyhodnoceny výsledky měření. V průběhu testování docházelo k jevu, kdy pájená sběrnice nebyla kvalitně připájena k solárnímu článku, a při posuvu horní čelisti docházelo k samovolnému odtrhávání sběrnice. V takovém případě zkušební trhačský stroj zaznamenal záporné hodnoty síly. Tyto záporné hodnoty, po diskuzi s vedoucím práce, byly nahrazeny číslem 0 tak, aby nedocházelo ke zkreslení výsledků. Záporná hodnota síly v praxi není možná, a proto číslo nula v grafech znamená nepropájené místo na sběrnici solárního článku. Dalším krokem bylo vytvoření grafů ke každé z testovaných sběrnic (120 grafů). Následovala část, která se v zadání diplomové práce nazývá statistická analýza. Na doporučení vedoucího práce byly upravené hodnoty exportovány do statistického programu Minitab (příloha F). Dále bylo nutné každou testovanou sběrnici definovat pouze jednou hodnotou tak, aby bylo možné provést korelační analýzu mezi přechodovým odporem a mechanickou pevností. Jestliže by se rozdělení síly po celé délce sběrnice dalo popsat normálním rozdělením, pak by směrodatným ukazatelem síly byla střední hodnota. Jelikož nepropájená místa na sběrnících FV článků neumožnila náhodné rozdělení chyb, které je popsáno normálním rozdělením, musel být použit medián jako směrodatný ukazatel, který bude dále popisovat jednotlivé sběrnice FV článků. Pro nalezení mediánu síly daného souboru čísel stačí hodnoty pouze seřadit podle velikosti a poté vybrat hodnotu, která se nalézá uprostřed seznamu. Statistickou analýzu zajišťoval výše zmíněný program Minitab, který pomocí popisné statistiky a histogramů určil základní matematické parametry testovaných sběrnic FV článků.

5.5.2 Naměřené a zpracované hodnoty z první části měření

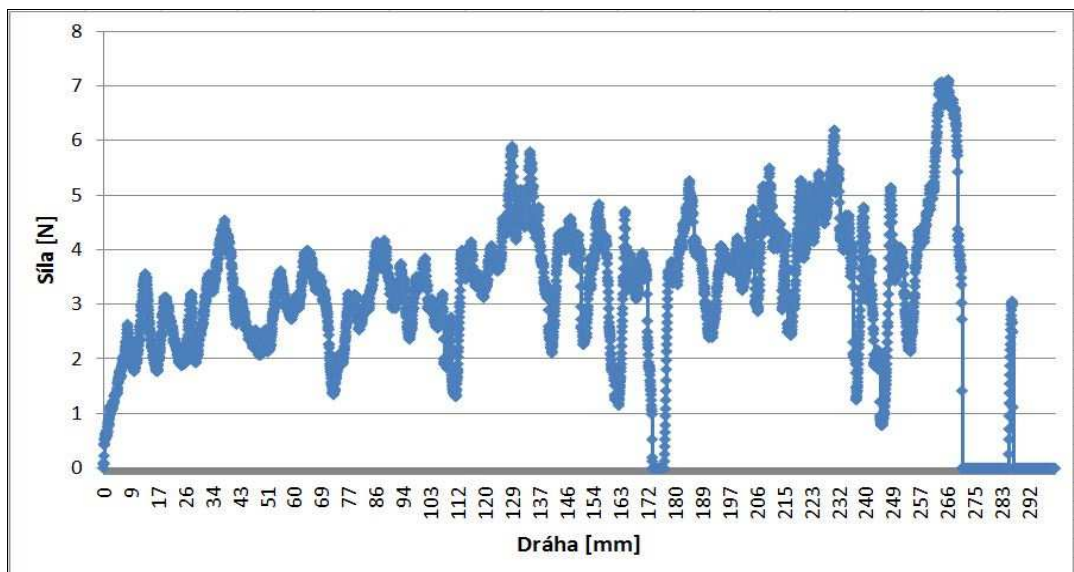
Graf 11 vyjadřuje charakteristický průběh síly pro sběrnice ze skupiny A. Tato skupina je definována teplotou pájení 160,75 °C a časem pájení 30 ms. Průměrná hodnota

mechanické pevnosti vykazovaná sběrnicemi solárních článků ze skupiny A je 4 - 6 N, což je při podmínce výrobce, který uvádí mechanickou pevnost sběrnice 3 N, vyhovující.



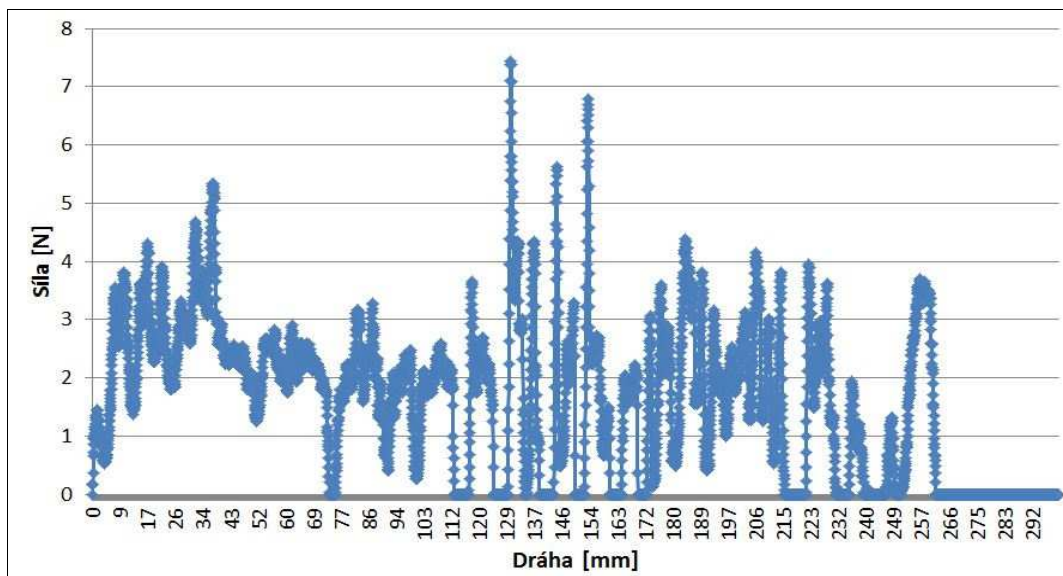
Graf 11 Vybraný vzorek charakteristický pro skupinu A

Na dalším grafu, tedy na *Grafu 12*, je charakteristický průběh síly pro vzorky ze skupiny B. Tato skupina má teplotu pájení 148,75 °C, při čase pájení 10 ms. U této skupiny už bylo možné pozorovat špatně propájené místa, kde mechanická pevnost sběrnice klesla, až k hranici 0 N. Průměrná hodnota mediánu síly u skupiny B byla v rozmezí mezi od 2 N do 4 N.



Graf 12 Vybraný vzorek charakteristický pro skupinu B

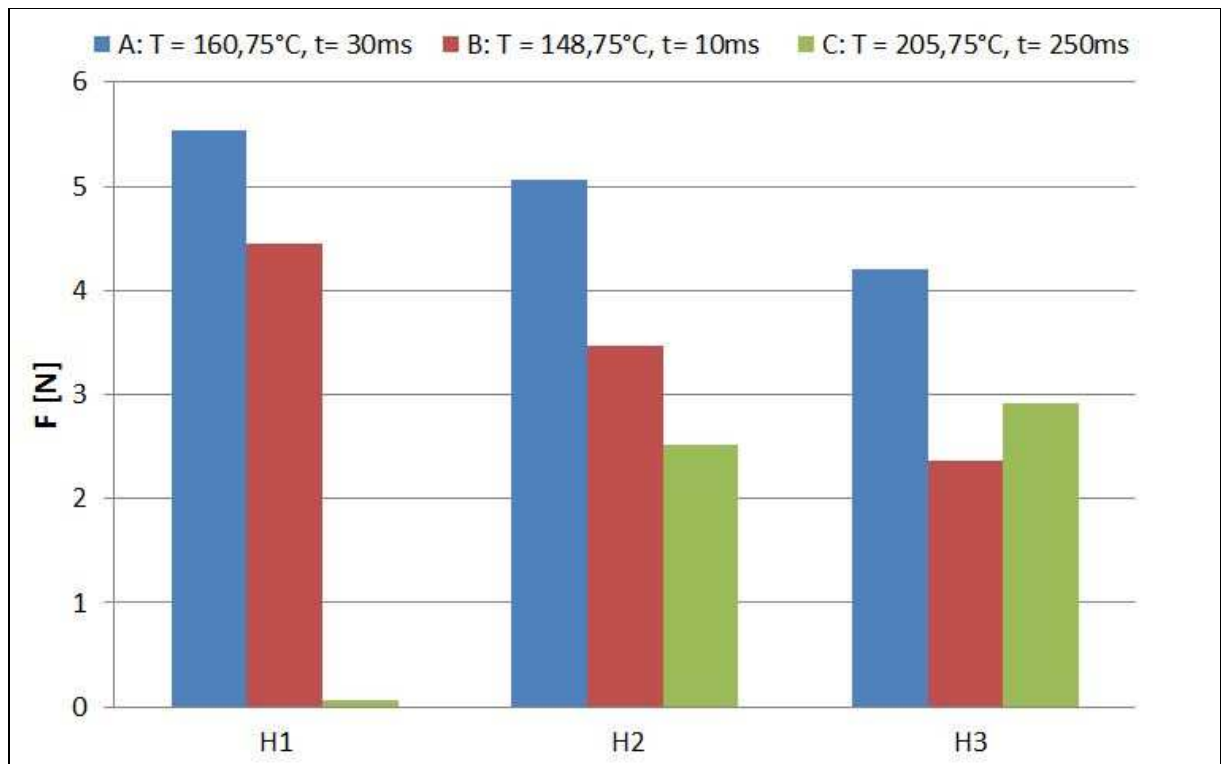
Poslední skupinou z první části měření byla skupina C. Tato skupina byla definována teplotou pájení 205,75 °C a časem pájení 150 ms. Na grafu pod textem je charakteristický průběh síly pro solární články ze skupiny C. U této skupiny již velmi často docházelo k samovolnému odtrhávání sběrnice od FV článku. Průměrná hodnota mediánu síly se zde pohybovala mezi 0 - 3 N. Tato skupina tedy svými vlastnostmi zcela nevyhovuje podmínkám výroby.



Graf 13 Vybraný vzorek charakteristický pro skupinu C

Na *Grafu 14* je srovnání jednotlivých mediánů síly. Z grafu je patrné, že největší průměrná síla nutná k odtržení sběrnice byla změřena u solárních článků ze skupiny A. Naopak nejnižší síla pro odtržení sběrnice charakterizuje skupinu C. U skupin A a B byla vždy nejvyšší mechanická pevnost naměřena u první sběrnice a nejnižší naopak u sběrnice třetí. Z *Tab. 1* u skupin A a B je zřejmé, že čím nižší je nastavená teplota na pájecí hlavě, tím vyšší je mechanická pevnost a samozřejmě naopak, čím vyšší je teplota pájení, tím nižší je mechanická pevnost spoje. U skupiny C tomu tak není, jelikož pájecí hlava číslo jedna při teplotě pájení 210 °C a při době pájení 150 ms nevykonávala správně svoji funkci. U této skupiny byl na první pájecí hlavě vypočítán medián síly blízky 0 N.

Jednotlivé průběhy síly zaznamenané trhacím strojem v průběhu první části měření jsou přiloženy k práci (příloha G).

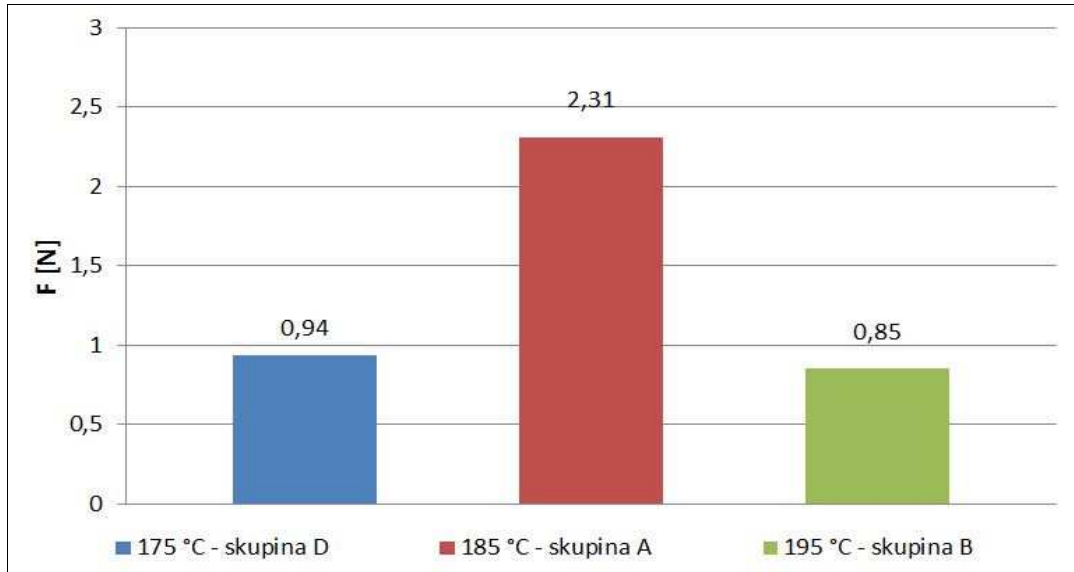


Graf 14 Srovnání mediánů síly

5.5.3 Naměřené a zpracované hodnoty z druhé části měření

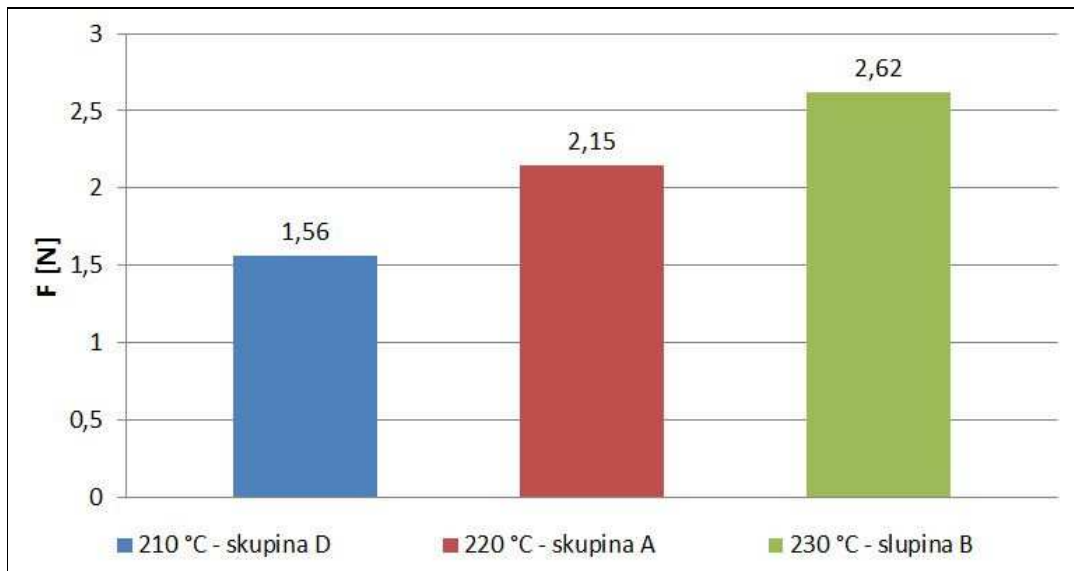
Tak jako tomu bylo u měření přechodového odporu, bude i zde uvedeno vzájemné porovnání skupin FV článků s ohledem na pájecí hlavy a nebudou zde uvedeny charakteristické průběhy síly daných skupin FV článků (málo odlišné výsledky z druhé části měření). Jednotlivé průběhy síly zaznamenané trhacím strojem v průběhu druhé části měření jsou přiloženy k práci (příloha H). Je potřeba předem poznamenat, že ani jedna skupina FV článků z druhé části měření nesplňovala dané kritérium 3 N.

Grafy 15, 16 a 17 představují závislost mechanické pevnosti pájené sběrnice na pájecí teplotě. V tomto případě byl na pájecí hlavě nastaven **konstantní čas pájení** 100 ms. Při teplotě 175 °C sběrnice číslo jedna vykazovaly průměrnou mechanickou pevnost o velikosti 0,94 N. Při měření sběrnic pájených při teplotě 185 °C byla naměřena síla nutná k odtržení sběrnice o velikosti 2,31 N. Při testování sběrnic článků ze skupiny B síla opět klesla a to na průměrnou hodnotu 0,85 N.



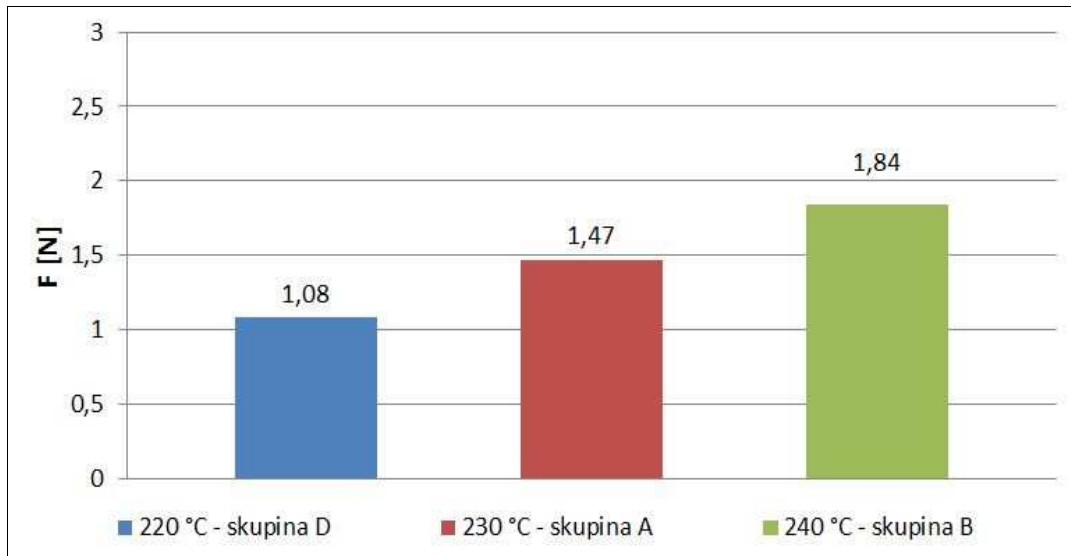
Graf 15 Pájecí hlava číslo 1 – čas pájení 100 ms

Na pájecí hlavě číslo dva byla při teplotě pájení 210 °C změřena průměrná velikost síly 1,56 N. Se zvyšující se teplotou pájení se lineárně zvyšovala i mechanická pevnost spoje a při teplotě 220 °C dosahovala hodnoty 2,15 N. Sběrnice pájené při teplotě 230 °C (skupina B) vykazovaly opět vyšší mechanickou pevnost ve srovnání se skupinami A a D. Průměrná hodnota síly potřebná k odtržení sběrnice číslo dva byla u skupiny B cca 2,6 N.



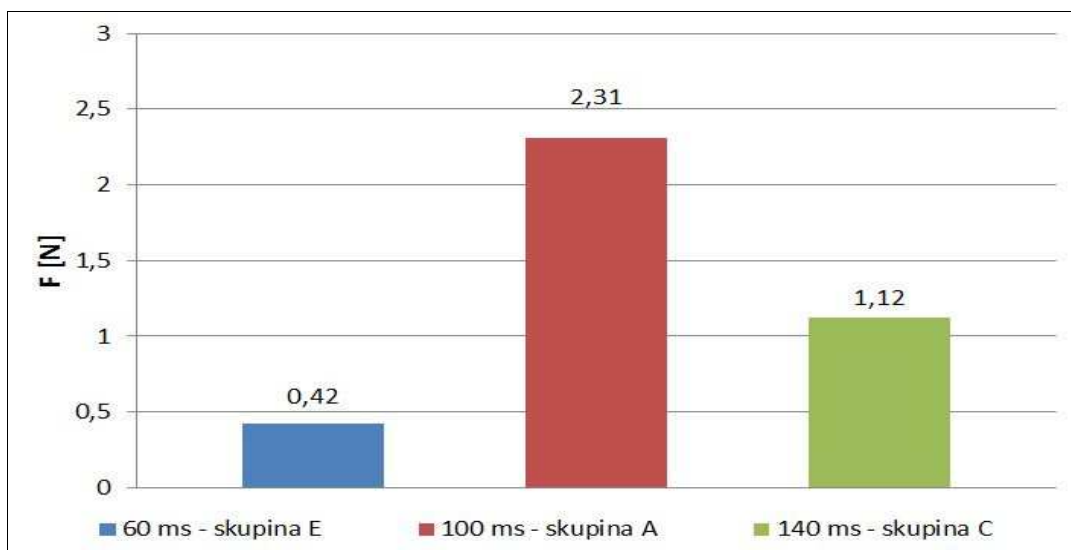
Graf 16 Pájecí hlava číslo 2 – čas pájení 100 ms

Z Grafu 17 je patrná stejná závislost mechanické pevnosti pájené sběrnice na teplotě pájení jako tomu bylo u druhé sběrnice. Síla nutná k odtržení pájené sběrnice tedy lineárně se zvyšující se teplotou roste. Při teplotě pájení 240 °C síla dosahuje průměrné velikosti 1,84 N.



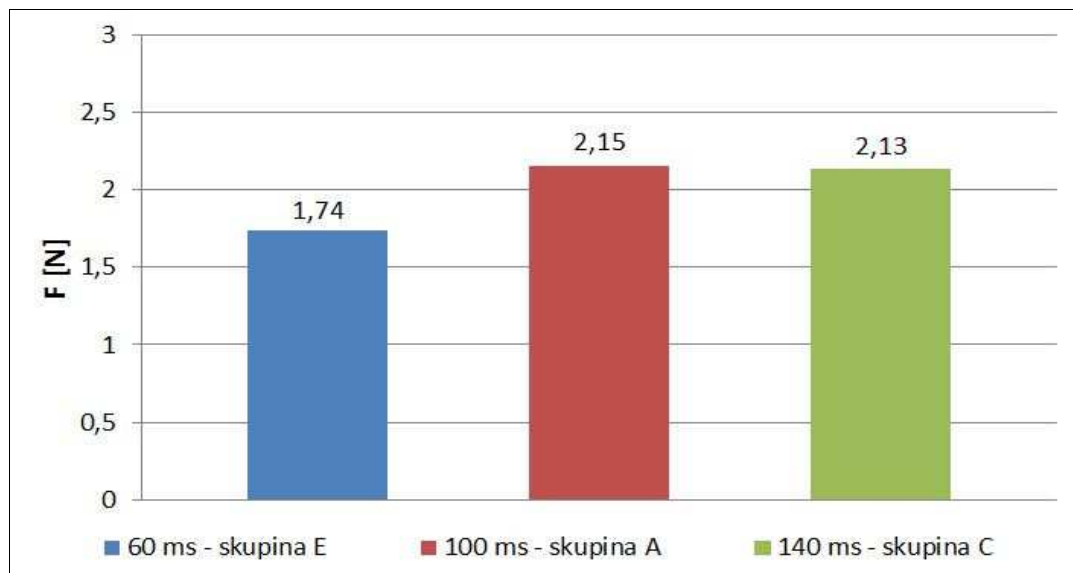
Graf 17 Pájecí hlava číslo 3 – čas pájení 100 ms

Grafy 18, 19 a 20 znázorňují závislost mechanické pevnosti sběrnice na pájecím čase **při konstantní teplotě pájení**. Teplota pájení testovaných sběrnic byla 185 °C. Při nejkratším čase pájení (60 ms) sběrnice pájené hlavou číslo jedna vykazovaly nejmenší průměrnou hodnotu mechanické pevnosti. Při čase pájení 100 ms byla změřena průměrná mechanická pevnost sběrnice 2,31 N. Při testování sběrnic pájených při čase 140 ms průměrná hodnota mechanické pevnosti opět klesla.



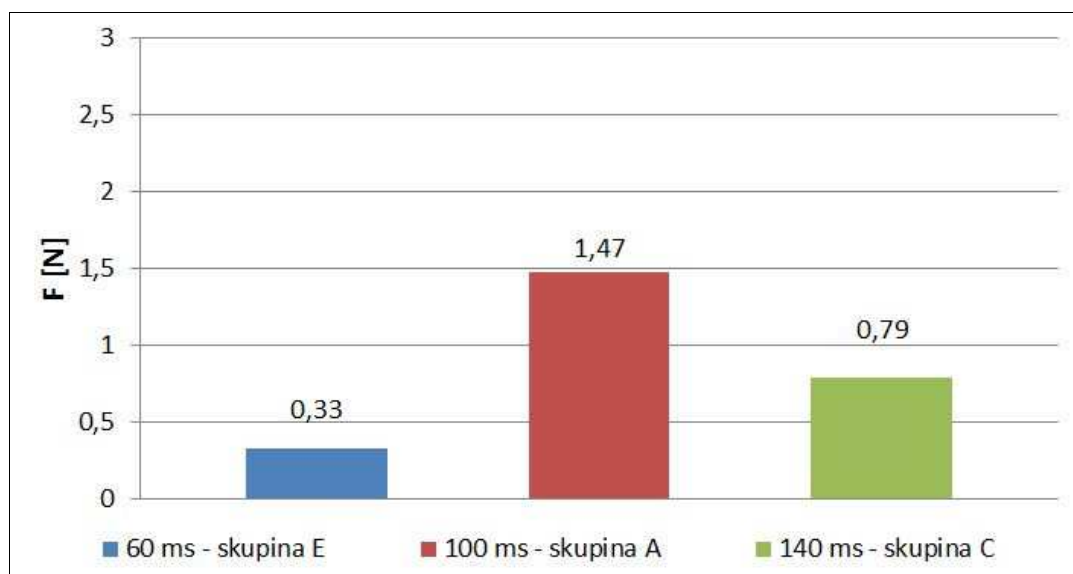
Graf 18 Pájecí hlava číslo 1 – teplota pájení 185 °C

Závislost mechanické pevnosti sběrnice číslo dva na čase pájení vykazuje stejný trend jako tomu bylo u pájecí hlavy číslo jedna. Nejnižší průměrnou hodnotu mechanické pevnosti opět vykazují sběrnice pájené první hlavou (1,74 N) a naopak nejvyšší mechanickou pevnost představují sběrnice pájené hlavou číslo dva (2,15 N).



Graf 19 Pájecí hlava číslo 2 – teplota pájení 220 °C

Sběrnice pájené hlavou číslo tři opět vykazují stejné vlastnosti jako sběrnice pájené první a druhou hlavou. Nejnižší hodnota mechanické pevnosti byla naměřena opět u skupiny E a naopak nejvyšších hodnot v rámci druhé části měření dosahují sběrnice ze skupiny A.



Graf 20 Pájecí hlava číslo 3 – teplota pájení 230 °C

6 Korelační analýza výsledků měření

Korelace popisuje vzájemný vztah mezi dvěma veličinami. Pokud se jedna veličina mění, tak se korelativně mění i veličina druhá a naopak. Ukáže-li se mezi dvěma veličinami korelace, je potom pravděpodobné, že na sobě obě veličiny závisejí. Základním vztahem dvou proměnných je vztah lineární, jehož míru lze zjistit korelačním koeficientem. Korelační koeficient představuje míru korelace. Může nabývat hodnot v intervalu od -1 do +1. Druhá mocnina korelačního koeficientu r^2 se nazývá koeficient determinace a nabývá hodnot od 0 do +1. V případě kladné korelace hodnoty obou proměnných zároveň stoupají. V případě korelace záporné hodnota jedné proměnné stoupá a druhé klesá. [25, 26]

6.1 Výpočet korelačního koeficientu a test významnosti

K určení závislosti přechodového odporu na mechanické pevnosti byl počítán tzv. Pearsonův korelační koeficient, který je dán vztahem:

$$r = \frac{\sum(x_i - \bar{x}) \cdot (y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum(x_i - \bar{x})^2 \cdot \sum(y_i - \bar{y})^2}} \quad (6.1)$$

V programu Excel pro Pearsonův korelační koeficient existuje funkce PEARSON. Dále bylo nutné určit testovací kritérium t a porovnat jej s kritickou hodnotou t_{KRIT} . Je-li $t > t_{\text{KRIT}}$, poté korelační koeficient je statisticky významný a mezi danými soubory existuje statisticky významná korelační vazba. Nastane-li případ, že $t < t_{\text{KRIT}}$, pak je korelační koeficient statisticky nevýznamný a mezi soubory není patrná vzájemná korelace. Pro výpočet kritické hodnoty testovacího kritéria (t_{KRIT}) bylo v programu Excel použito statistické funkce TINV. Funkce TINV je v Excelu definována dvěma parametry, kde prvním je hladina významnosti α a druhým je stupeň volnosti ($n - 2$). Pro výpočet testovacího kritéria t v programu Excel statistická funkce neexistuje, a proto byl tento koeficient počítán dle vztahu:

$$t = \frac{|r| \cdot \sqrt{n - 2}}{\sqrt{1 - r^2}} \quad (6.2)$$

Jelikož je každá skupina zastoupena pěti solárními články a na každé pájecí hlavě je jiná teplota, není možné vytvořit detailní korelační analýzu pro vzájemné porovnání vlastností

testovaných sběrnic. V technické praxi se doporučuje, aby byly výsledky výpovědi schopné, počet testovaných objektů minimálně 25. Při 25 testovaných objektech je kritická hodnota testovacího kritéria ($TINV(0,05;23)$) rovna hodnotě 2,07. V našem případě je hodnota testovacího kritéria 12,71. V průběhu zpracování korelační analýzy často docházelo k tomu, že hodnota korelačního koeficientu byla vysoká (např. $r = 0,88$) a i přesto byla splněna podmínka: $t < t_{KRIT}$ a korelace byla vyhodnocena jako statisticky nevýznamná. V případě, že by byl k dispozici větší počet testovaných článků a tyto články by vykazovaly stejné vlastnosti, tato závislost by byla vyhodnocena jako statisticky významná. V práci tedy z důvodu malého počtu testovaných článků stejných vlastností, podmínka: $t < t_{KRIT}$ byla vždy splněna a korelace tak byla vždy vyhodnocena jako statisticky nevýznamná na hladině významnosti $\alpha = 5 \%$. Toto tvrzení je však velmi relativní, jelikož z pohledu statistického je podmínka splněna a vzájemná korelace není statisticky významná, ale z pohledu technologického vzájemná korelace existuje.

Korelaci dvou proměnných lze však vyjádřit i bez počítání testovacího kritéria a to pomocí intervalů, v kterých se korelační koeficient nachází:

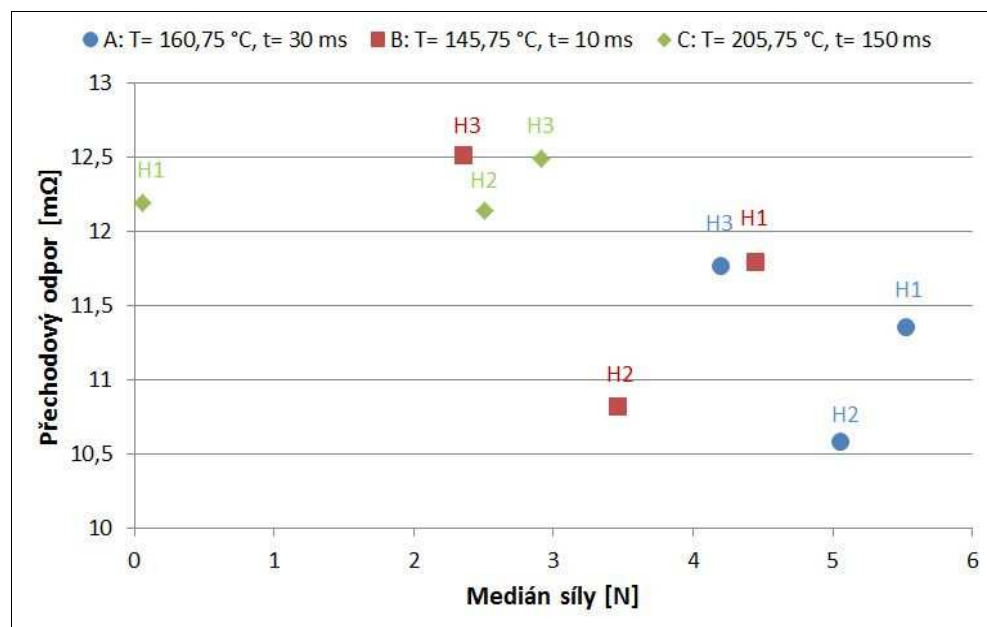
Tab. 3 Přibližná interpretace hodnot korelačního koeficientu, převzato z [27]

Korelační koeficient	Interpretace
$ r = 1$	Naprostá závislost (funkční závislost)
$1,0 \geq r \geq 0,9$	Velmi vysoká závislost
$0,9 \geq r \geq 0,7$	Velká závislost
$0,7 \geq r \geq 0,4$	Střední závislost
$0,4 \geq r \geq 0,2$	Nízká závislost
$0,2 \geq r \geq 0,0$	Slabá (nepoužitelná) závislost
$ r = 0$	Naprostá nezávislost

V další části práce bude představena závislost mezi naměřenými hodnotami přechodového odporu a hodnotami mechanické pevnosti.

6.2 První část měření

Ze vzájemného srovnání skupin testovaných FV článků (A vs. B vs. C) je patrné, že čím vyšší je mechanická pevnost solárních článků, tím nižší je přechodový odpor. Tato závislost platí pouze u vzájemného porovnání skupin mezi sebou, ale neplatí u porovnání sběrnic v rámci skupiny. Nejlepších vlastností dosahovaly solární články ze skupiny A, naopak nejhorších FV články ze skupiny C. Závislost přechodového odporu na mechanické pevnosti je znázorněna na *Grafu 21*.



Graf 21 Korelační analýza – 1. část měření

Ke *Grafu 21* jsou v *Tab. 4* vypočítány korelační koeficienty a testovací kritéria pro jednotlivé skupiny FV článků. Z výše zmíněných důvodů ani u jedné skupiny z obou částí měření není hodnota testovacího kritéria větší než je velikost kritické hodnoty a korelace je vyhodnocena vždy jako statisticky nevýznamná na hladině významnosti $\alpha = 5\%$.

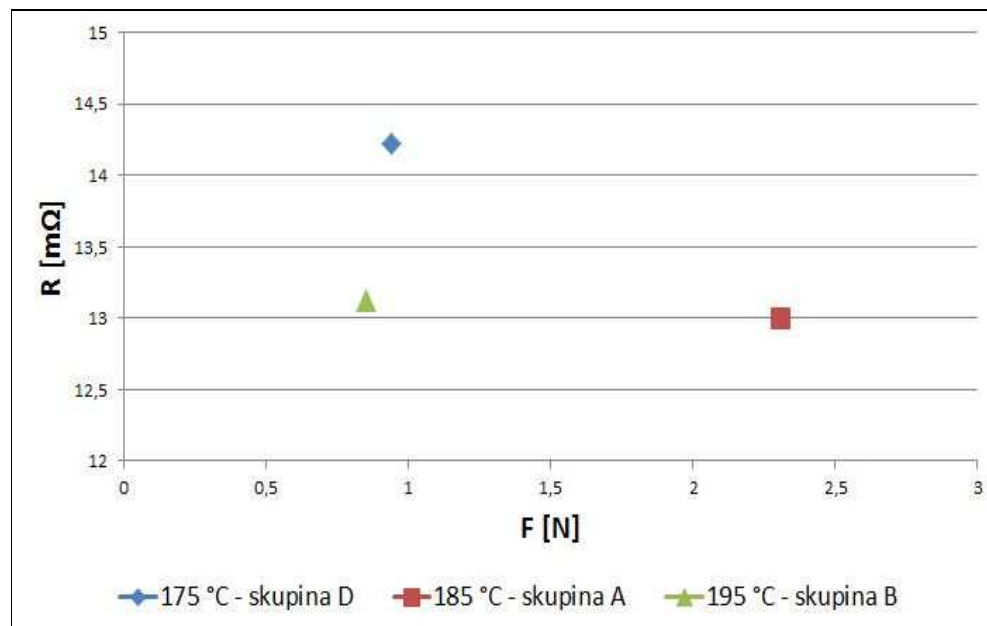
Tab. 4 Korelační analýza – 1. část měření

Název	r	r^2	n	α	t	t_{KRIT}
A	-0,49556	0,24557	3	0,05	0,57054	12,7062
B	-0,45406	0,20617	3	0,05	0,50963	12,7062
C	0,48341	0,23368	3	0,05	0,55222	12,7062

Korelační koeficient však lze posuzovat i dle jeho velikosti (*Tab. 3*). V tomto případě se korelační koeficient u všech třech skupin nachází v intervalu 0,4 – 0,7 a korelaci lze označit jako středně závislou.

6.3 Druhá část měření

Na *Grafech 22, 23 a 24* je znázorněna závislost přechodového odporu na mechanické pevnosti jednotlivých sběrnic FV článku. Jsou zde porovnávány skupiny solárních článků A, B a D, které mají **shodný čas pájení** (100 ms). U těchto skupin byla měnícím se parametrem pájecí teplota, která byla u testovaných skupin FV článků vzájemně odlišná (*Tab. 2*). Sběrnice pájené při teplotě 175 °C (skupina D) vykazovaly nejvyšší přechodový odpor a srovnatelnou mechanickou pevnost se sběrnicemi pájenými při teplotě 195 °C. U sběrnic pájených při teplotě 185 °C byla naměřena průměrná mechanická pevnost o cca 2 N vyšší než je tomu u skupin D a B. Pájecí teplota v tomto případě ovlivňovala více mechanické vlastnosti pájeného spoje, jelikož hodnoty přechodového odporu jsou takřka srovnatelné.



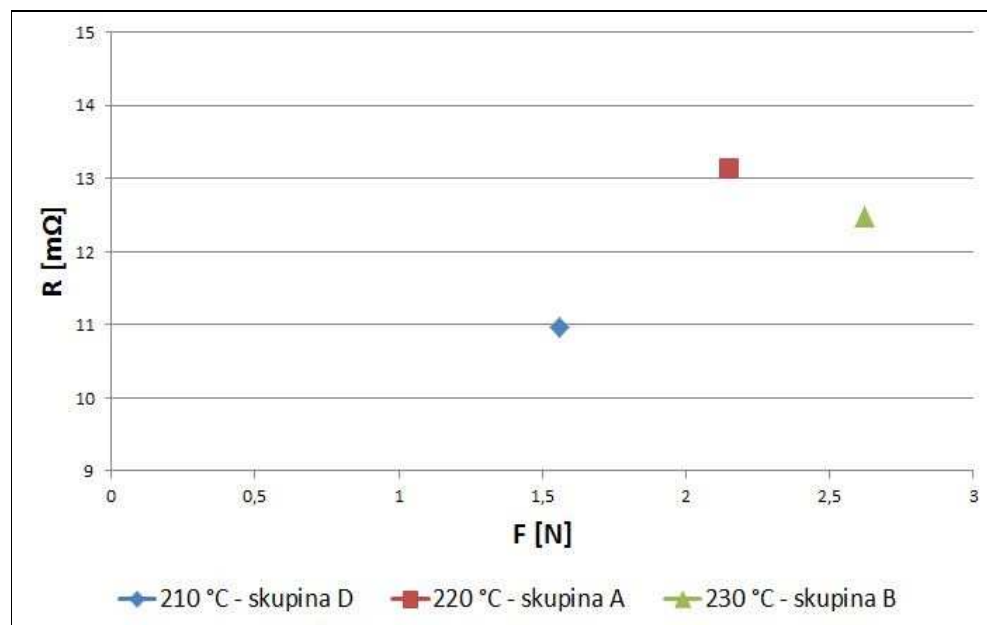
Graf 22 Korelační analýza - Pájecí hlava číslo 1 (čas pájení 100 ms)

Tab. 5 znázorňuje korelační analýzu pro *Graf 22*. V tomto případě je korelační koeficient opět v intervalu 0,4 – 0,7. Korelaci lze proto podle *Tab. 3* označit jako středně závislou.

Tab. 5 Korelační analýza – Pájecí hlava číslo 1 (čas pájení 100 ms)

Název	r	r^2	n	α	t	t_{KRIT}
1. Pájecí hlava	-0,54191	0,293672	3	0,05	0,6448	12,7062

U sběrnice číslo dva pájené při teplotě 210 °C (skupina D) byla naměřena nejnižší průměrná hodnota přechodového odporu i mechanické pevnosti. Sběrnice pájené při vyšší teplotě, tzn. 220 °C vykazovaly vyšší mechanickou pevnost a vyšší přechodový odpor. Při ještě vyšší teplotě (230 °C) opět mechanická pevnost vzrostla a o to až na průměrnou hodnotu 2,62 N. Při této teplotě došlo k poklesu přechodového odporu ve srovnání se skupinou A o cca 1 mΩ.



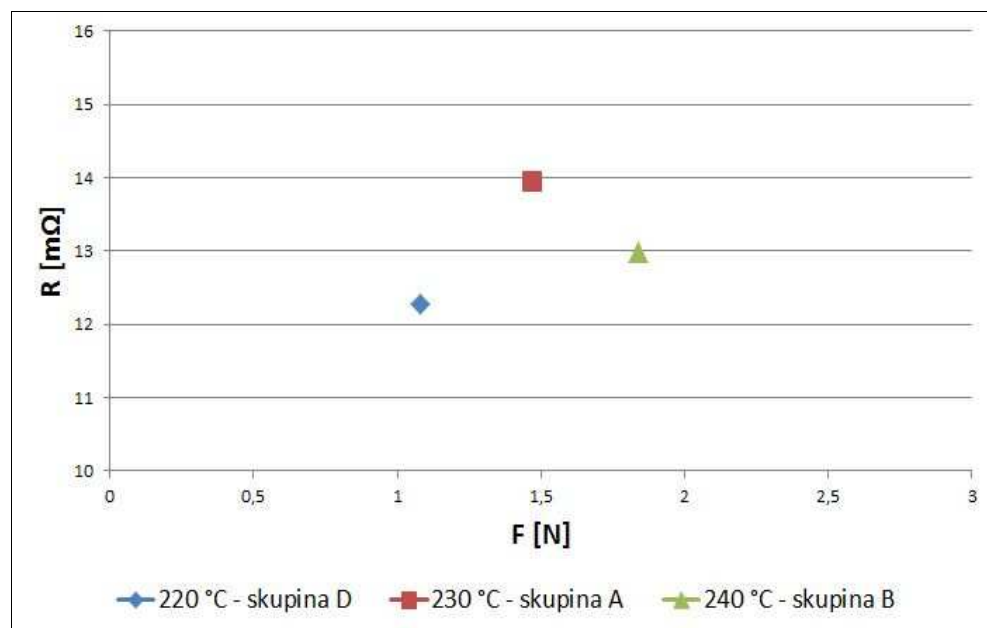
Graf 23 Korelační analýza - Pájecí hlava číslo 2 (čas pájení 100 ms)

V Tab. 6 je vyjádřena korelační analýza pro Graf 23. Korelační koeficient zde dosahuje hodnoty 0,73 a dle Tab. 3 lze korelaci popsat jako vysoce závislou. Je však potřeba poznamenat, že hodnota 0,73 se blíží spodní hranici intervalu 0,7 – 0,9.

Tab. 6 Korelační analýza – Pájecí hlava číslo 2 (čas pájení 100 ms)

Název	r	r^2	n	α	t	t_{KRIT}
2. Pájecí hlava	0,731067	0,534458	3	0,05	1,071464	12,7062

Třetí sběrnice FV článků ze skupin A, B a D vykazují stejné vlastnosti, jaké vykazovaly sběrnice číslo dva. Při testování sběrnic pájených při teplotě 220 °C (skupina D) byla naměřena opět nejnižší průměrná hodnota přechodového odporu i hodnota mechanické pevnosti. Při měření sběrnic pájených při teplotě vyšší, tzn. 230 °C, tyto sběrnice vykazovaly vyšší mechanickou pevnost a vyšší přechodový odpor. U sběrnic ze skupiny B pájených při teplotě 240 °C byla naměřena opět vyšší hodnota mechanické pevnosti a nižší hodnota přechodového odporu ve srovnání se sběrnicemi pájenými při teplotě 230 °C.



Graf 24 Korelační analýza - Pájecí hlava číslo 3 (čas pájení 100 ms)

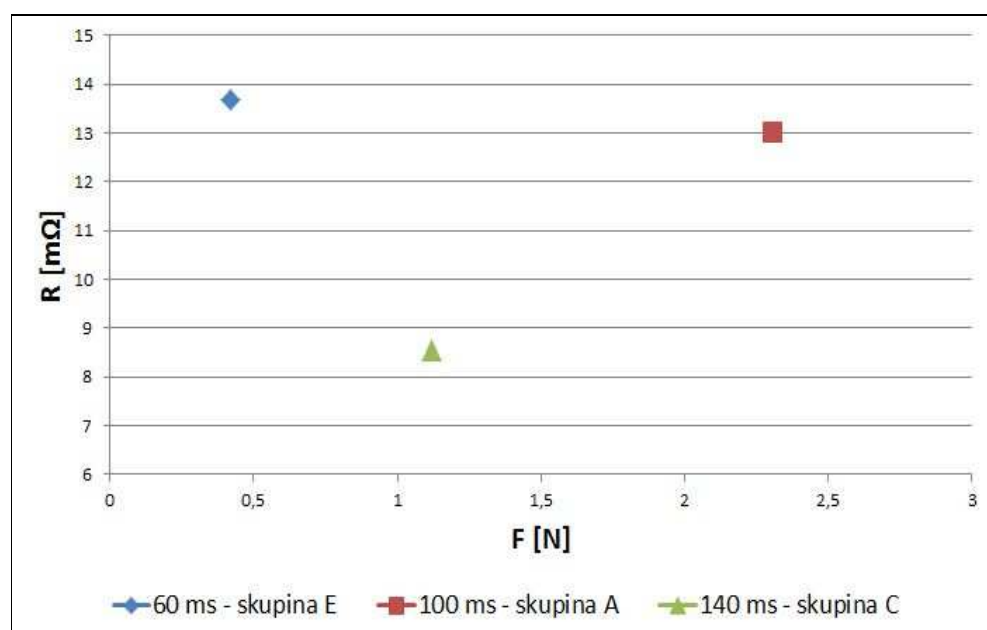
Korelační koeficient ke *Grafu 24* byl vypočítán funkcí PEARSON a dosáhl hodnoty 0,44. Tato hodnota spadá do intervalu 0,4 – 0,7 a korelaci lze vyhodnotit jako středně závislou.

Tab. 7 Korelační analýza – Pájecí hlava číslo 3 (čas pájení 100 ms)

Název	r	r^2	n	α	t	t_{KRIT}
3. Pájecí hlava	0,437283	0,191217	3	0,05	0,486236	12,7062

Na *Grafech 25, 26 a 27* je znázorněna opět závislost přechodového odporu na mechanické pevnosti jednotlivých sběrnic FV článku. Na těchto grafech jsou porovnávány skupiny solárních článků A, C a E, které mají **shodnou průměrnou teplotu pájení (212 °C)**.

Sběrnice pájené hlavou číslo jedna při čase pájení 60 ms (skupina E) vykazovaly nejnižší hodnotu mechanické pevnosti ve srovnání se skupinami A a C. Skupina E také vykazovala na sběrnici číslo jedna nejvyšší průměrnou hodnotu přechodového odporu. U sběrnic pájených při čase 100 ms byla naměřena nejvyšší hodnota mechanické pevnosti a nižší hodnota přechodového odporu oproti skupině E. Při testování sběrnic pájených při čase 140 ms (skupina C) byla naměřena nejnižší hodnota přechodového odporu ve srovnání se skupinami A a E. Během přechodu z času pájení 100 ms na čas 140 ms došlo u testovaných sběrnic k poklesu jejich mechanické pevnosti a k také k poklesu přechodového odporu.



Graf 25 Korelační analýza - Pájecí hlava číslo 1 (teplota pájení 185 °C)

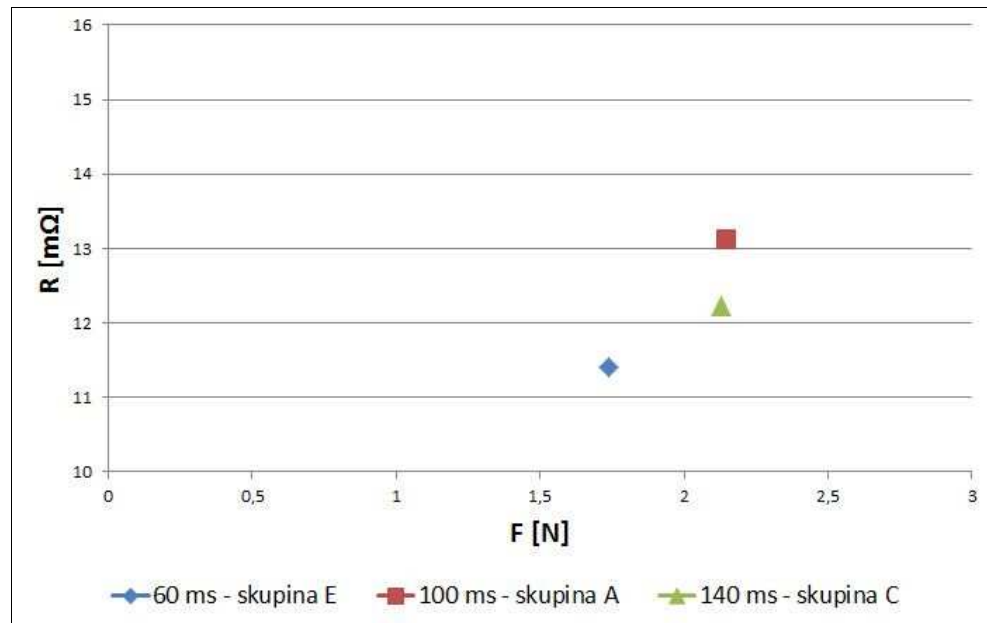
Korelační koeficient u tohoto grafu dosahoval hodnoty 0,02 a tato hodnota byla nejnižší z obou částí měření. Korelace o takové velikosti korelačního koeficientu se označuje dle Tab. 3 jako velmi slabá.

Tab. 8 Korelační analýza – Pájecí hlava číslo 1 (teplota pájení 185 °C)

Název	r	r^2	n	α	t	t_{KRIT}
1. Pájecí hlava	0,022948	0,000527	3	0,05	0,022954	12,7062

Sběrnice pájené při průměrné teplotě 212 °C a při čase pájení 60 ms (skupina E) vykazovaly nejnižší hodnotu mechanické pevnosti i přechodového odporu. U sběrnic

pájených při čase 100 ms byla naměřena hodnota mechanické pevnosti vyšší než je tomu u skupin C a E. Tyto sběrnice však vykazovaly nejvyšší přechodový odpor. Při čase pájení 140 ms opět došlo k poklesu mechanické pevnosti a k poklesu přechodového odporu oproti skupině A.



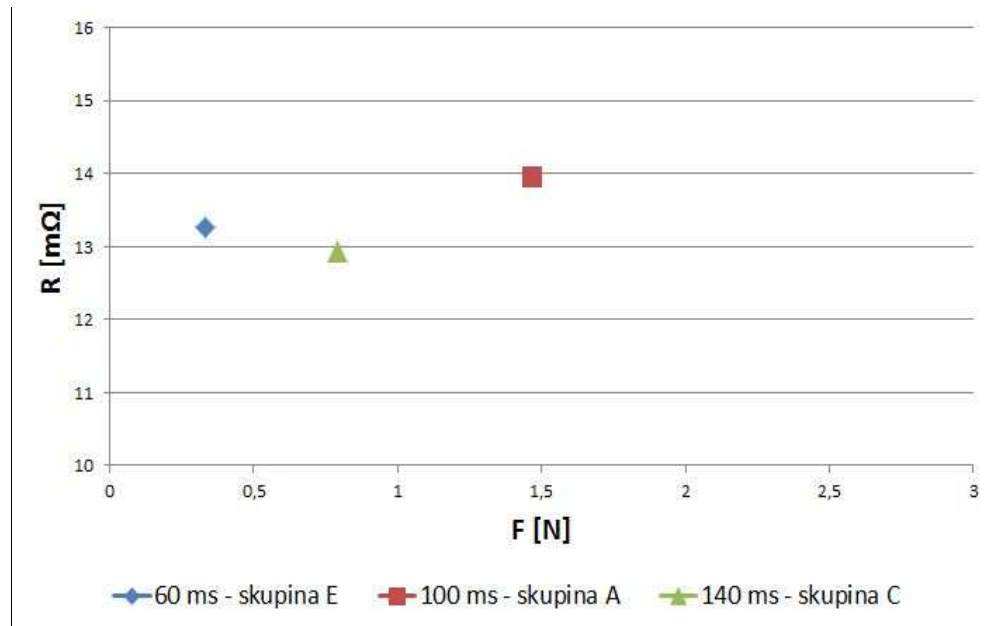
Graf 26 Korelační analýza - Pájecí hlava číslo 2 (teplota pájení 220 °C)

Tato skupina dosáhla nejvyššího korelačního koeficientu ze všech testovaných. Velikost korelačního koeficientu zde byla vypočítána na hodnotu 0,88 a korelace byla dle Tab. 3 vyhodnocena jako velmi vysoká.

Tab. 9 Korelační analýza – Pájecí hlava číslo 2 (teplota pájení 220 °C)

Název	r	r^2	n	α	t	t_{KRIT}
2. Pájecí hlava	0,880562	0,775389	3	0,05	1,857992	12,7062

Sběrnice pájené hlavou číslo tři vykazovaly stejný trend jako sběrnice pájené hlavou číslo jedna a dva. Opět při nejkratším čase pájení byla naměřena nejmenší hodnota mechanické pevnosti. Při čase pájení 100 ms sběrnice vykazovaly nejvyšší mechanickou pevnost a zároveň nejvyšší přechodový odpor. Rozdíl v naměřených přechodových odporech jednotlivých skupin je však minimální. Při nejdelším čase pájení, tzn. 140 ms, opět došlo k poklesu mechanické pevnosti a ke snížení přechodového odporu.



Graf 27 Korelační analýza - Pájecí hlava číslo 3 (teplota pájení 230 °C)

Korelace ke Grafu 27 byla dle Tab. 3 vyhodnocena jako velmi vysoká.

Tab. 10 Korelační analýza – Pájecí hlava číslo 3 (teplota pájení 230 °C)

Název	r	r^2	n	α	t	t_{KRIT}
3. Pájecí hlava	0,741684	0,550096	3	0,05	1,105756	12,7062

7 Dosažené výsledky měření

Měřením bylo zjištěno, že nejlepších vlastností v rámci první části měření dosahují solární články ze skupiny A. U této skupiny byla průměrná teplota pájení 160,75 °C a čas pájení 30 ms. Mechanická pevnost pájeného spoje u této skupiny byla v rozmezí od 4 N do 6 N. Tato skupina splňovala jako jediné stanovené kritérium o hodnotě mechanické pevnosti udávané v praxi (3 N). Přechodový odpor této skupiny byl v rámci první části měření také nejnižší. Nejhorší vlastnosti z první části měření vykazovaly solární články ze skupiny C ($T_P = 205,75$ °C, $t_P = 150$ ms).

V rámci druhé části měření byly nejlepší vlastnosti naměřeny u solárních článků ze skupiny A. Sběrnice FV článků ze skupiny A byly pájeny při průměrné teplotě 212 °C při čase pájení 100 ms. Tyto solární články měly v rámci druhé části měření nejvyšší průměrný medián síly a přechodový odpor u této skupiny byl řádově srovnatelný s ostatními testovanými skupinami. Naopak nejhorších vlastností u obou typů měření dosahovaly FV články ze skupin D ($T_P = 202$ °C, $t_P = 100$ ms) a E ($T_P = 212$ °C, $t_P = 60$ ms). Tyto solární články vykazovaly mechanickou pevnost v rozmezí 0 - 1,5 N.

Je důležité poznamenat, že průměrná teplota pájení z *Tab. 1* byla zaznamenána strojem pro vzájemné proletování solárních článků (jednalo se o teplotu, která byla reálně použita při pájení) a průměrná teplota pájení z *Tab. 2* byla vypočtena jako aritmetický průměr teplot jednotlivých pájecích hlav, které byly nastaveny obsluhou pájecího zařízení. Dle informací od výrobce je bohužel značný rozdíl mezi „nastavenou“ a „reálně zaznamenanou“ hodnotou pájecí teploty. Není tedy možné tyto dvě rozdílné skupiny hodnot porovnávat a je nutné výsledky z první a druhé části měření posuzovat jednotlivě a nezávisle.

Pomocí srovnávací metody bylo zjištěno, že optimální pro výrobu pájeného spoje FV článku je čas pájení 30 ms a průměrná teplota pájení 160,75 °C.

8 Závěr

Jak již bylo zmíněno v úvodu práce, měření a soustavné zlepšování výrobních procesů je součástí každého průmyslového odvětví a předložená diplomová práce s názvem „Měření mechanických a elektrických vlastností pájeného spoje“ toto potvrzuje, jelikož výsledky z experimentální části měření by měly sloužit k optimalizaci výrobního procesu pájených spojů solárních článků.

V první části práce bylo představeno pájení jako jeden ze způsobů spojování materiálů. Další část se detailněji věnovala pájenému spoji a jeho vlastnostem. Dále byly v práci představeny způsoby zkoušení a testování pájených spojů a jednotlivé vlivy, které přímo souvisí s životností, spolehlivostí a jakostí pájeného spoje. V práci je také uvedena kapitola zabývající se přechodovým odporem a jeho měřením. Jelikož v experimentální části všechna měření probíhala na solárních člancích, je v práci uvedena i kapitola zabývající se fotovoltaikou.

Hlavním cílem této práce bylo vyhodnocení experimentálního měření. U testovaných sběrnic solárních článků byl měřen přechodový odpor a mechanická pevnost. Měřením bylo zjištěno, že optimálních vlastností dosahují sběrnice solárních článků pájené při průměrné teplotě 160,75 °C a při čase pájení 30 ms.

Při získání většího počtu kusů a skupin solárních článků podobných vlastností jaké vykazovaly solární články ze skupiny A z první částí měření (pájecí teplota cca 160 °C a čas pájení cca 30 ms) by bylo možné na experimentální část práce navázat a stanovit tak detailněji optimální vlastnosti pro výrobu pájeného spoje FV článku.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] VUT v Brně: Pájení v elektrotechnice. [online]. 2007 [cit. 2012-11-10]. Dostupné z: <http://www.umel.feec.vutbr.cz/~vasko/multimedialni-ucebnice/pajeni-v-elektrotechnice/>
- [2] MACH, Pavel, Vlastimil SKOČIL a Jan URBÁNEK. *Montáž v elektronice*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2001.
- [3] SZENDIUCH, I. *Základy technologie mikroelektronických obvodů a systémů*. VUTIUM, 2006, 378s.
- [4] STEJSKAL, Petr. *Vliv intermetalických sloučenin na spolehlivost pájeného spoje*. Plzeň, 2008.
- [5] Úloha 12. Mechanické vlastnosti pájených látek (zejména kovů). *Fakulta strojího inženýrství VUT v Brně* [online]. [cit. 2013-02-19]. Dostupné z: http://www.sci.muni.cz/chemsekcce/c8870/pdf/Uloha12_mechan_vl.pdf
- [6] Mechanické vlastnosti a charakteristiky materiálů I *Fakulta strojího inženýrství VUT v Brně* [online]. [cit. 2013-02-19]. Dostupné z: ime.fme.vutbr.cz/files/vyuka/BUM/02-BUM.ppt
- [7] Přednášky: *Elektrotechnické materiály a prostředí: Doc. Ing. Eva Kučerová CSc., Západočeská univerzita v Plzni, Katedra technologií a měření, 2009*.
- [8] Elektrický kontakt. *Přechodový odpor kontaktů* [online]. [cit. 2013-02-19]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Elektrický_kontakt
- [9] Měření při kontrole silových instalací a elektrických spotřebičů. *Přechodový odpor* [online]. [cit. 2013-02-19]. Dostupné z: <http://www.edunet.souepl.cz/~weisz/dilna/mp/merinst.php#prechodovyodpor>
- [10] MAĀÁTKO, Jan. *Elektronika*. Praha : IDEA SERVIS, 2008. 362 s.
- [11] Solární energie: FOTOVOLTAIKA. *Solární energie ČEZ* [online]. 2006 [cit. 2012-11-10]. Dostupné z: <http://www.cez.cz/edee/content/microsites/solarni/kap3.htm>
- [12] Česká agentura pro obnovitelné zdroje: Fotovoltaika pro každého. *Česká agentura pro obnovitelné zdroje* [online]. 2009 [cit. 2012-11-10]. Dostupné z: <http://www.czrea.org/cs/druhy-oze/fotovoltaika>
- [13] Solar Knowledge: The History of Photovoltaics. *Solar Knowledge* [online]. 2009 [cit. 2012-11-10]. Dostupné z: <http://solarknowledge.blogspot.cz/2009/01/history-of-photovoltaics.html>
- [14] Aldebaran Group for Astrophysics: Současný stav a trendy ve vývoji fotovoltaických panelů. *Aldebaran Group for Astrophysics* [online]. 2010 [cit. 2012-11-10]. Dostupné z: http://www.aldebaran.cz/bulletin/2010_37_fot.php
- [15] Energy Pay-Back Time (EPBT) and CO2 mitigation potential: Energy Pay Back Time. [online]. 1997 [cit. 2013-03-18]. Dostupné z: <http://www.ecotopia.com/apollo2/pvepbtne.htm>
- [16] LIBRA, Martin; POULEK, Vladislav. *Fotovoltaika, Teorie i praxe využití solární energie*. Praha : ILSA, 2009. 160 s.
- [17] HASELHUHN, Ralf. *Fotovoltaika: Budovy jako zdroj proudu*. Ostrava - Plesná: Nakladatelství HEL, 2011.
- [18] Solar PV Panel Types. *Monocrystalline Solar Cells* [online]. [cit. 2013-02-17]. Dostupné z: <http://www.solarvisenergy.co.uk/pVSolarPanelTypes/>
- [19] Fotovoltaika. *Polykrystalický článek* [online]. [cit. 2013-02-17]. Dostupné z: <http://fotovoltaika.falconis.cz/fotovoltaika/vykon.php>

- [20] Automatizace.hw.cz. *Nové technologie pro levné i výkonné solární články* [online]. [cit. 2013-02-17]. Dostupné z: <http://automatizace.hw.cz/nove-technologie-pro-levne-i-vykonne-solarni-clanky>
- [21] CZANDERA, A. W.; PERN, F. J.: *Encapsulation of PV modules using ethylene vinyl acetate copolymer as a pottant: A critical review*. *Solar Energy Materials & Solar Cells* 43(1995), s. 101-181.
- [22] *ISolar* [online]. 2009 [cit. 2011-03-19]. Stručný generační vývoj. Dostupné z WWW: <<http://www.isolar.cz/technologie.html>>.
- [23] *FV solární panely* [online]. 2011 [cit. 2011-03-19]. Fotovoltaické panely. Dostupné z WWW: <http://www.fvsolarnipanely.cz/fotovoltaicke_panely.php>.
- [24] *Fotovoltaické panely: Jsou skutečně ekologické?: Jak se zpracovává fotovoltaický odpad?* [online]. [cit. 2013-03-18]. Dostupné z: <http://www.nazeleno.cz/energie/fotovoltaika-1/fotovoltaicke-panely-jsou-skutecne-ekologicke.aspx>
- [25] *Korelace* [online]. [cit. 2013-03-19]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Korelace>
- [26] *Korelace*. MILDE, David. [online]. [cit. 2013-03-25]. Dostupné z: <http://ach.upol.cz/user-files/intranet/15-korelace-2011-1321473930.pdf>
- [27] *Základy statistiky: Koeficienty „efekt size“ jako vodítko pro posuzování věcné významnosti statisticky testovaných rozdílů*. [online]. [cit. 2013-04-04]. Dostupné z: files.cfkr.eu/200000080.../ZAKLADYstatistikySKRIPTA2.pdf

Seznam příloh

PŘÍLOHA A	Fotodokumentace z výroby solárních panelů
PŘÍLOHA B	Podrobná specifikace použitých měřicích přístrojů
PŘÍLOHA C	Naměřené hodnoty přechodového odporu z první části měření
PŘÍLOHA D	Naměřené hodnoty přechodového odporu z druhé části měření
PŘÍLOHA E	Solární články před a po testování pevnosti v tahu
PŘÍLOHA F	Ukázka statistické analýzy v programu Minitab
PŘÍLOHA G	Průběhy síly zaznamenané z první části měření
PŘÍLOHA H	Průběhy síly zaznamenané z druhé části měření

Přílohy

Příloha A Fotodokumentace z výroby solárních panelů



Obr. A-1 Křemíkové články



Obr. A-2 Zařízení na proletování solárních článků



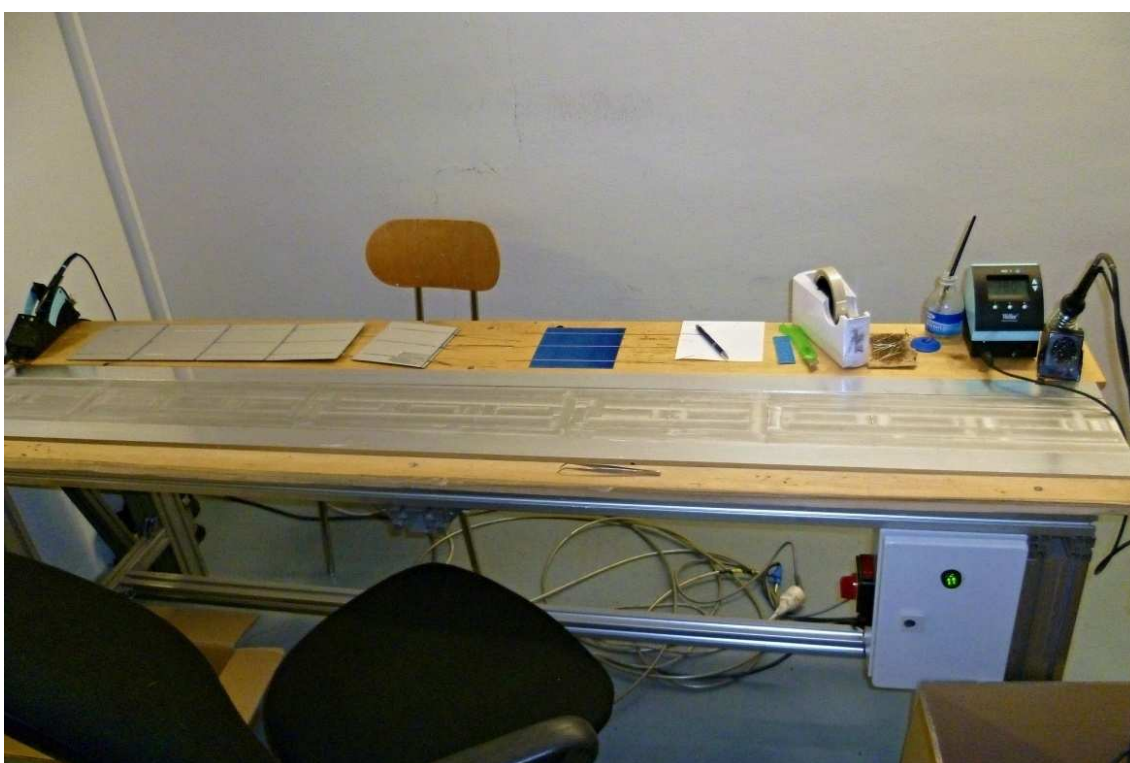
Obr. A-3 Detailní pohled na pájecí hlavu



Obr. A-4 Lay-up manipulátor s prísavkami



Obr. A-5 Propájená řada solárních článků



Obr. A-6 Kontrolní pájecí pracoviště



Obr. A-7 Vstupní dopravník, proces posuvu a rovnání polotovaru před laminací



Obr. A-8 Laminátor a následný proces laminace



Obr. A-9 Pracoviště na ořezávání přebytečného laminátu



Obr. A-10 Rámování (framing) a nově vzniklý FV panel (netestovaný)



Obr. A-11 Jednotka pro měření a testování nových FV panelů



Obr. A-12 Štítkové hodnoty polykrystalického FV panelu

Příloha B Podrobná specifikace použitých měřicích přístrojů



Obr. B-1 Stabilizovaný stolní zdroj od společnosti STATRON (typ 3254.1)

Tab. B-1 Technické parametry stabilizovaného stolního zdroje STATRON 3254.1

DC výstupní napětí [V]	0-36
DC výstupní proud trvalý [A]	0-20
Doba nast. 10-100 % [ms]	30
Rozlišení [%]	0,05
Výstupní charakteristika	U/I
Displej U/I	LCD 13mm
Provozní teplota [°C]	0-35
Max. relativní vlhkost vzduchu [%] při 35° C	85
AC vstupní napětí [V]	230 +6/-10% 48-62Hz
Krytí	IP 30
Třída přístroje	I.
Rozměry (š x v x h) [mm]	451x134x324
Hmotnost cca [kg]	19,8



Obr. A-2 Nanovoltmetr od společnosti KEITHLEY (typ 2182A)

Tab. B-2 Technické parametry nanovoltmetru KEITHLEY 2182A

A/D linearity	$\pm (0,8 \text{ ppm of reading} + 0,5 \text{ ppm of range})$
Maximum output [V]	1,2
Accuracy	$\pm (0,1 \% \text{ of output} + 1 \text{ mV})$
Output resistance [kΩ]	$1 \pm 5\%$
Power supply	100V/120V/220V/240V
Line frequency	50 Hz, 60 Hz and 400 Hz
Power consumption	22 VA
Dimension	89 mm high x 213 mm wide x 370 mm deep
Shipping weight	5 kg



Obr. B-3 Multimetr od společnosti Metex (typ M-3890D)

Tab. B-3 Technické parametry multimetru Metex M-3890D

Veličina	Měřicí rozsah	Podrozsahy	Přesnost
Napětí DC	0 ÷ 1 000 V	5	± (0,8 % rdg + 2dig) ± (0,5 % rdg + 2 dig) pro 400 mV
Napětí AC	0 ÷ 750 V	4	± (1,0 % rdg + 3 dig) ± (1,5 % rdg + 3 dig) pro 750 V
Proud DC	0 ÷ 20 A	5	± (0,8 % rdg + 2 dig) ± (1,2 % rdg + 2 dig) pro 40 mA ± (1,2 % rdg + 2 dig) pro 400 mA ± (2,0 % rdg + 3 dig) pro 20 A
Proud AC	0 ÷ 20 A	5	± (1,0 % rdg + 5 dig) ± (1,5 % rdg + 5 dig) pro 40 mA

			$\pm (1,5 \% \text{ rdg} + 5 \text{ dig})$ pro 400 mA $\pm (3,0 \% \text{ rdg} + 4 \text{ dig})$ pro 20 A
Odpor	0 ÷ 40 MΩ	6	$\pm (0,8 \% \text{ rdg} + 2 \text{ dig})$ $\pm (0,8 \% \text{ rdg} + 4 \text{ dig})$ pro 400 Ω $\pm (1,0 \% \text{ rdg} + 4 \text{ dig})$ pro 4 MΩ $\pm (1,5 \% \text{ rdg} + 5 \text{ dig})$ pro 40 MΩ
Kapacita	0 ÷ 200 μF	6	$\pm (2,0 \% \text{ rdg} + 5 \text{ dig})$ $\pm (3,0 \% \text{ rdg} + 5 \text{ dig})$ pro 4 μF $\pm (3,0 \% \text{ rdg} + 5 \text{ dig})$ pro 40 μF $\pm (5,0 \% \text{ rdg} + 5 \text{ dig})$ pro 200 μF
Kmitočet	0 ÷ 4 MHz	4	$\pm (0,1 \% \text{ rdg} + 1 \text{ dig})$
Vstupní odpor	10 MΩ		
Rychlost měření	2 měření / s		
Pracovní teplota	0 ÷ 40 °C		
Napájení	baterie 9V		
Rozměry	84 x 180 x 30 mm		

Příloha C Naměřené hodnoty přechodového odporu z první části měření

Název vzorku	Napětí přechodu U [mV]	Přechodový odpor R [mΩ]
A1H1	3,686	12,287
A1H2	3,487	11,623
A1H3	3,262	10,873
A1S1	2,715	9,050
A1S2	2,636	8,787
A1S3	2,786	9,287

Název vzorku	Napětí přechodu U [mV]	Přechodový odpor R [mΩ]
A2H1	3,762	12,540
A2H2	3,718	12,393
A2H3	3,731	12,437
A2S1	3,102	10,340
A2S2	2,996	9,987
A2S3	3,315	11,050

Název vzorku	Napětí přechodu U [mV]	Přechodový odpor R [mΩ]
A3H1	3,332	11,107
A3H2	2,614	8,713
A3H3	3,747	12,490
A3S1	3,179	10,597
A3S2	3,012	10,040
A3S3	3,585	11,950

Název vzorku	Napětí přechodu U [mV]	Přechodový odpor R [mΩ]
A4H1	2,689	8,963
A4H2	2,648	8,827
A4H3	3,783	12,610
A4S1	3,309	11,030
A4S2	3,131	10,437
A4S3	3,545	11,817

Název vzorku	Napětí přechodu U [mV]	Přechodový odpor R [mΩ]
A5H1	3,563	11,877
A5H2	3,409	11,363
A5H3	3,129	10,430
A5S1	3,424	11,413
A5S2	3,118	10,393
A5S3	3,781	12,603

Název vzorku	Napětí přechodu U [mV]	Přechodový odpor R [mΩ]
B1H1	3,458	11,527
B1H2	3,624	12,080
B1H3	3,546	11,820
B1S1	3,237	10,790
B1S2	3,890	12,967
B1S3	3,473	11,577

Název vzorku	Napětí přechodu U [mV]	Přechodový odpor R [mΩ]
B2H1	3,654	12,180
B2H2	3,541	11,803
B2H3	4,031	13,437
B2S1	4,024	13,413
B2S2	3,434	11,447
B2S3	3,727	12,423

Název vzorku	Napětí přechodu U [mV]	Přechodový odpor R [mΩ]
B3H1	3,151	10,503
B3H2	2,665	8,883
B3H3	3,733	12,443
B3S1	3,271	10,903
B3S2	3,275	10,917
B3S3	3,704	12,347

Název vzorku	Napětí přechodu U [mV]	Přechodový odpor R [mΩ]
B4H1	3,614	12,047
B4H2	2,743	9,143
B4H3	3,615	12,050
B4S1	3,396	11,320
B4S2	3,236	10,787
B4S3	3,521	11,737

Název vzorku	Napětí přechodu U [mV]	Přechodový odpor R [mΩ]
B5H1	3,811	12,703
B5H2	3,647	12,157
B5H3	3,841	12,803
B5S1	3,320	11,067
B5S2	3,237	10,790
B5S3	3,317	11,057

Název vzorku	Napětí přechodu U [mV]	Přechodový odpor R [mΩ]
C1H1	3,702	12,340
C1H2	4,056	13,520
C1H3	4,228	14,093
C1S1	3,472	11,573
C1S2	3,314	11,047
C1S3	X	X

Název vzorku	Napětí přechodu U [mV]	Přechodový odpor R [mΩ]
C2H1	4,238	14,127
C2H2	3,472	11,573
C2H3	3,831	12,770
C2S1	3,591	11,970
C2S2	3,334	11,113
C2S3	X	X

X – hodnota nenaměřena

Název vzorku	Napětí přechodu U [mV]	Přechodový odpor R [mΩ]
C3H1	3,541	11,803
C3H2	3,354	11,180
C3H3	3,481	11,603
C3S1	3,502	11,673
C3S2	3,145	10,483
C3S3	3,592	11,973

Název vzorku	Napětí přechodu U [mV]	Přechodový odpor R [mΩ]
C4H1	3,156	10,520
C4H2	3,311	11,037
C4H3	3,451	11,503
C4S1	3,533	11,777
C4S2	3,361	11,203
C4S3	3,575	11,917

Název vzorku	Aritmetický průměr R[Ω]	Směrodatná odchylka
AH1	11,355	1,29
AH2	10,584	1,52
AH3	11,768	0,924
AS1	10,486	0,806
AS2	9,929	0,599
AS3	11,341	1,14

Název vzorku	Aritmetický průměr R[Ω]	Směrodatná odchylka
BH1	11,792	0,745
BH2	10,813	1,538
BH3	12,511	0,572
BS1	11,499	0,883
BS2	11,381	0,829
BS3	11,828	0,508

Název vzorku	Aritmetický průměr R[Ω]	Směrodatná odchylka
CH1	12,198	1,295315
CH2	12,142	0,996723
CH3	12,493	0,940164
CS1	11,748	0,14679
CS2	10,962	0,281706
CS3	11,945	0,028333

Příloha D Naměřené hodnoty přechodového odporu z druhé části měření

Název vzorku	Napětí přechodu U [mV]	Přechodový odpor R [mΩ]
A1H1	4,016	13,387
A1H2	3,820	12,733
A1H3	3,791	12,637
A1S1	x	x
A1S2	2,896	9,653
A1S3	3,453	11,510

X – hodnota nenaměřena

Název vzorku	Napětí přechodu U [mV]	Přechodový odpor R [mΩ]
A2H1	3,907	13,023
A2H2	3,528	11,760
A2H3	3,524	11,747
A2S1	3,542	11,807
A2S2	x	x
A2S3	3,308	11,027

Název vzorku	Napětí přechodu U [mV]	Přechodový odpor R [mΩ]
A3H1	3,336	11,120
A3H2	2,527	8,423
A3H3	3,636	12,120
A3S1	2,965	9,883
A3S2	2,683	8,943
A3S3	2,392	7,973

Název vzorku	Napětí přechodu U [mV]	Přechodový odpor R [mΩ]
A4H1	4,176	13,920
A4H2	5,683	18,943
A4H3	5,154	17,180
A4S1	3,528	11,760
A4S2	x	x
A4S3	3,144	10,480

X – hodnota nenaměřena

Název vzorku	Napětí přechodu U [mV]	Přechodový odpor R [mΩ]
A5H1	4,043	13,477
A5H2	4,121	13,737
A5H3	4,817	16,057
A5S1	2,728	9,093
A5S2	x	x
A5S3	2,042	6,807

Název vzorku	Napětí přechodu U [mV]	Přechodový odpor R [mΩ]
B1H1	3,834	12,780
B1H2	3,727	12,423
B1H3	4,239	14,130
B1S1	x	x
B1S2	2,732	9,107
B1S3	3,041	10,137

Název vzorku	Napětí přechodu U [mV]	Přechodový odpor R [mΩ]
B2H1	4,215	14,050
B2H2	3,869	12,897
B2H3	4,101	13,670
B2S1	3,463	11,543
B2S2	2,672	8,907
B2S3	2,201	7,337

X – hodnota nenaměřena

Název vzorku	Napětí přechodu U [mV]	Přechodový odpor R [mΩ]
B3H1	3,928	13,093
B3H2	3,313	11,043
B3H3	4,003	13,343
B3S1	1,905	6,350
B3S2	3,903	13,010
B3S3	2,787	9,290

Název vzorku	Napětí přechodu U [mV]	Přechodový odpor R [mΩ]
B4H1	3,864	12,880
B4H2	3,917	13,057
B4H3	3,564	11,880
B4S1	2,444	8,147
B4S2	2,768	9,227
B4S3	4,136	13,787

Název vzorku	Napětí přechodu U [mV]	Přechodový odpor R [mΩ]
B5H1	3,847	12,823
B5H2	3,896	12,987
B5H3	3,571	11,903
B5S1	2,264	7,547
B5S2	x	x
B5S3	3,531	11,770

X – hodnota nenaměřena

Název vzorku	Napětí přechodu U [mV]	Přechodový odpor R [mΩ]
C1H1	3,581	11,937
C1H2	x	x
C1H3	x	x
C1S1	x	x
C1S2	x	x
C1S3	x	x

Název vzorku	Napětí přechodu U [mV]	Přechodový odpor R [mΩ]
C2H1	4,611	15,370
C2H2	x	x
C2H3	3,692	12,307
C2S1	3,980	13,267
C2S2	2,538	8,460
C2S3	2,711	9,037

Název vzorku	Napětí přechodu U [mV]	Přechodový odpor R [mΩ]
C3H1	3,836	12,787
C3H2	3,794	12,647
C3H3	4,227	14,090
C3S1	2,395	7,983
C3S2	3,078	10,260
C3S3	2,734	9,113

X – hodnota nenaměřena

Název vzorku	Napětí přechodu U [mV]	Přechodový odpor R [mΩ]
C4H1	3,736	12,453
C4H2	3,647	12,157
C4H3	3,727	12,423
C4S1	2,031	6,770
C4S2	2,177	7,257
C4S3	2,167	7,223

Název vzorku	Napětí přechodu U [mV]	Přechodový odpor R [mΩ]
C5H1	2,561	8,537
C5H2	3,574	11,913
C5H3	3,872	12,907
C5S1	2,197	7,323
C5S2	1,192	3,973
C5S3	2,143	7,143

Název vzorku	Napětí přechodu U [mV]	Přechodový odpor R [mΩ]
D1H1	2,576	8,587
D1H2	2,565	8,550
D1H3	3,785	12,617
D1S1	2,541	8,470
D1S2	1,178	3,927
D1S3	1,904	6,347

Název vzorku	Napětí přechodu U [mV]	Přechodový odpor R [mΩ]
D2H1	4,255	14,183
D2H2	3,836	12,787
D2H3	4,017	13,390
D2S1	2,327	7,757
D2S2	1,683	5,610
D2S3	1,879	6,263

Název vzorku	Napětí přechodu U [mV]	Přechodový odpor R [mΩ]
D3H1	5,476	18,253
D3H2	2,498	8,327
D3H3	2,444	8,147
D3S1	1,971	6,570
D3S2	1,940	6,467
D3S3	2,470	8,233

Název vzorku	Napětí přechodu U [mV]	Přechodový odpor R [mΩ]
D4H1	4,636	15,453
D4H2	3,708	12,360
D4H3	4,078	13,593
D4S1	1,932	6,440
D4S2	3,364	11,213
D4S3	3,096	10,320

Název vzorku	Napětí přechodu U [mV]	Přechodový odpor R [mΩ]
D5H1	4,383	14,610
D5H2	3,837	12,790
D5H3	4,089	13,630
D5S1	3,378	11,260
D5S2	2,026	6,753
D5S3	1,841	6,137

Název vzorku	Napětí přechodu U [mV]	Přechodový odpor R [mΩ]
E1H1	4,310	14,367
E1H2	2,917	9,723
E1H3	5,417	18,057
E1S1	2,228	7,427
E1S2	5,718	19,060
E1S3	2,191	7,303

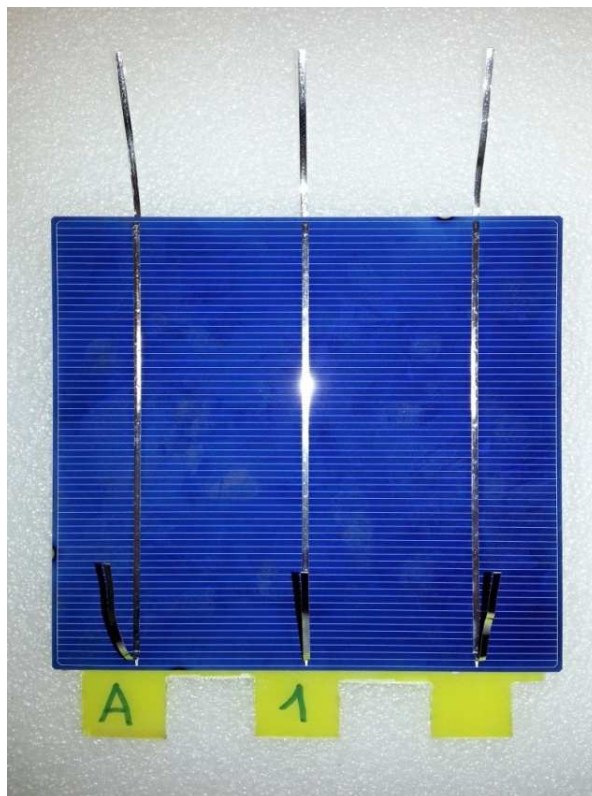
Název vzorku	Napětí přechodu U [mV]	Přechodový odpor R [mΩ]
E2H1	3,997	13,323
E2H2	4,445	14,817
E2H3	4,294	14,313
E2S1	1,852	6,173
E2S2	1,628	5,427
E2S3	2,299	7,663

Název vzorku	Napětí přechodu U [mV]	Přechodový odpor R [mΩ]
E3H1	3,883	12,943
E3H2	3,513	11,710
E3H3	2,328	7,759
E3S1	2,445	8,150
E3S2	5,455	18,183
E3S3	3,218	10,727

Název vzorku	Napětí přechodu U [mV]	Přechodový odpor R [mΩ]
E4H1	4,559	15,197
E4H2	2,512	8,373
E4H3	4,111	13,703
E4S1	1,741	5,803
E4S2	3,190	10,633
E4S3	2,202	7,340

Název vzorku	Napětí přechodu U [mV]	Přechodový odpor R [mΩ]
E5H1	3,791	12,637
E5H2	3,717	12,390
E5H3	3,744	12,480
E5S1	1,914	6,380
E5S2	1,503	5,010
E5S3	2,432	8,107

Příloha E Solární články před a po testování pevnosti v tahu

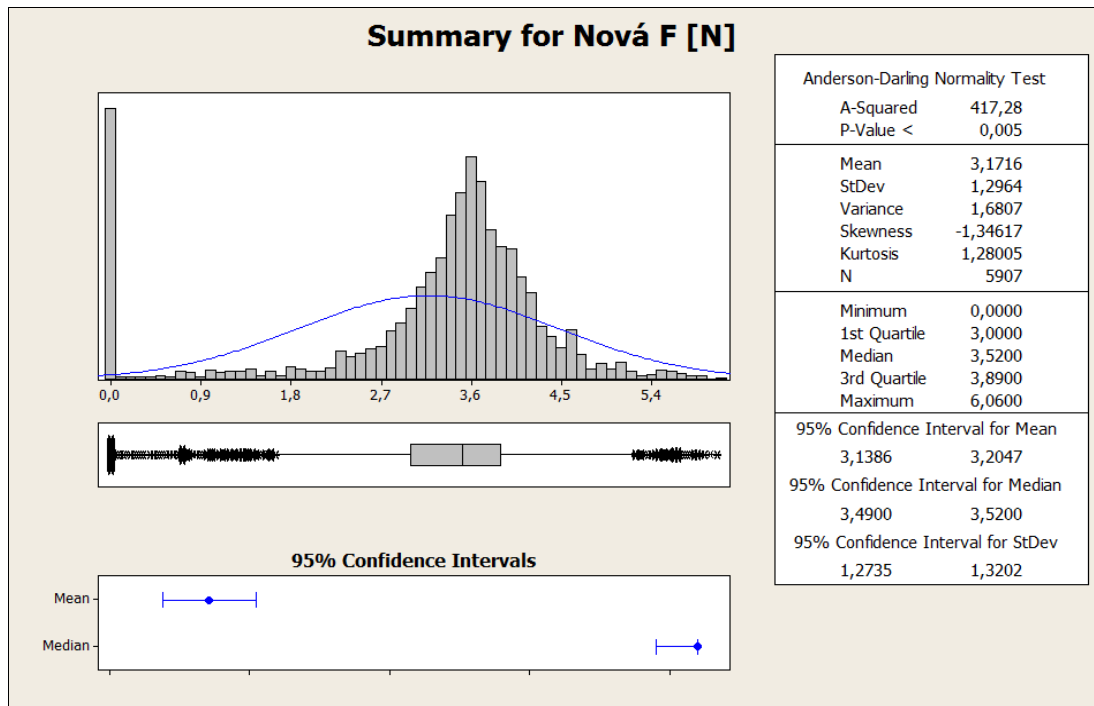


Obr. E-1 Solární článek před testováním pevnosti v tahu



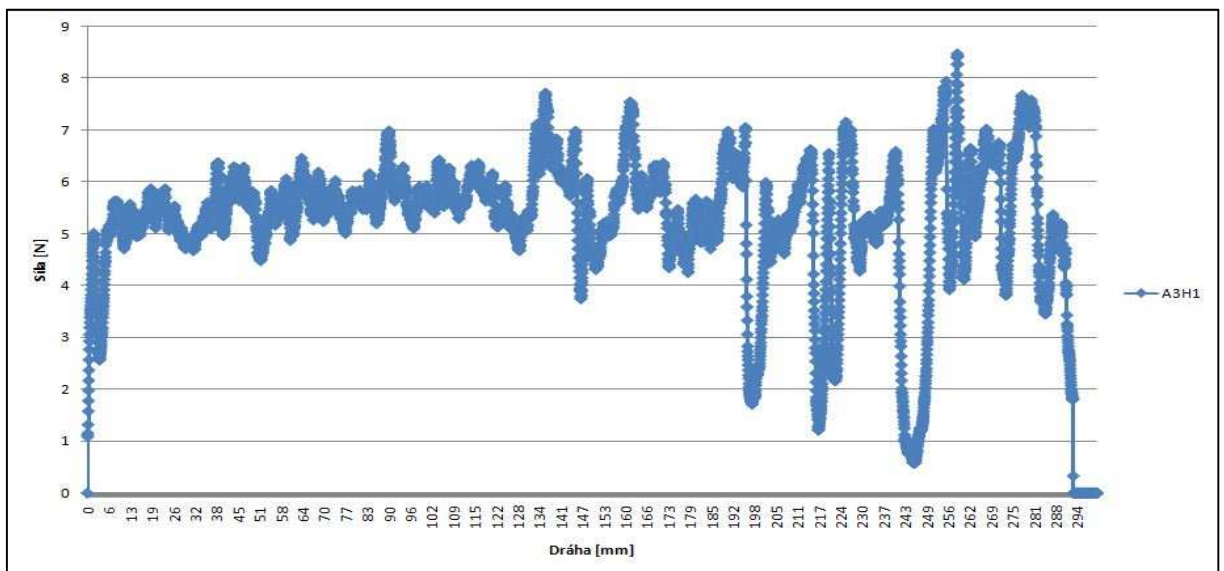
Obr. E-2 Solární článek po testování pevnosti v tahu

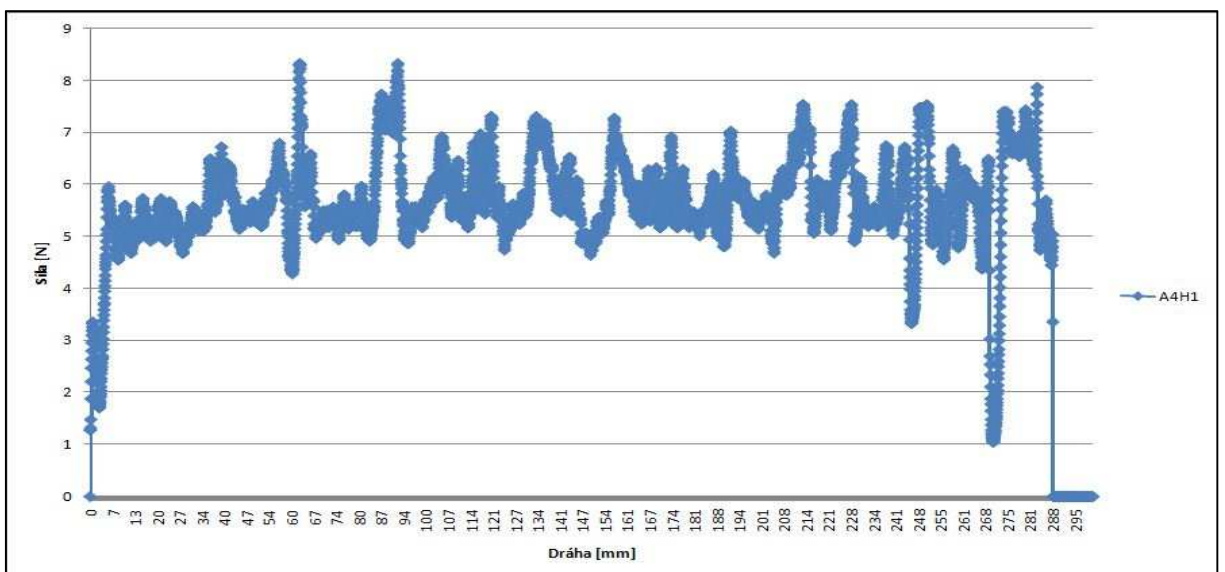
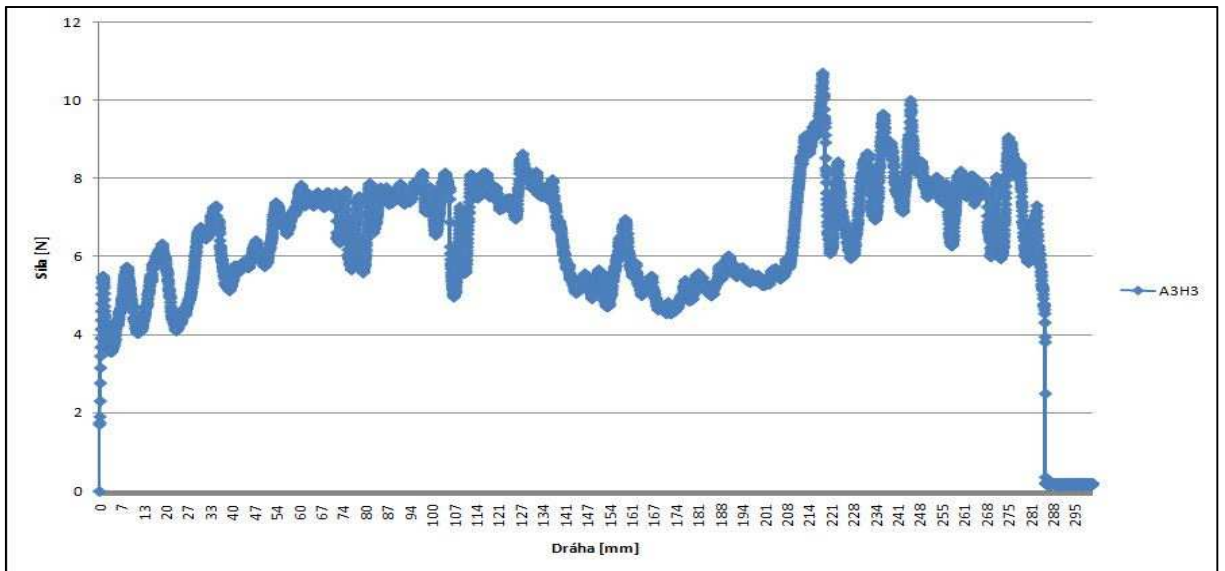
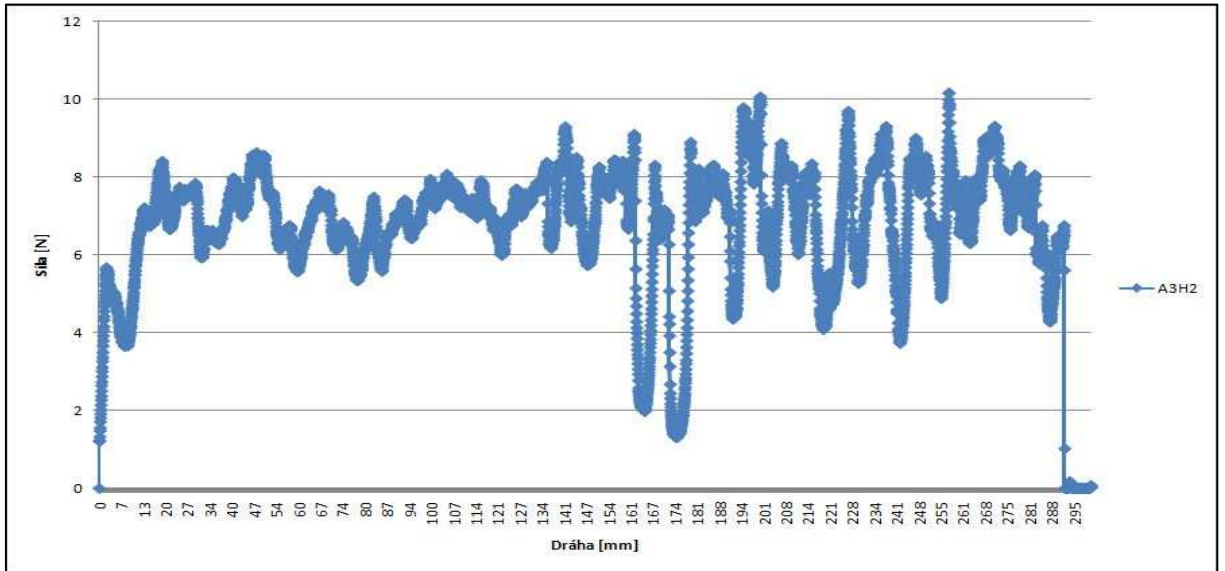
Příloha F Ukázka statistické analýzy v programu Minitab

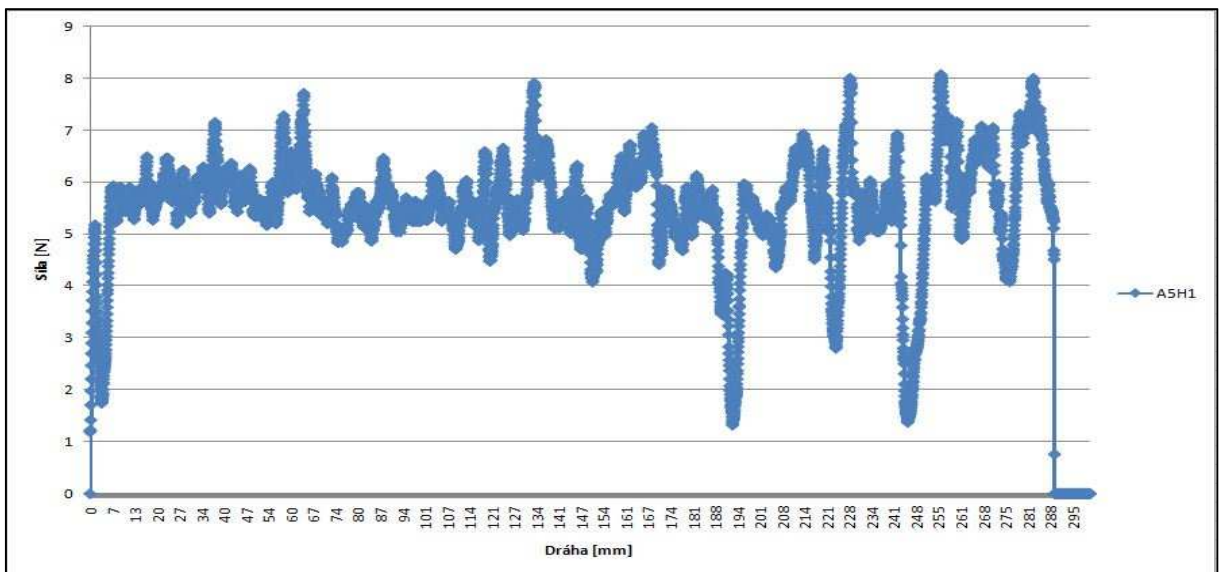
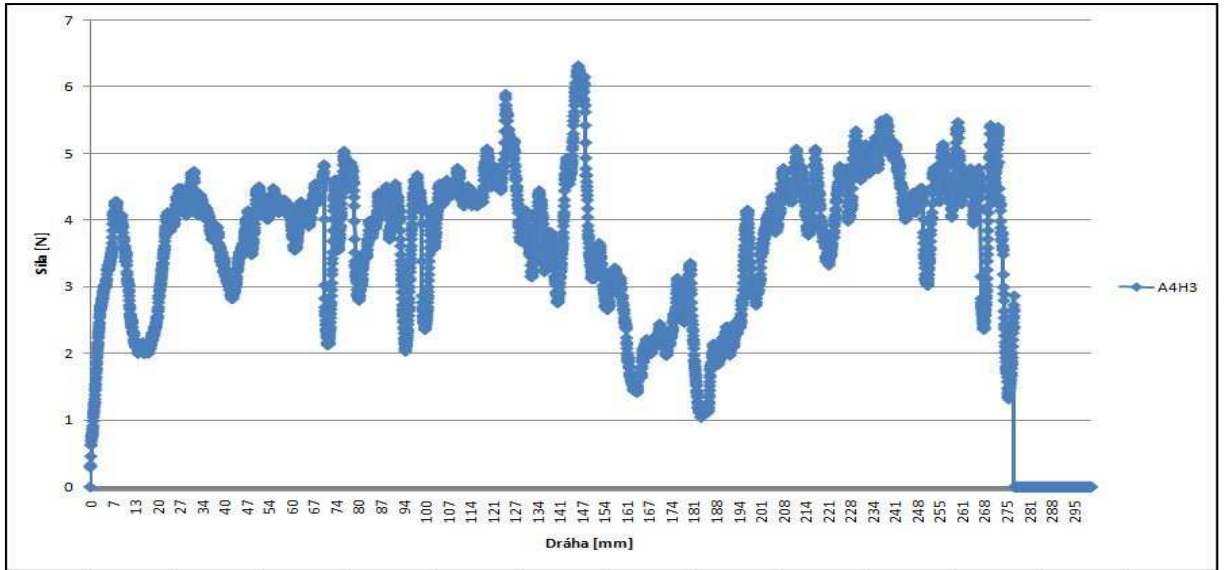
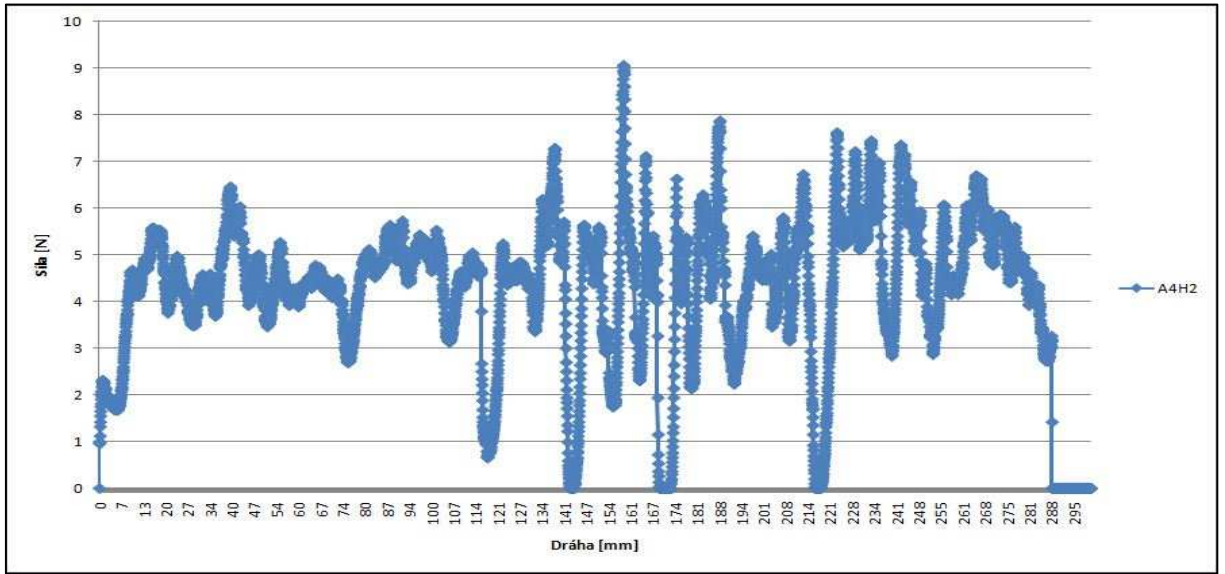


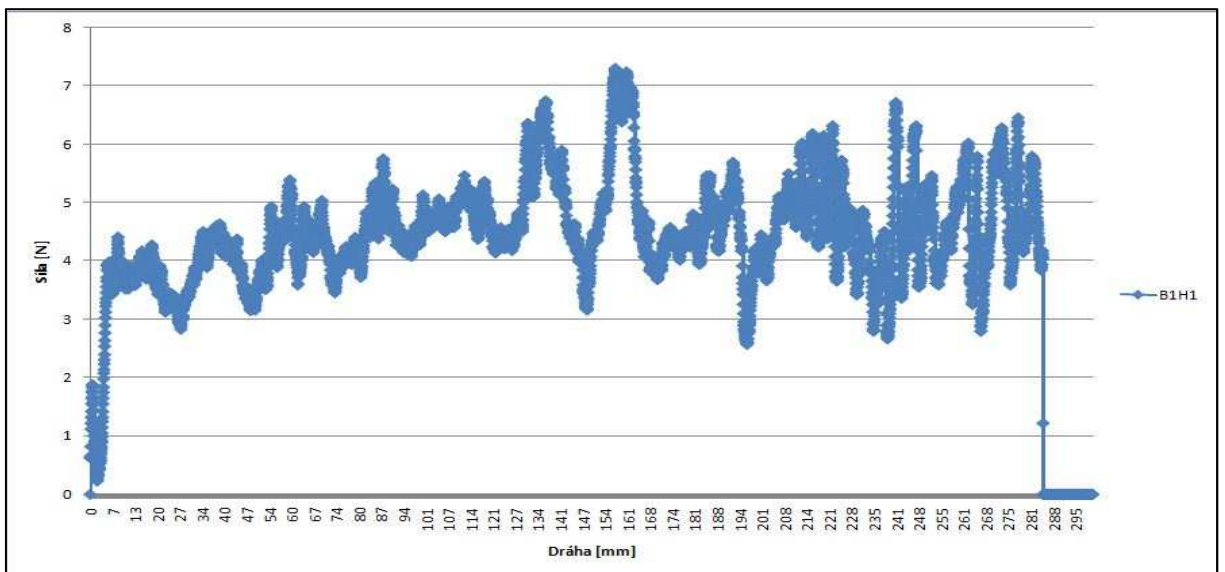
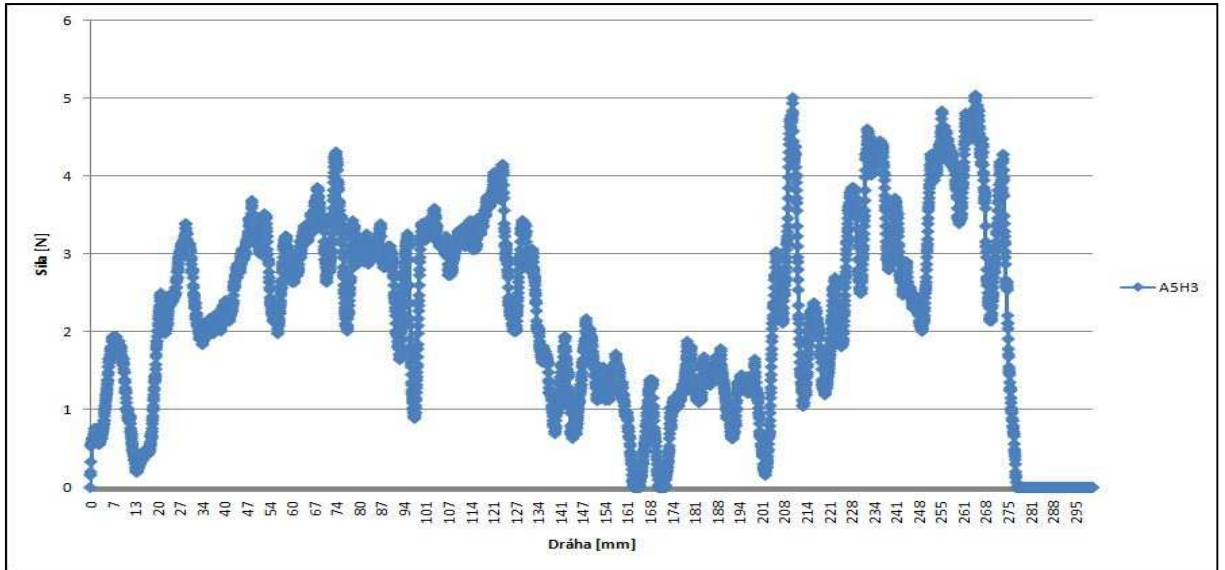
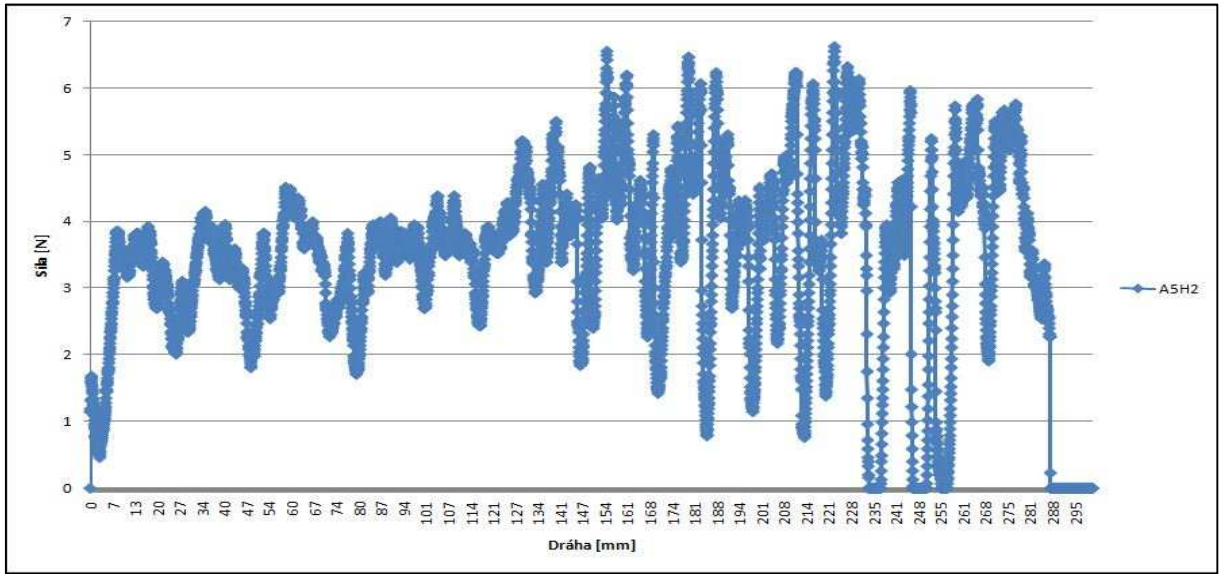
Obr. F Ukázka statistické analýzy v programu Minitab

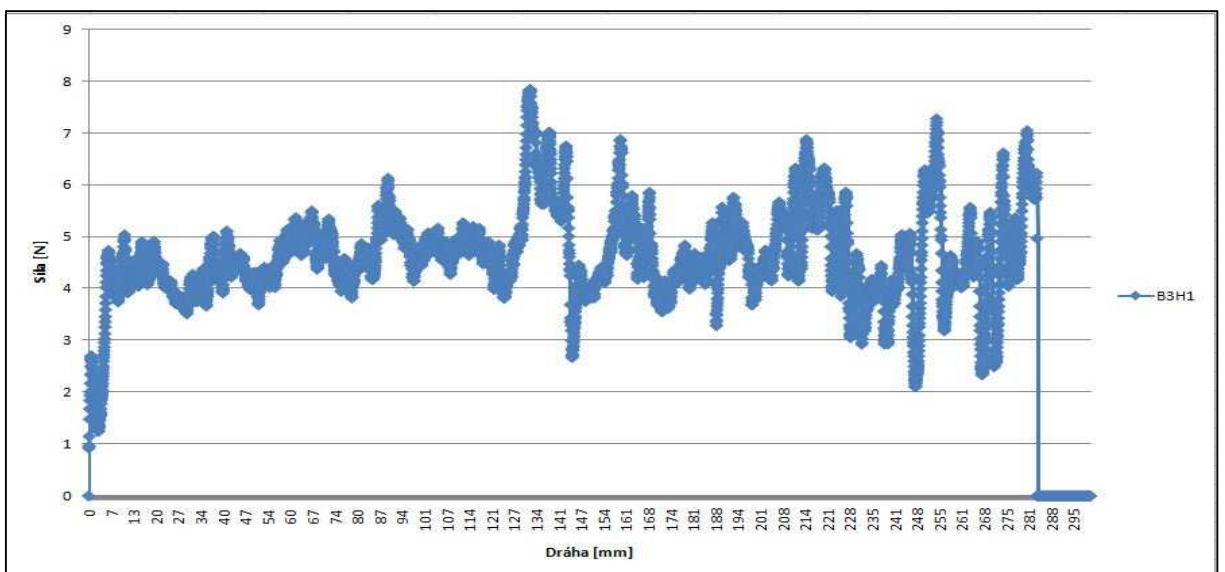
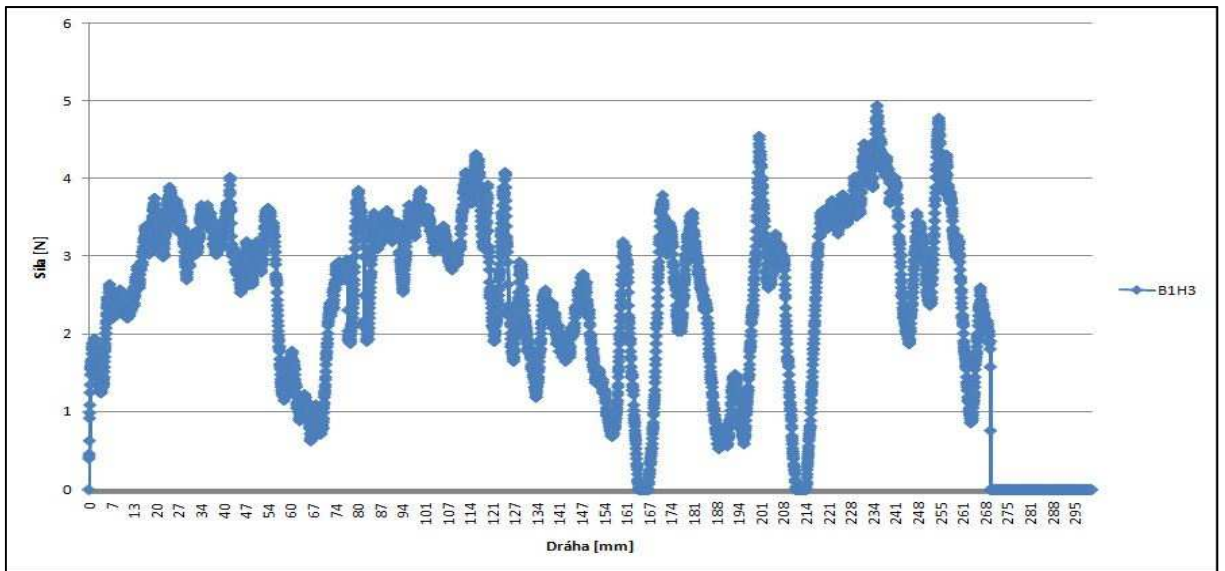
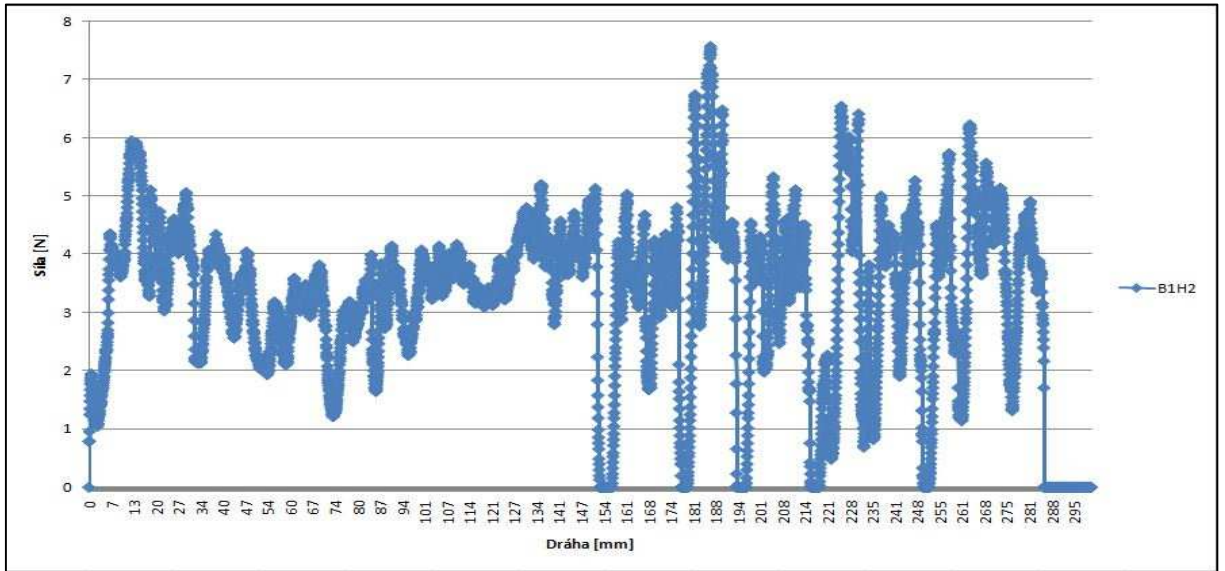
Příloha G Průběhy síly zaznamenané z první části měření

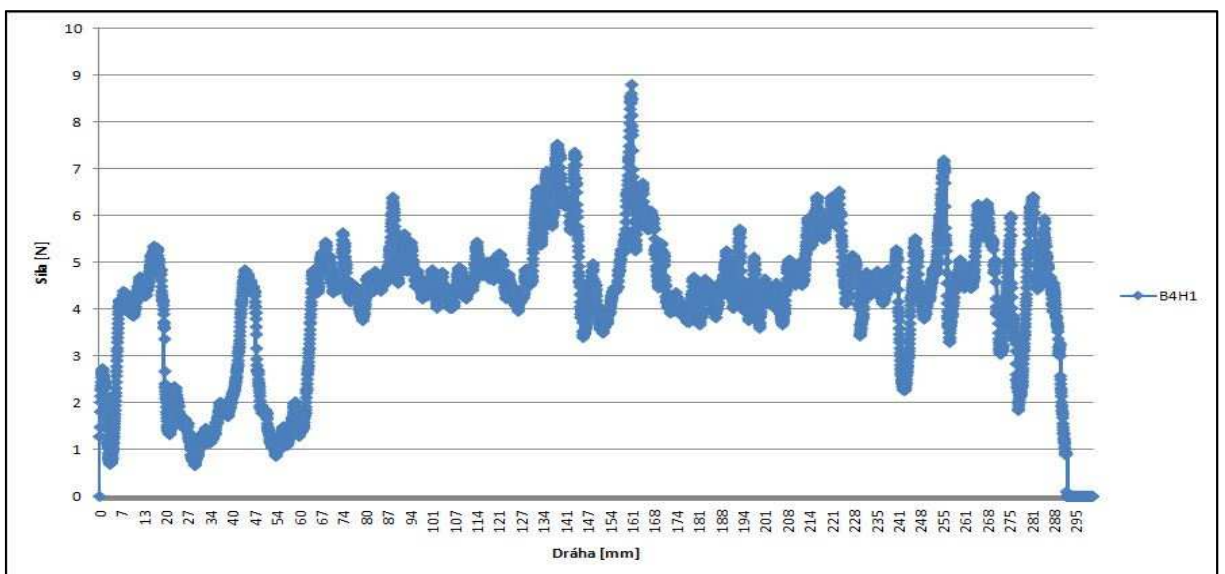
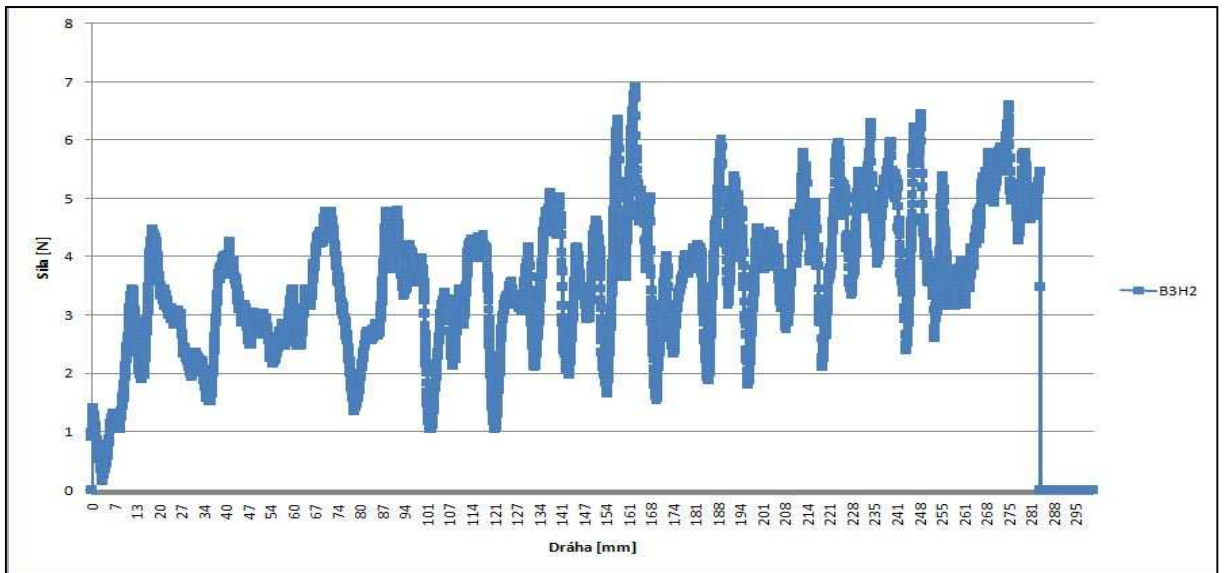
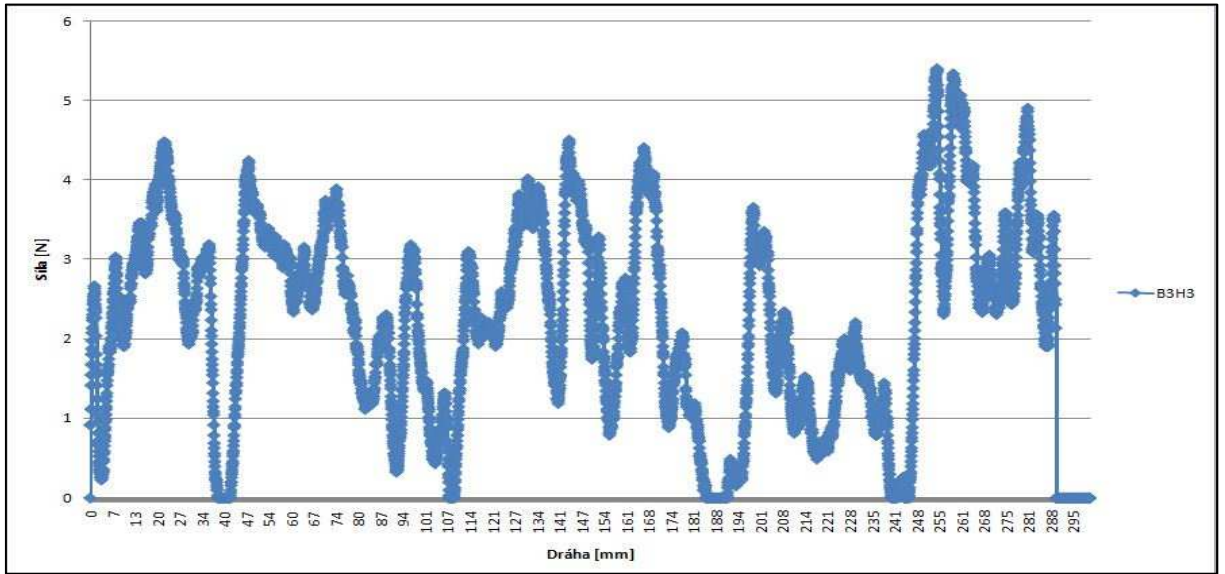


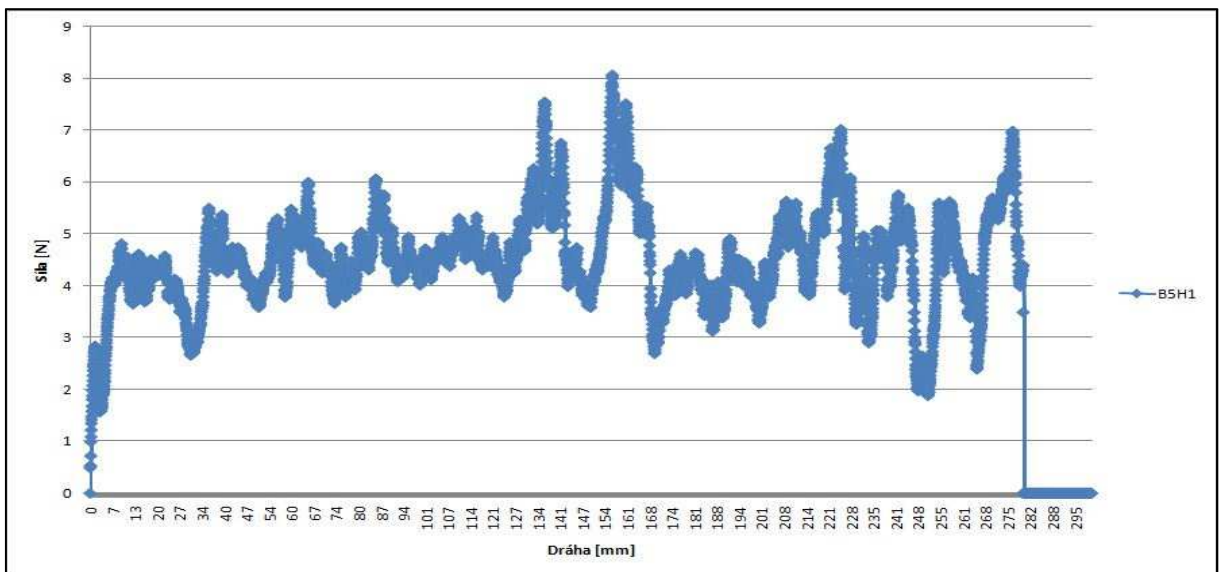
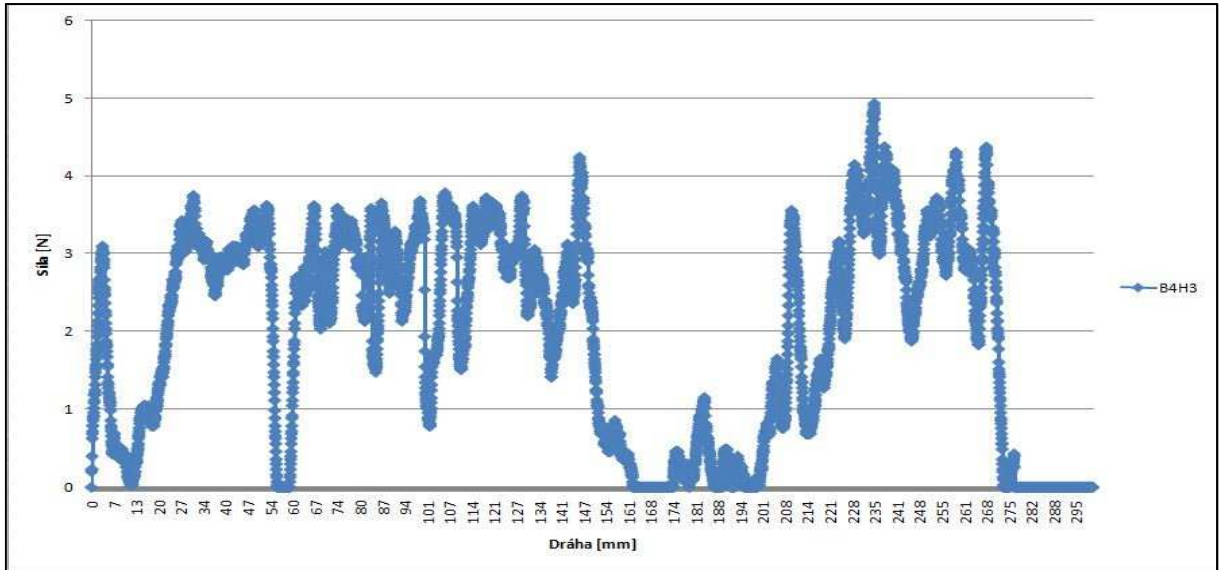
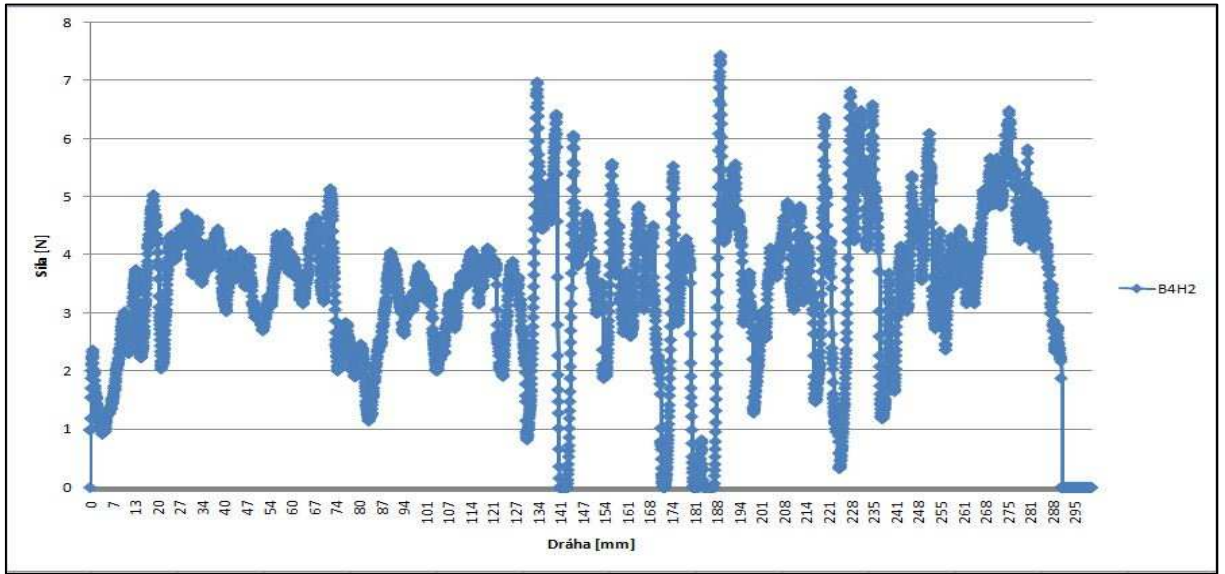


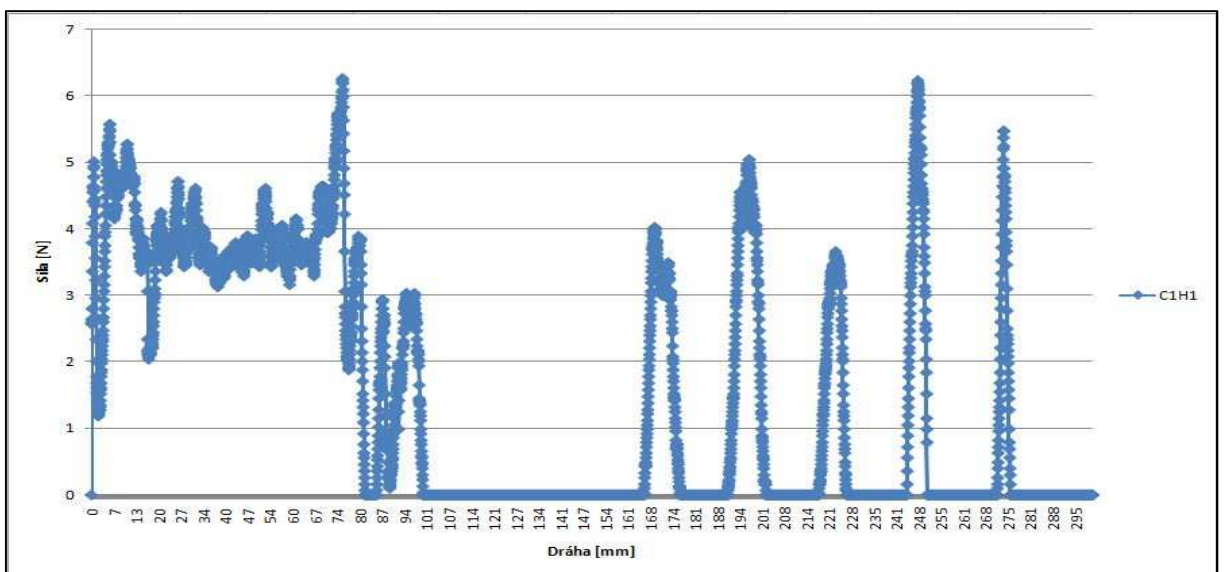
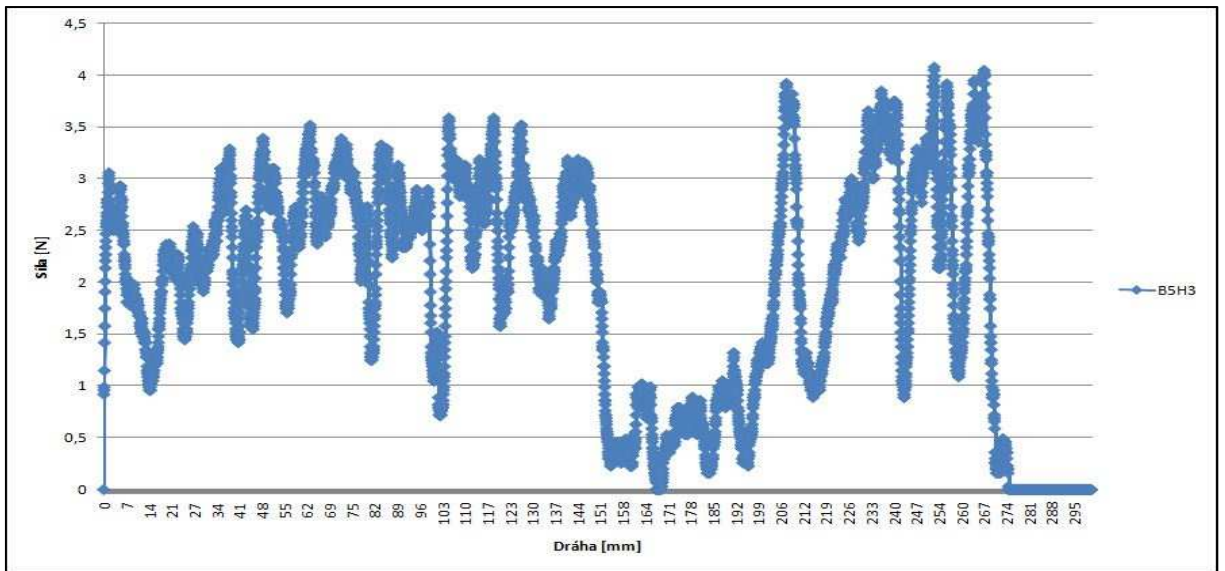
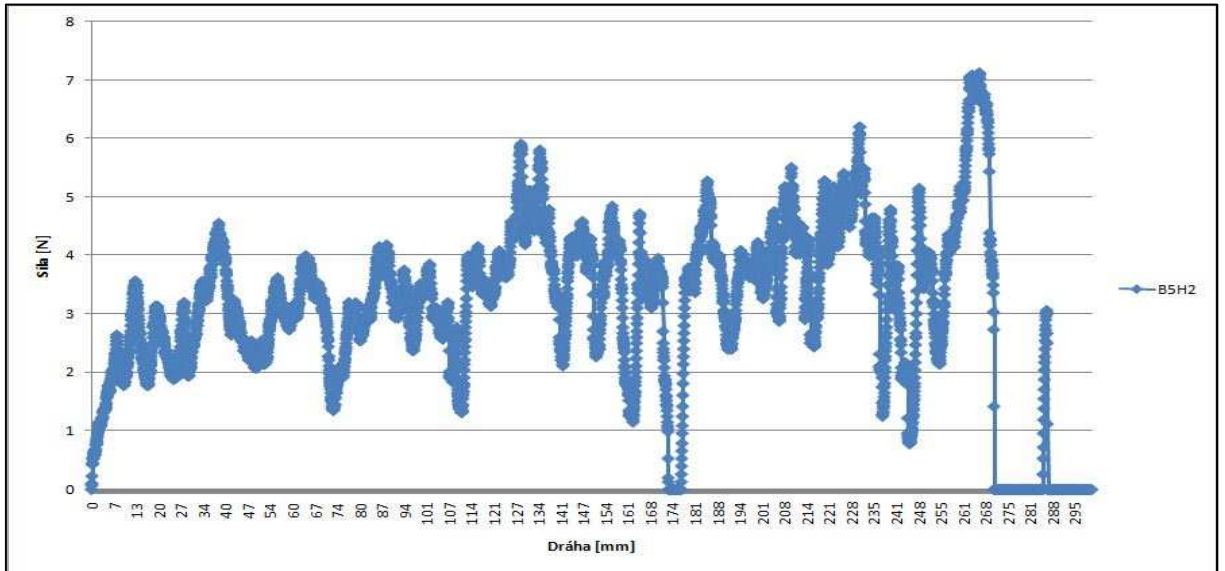


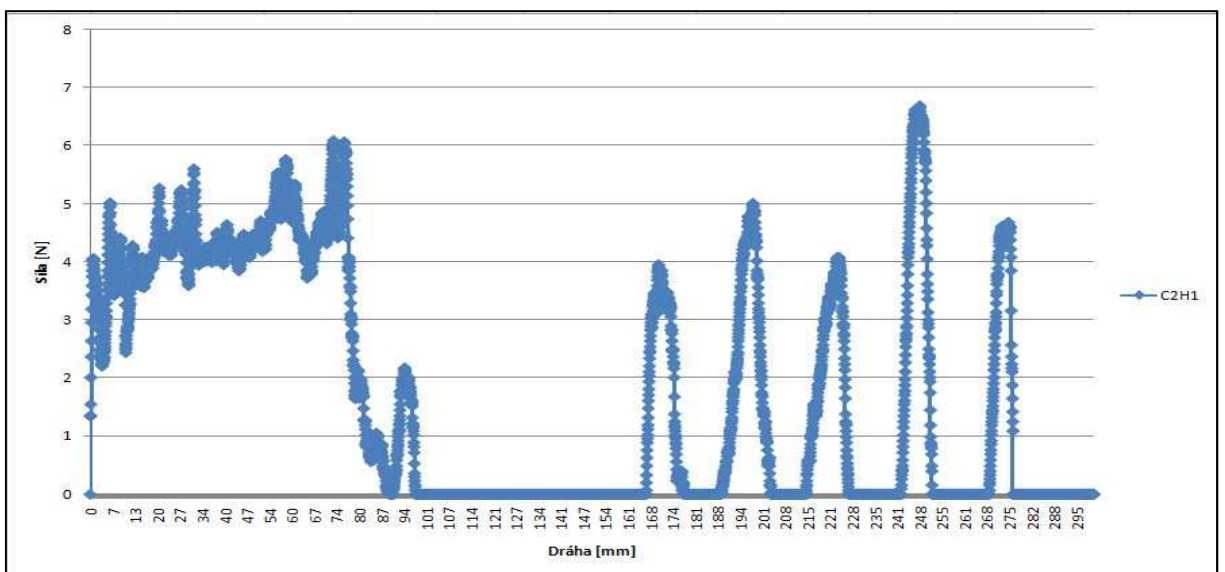
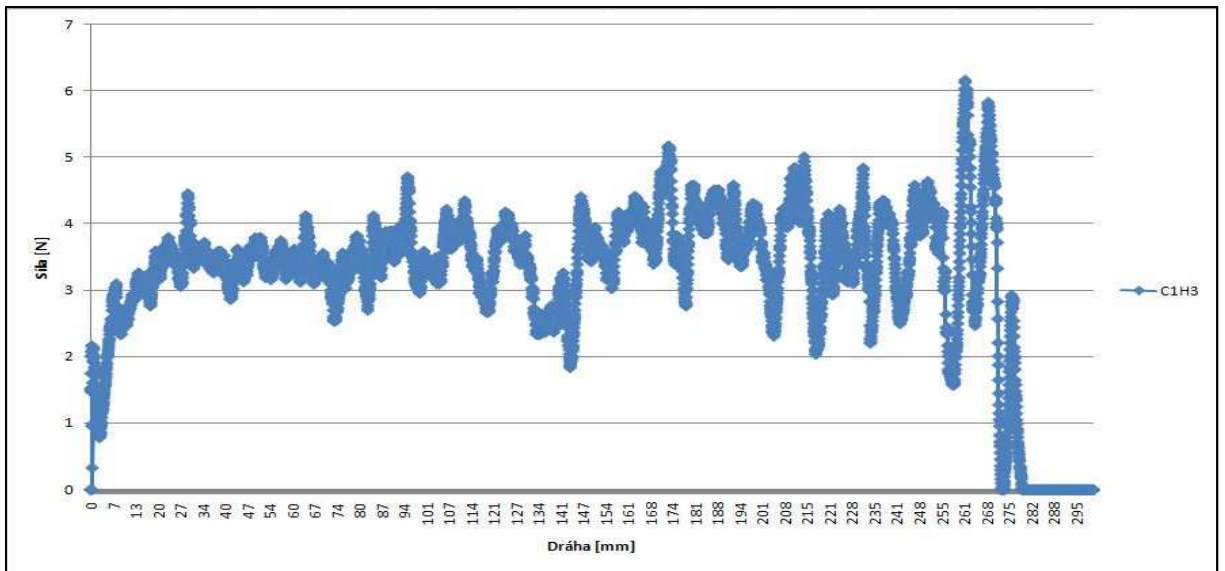
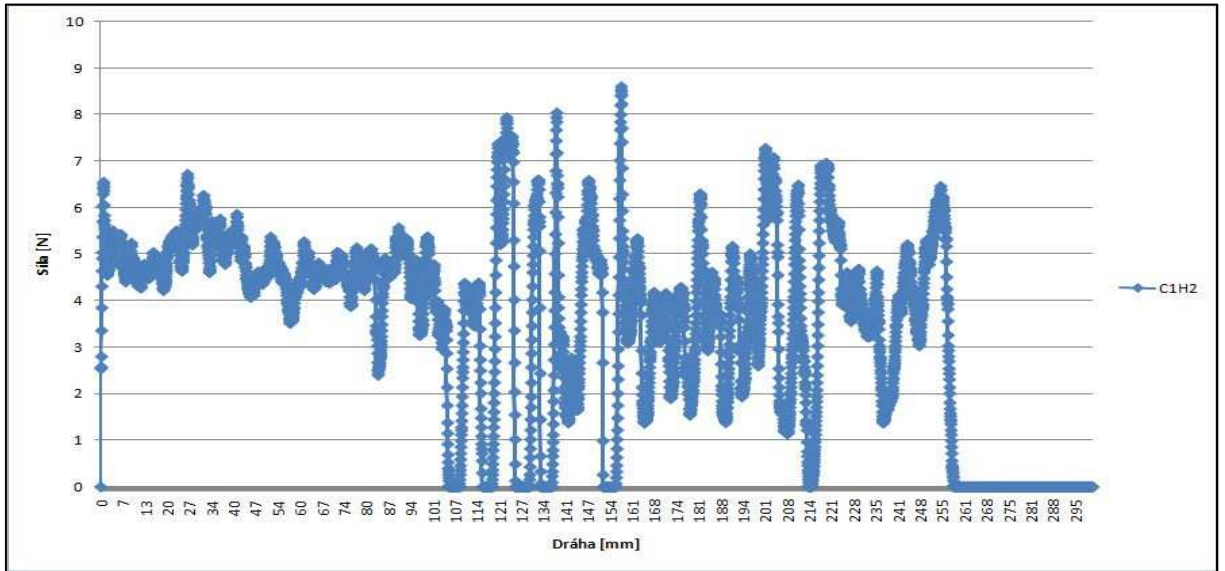


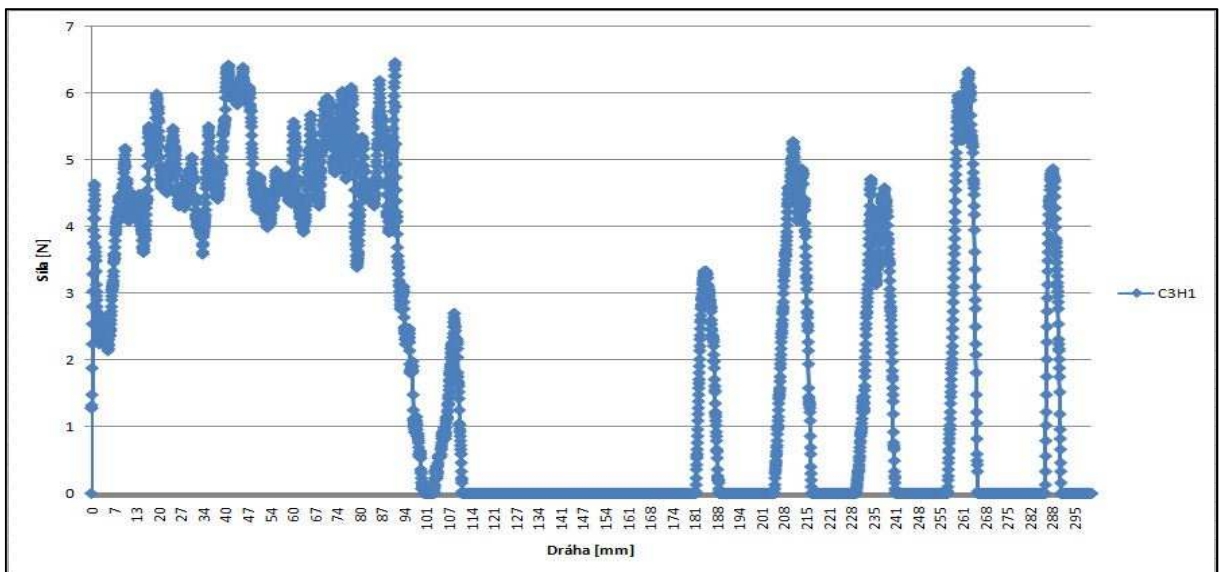
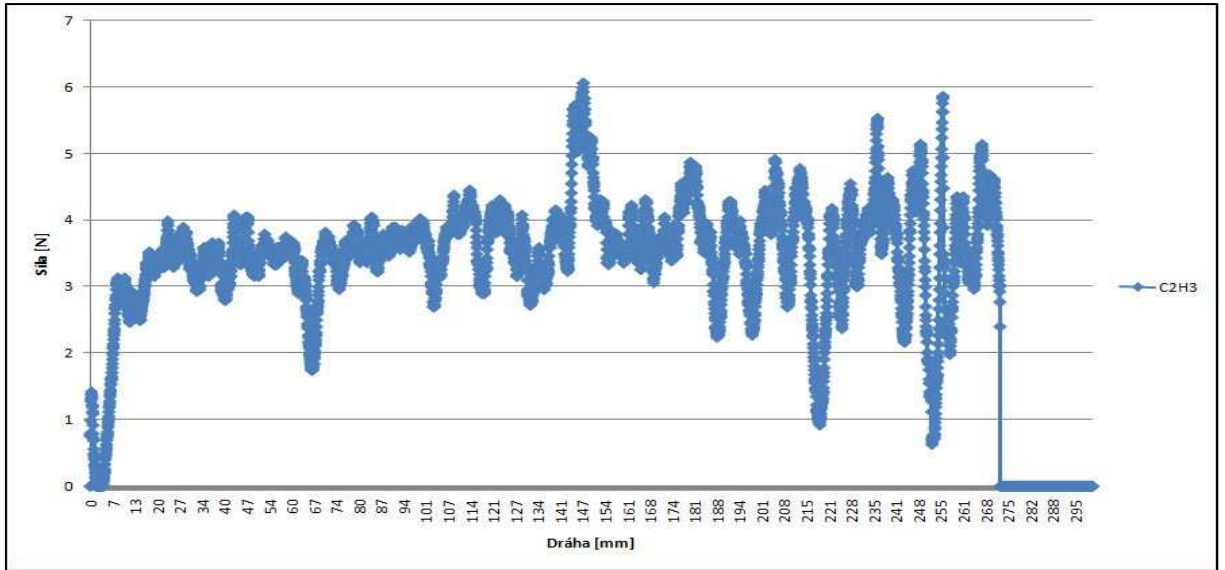
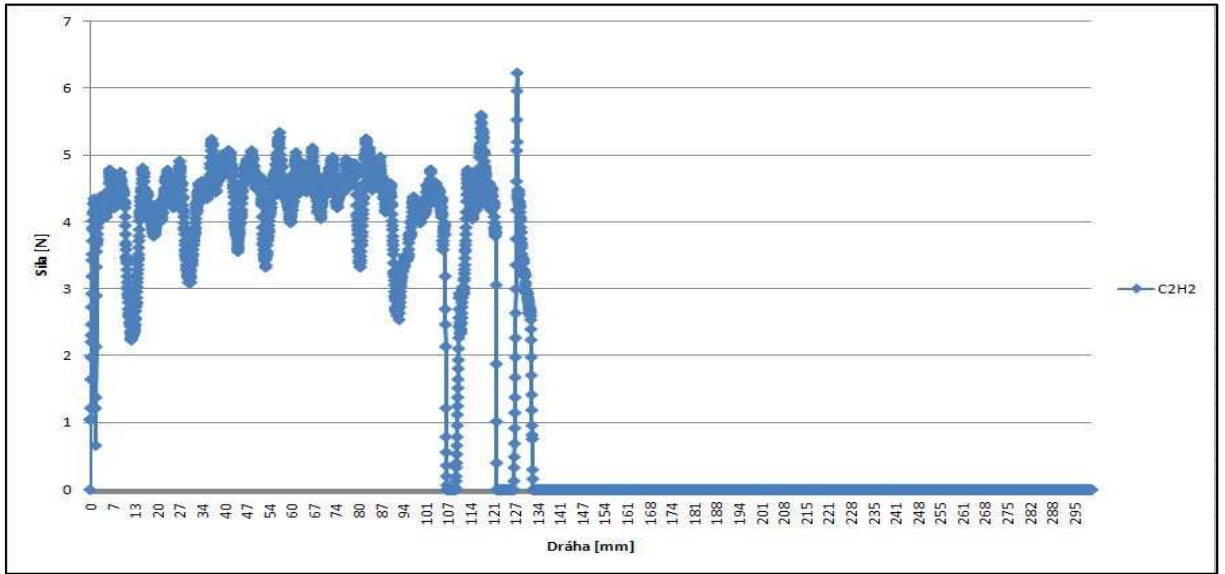


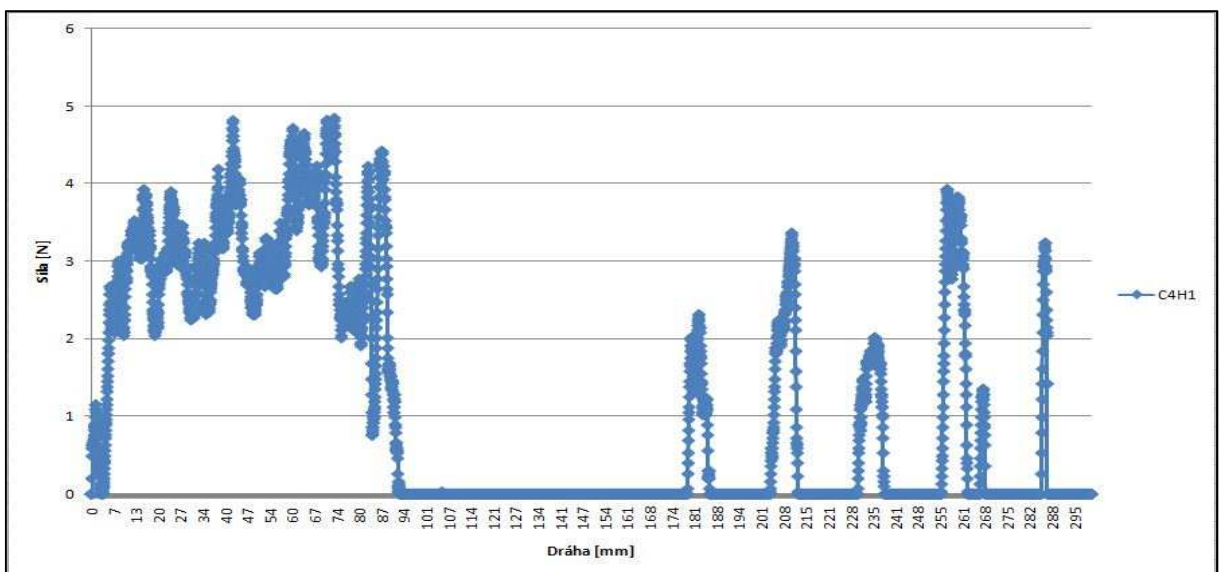
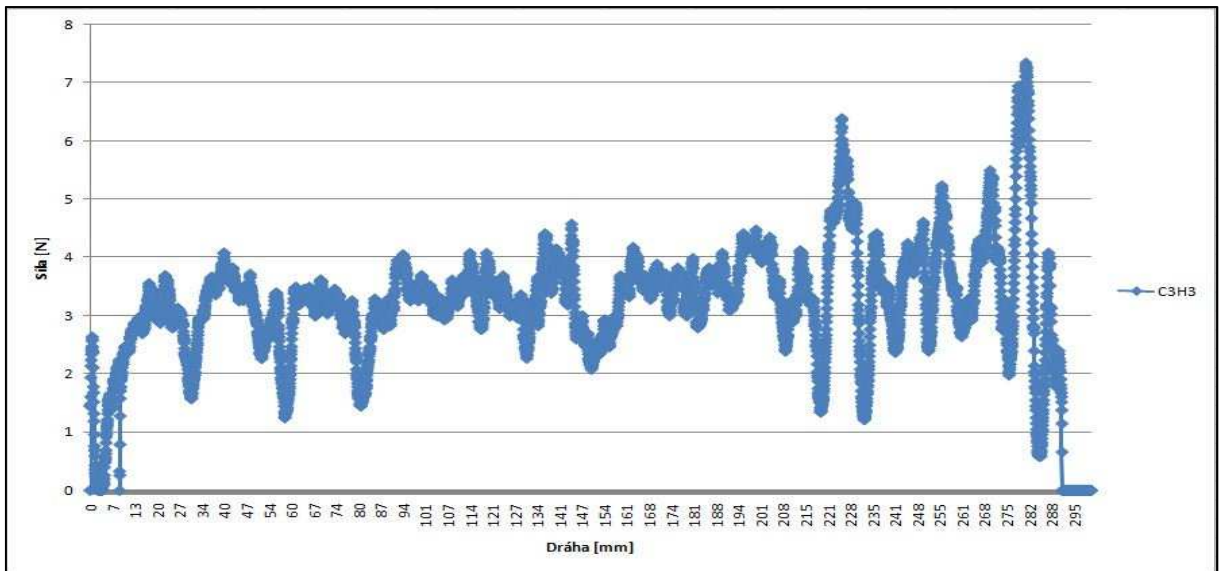
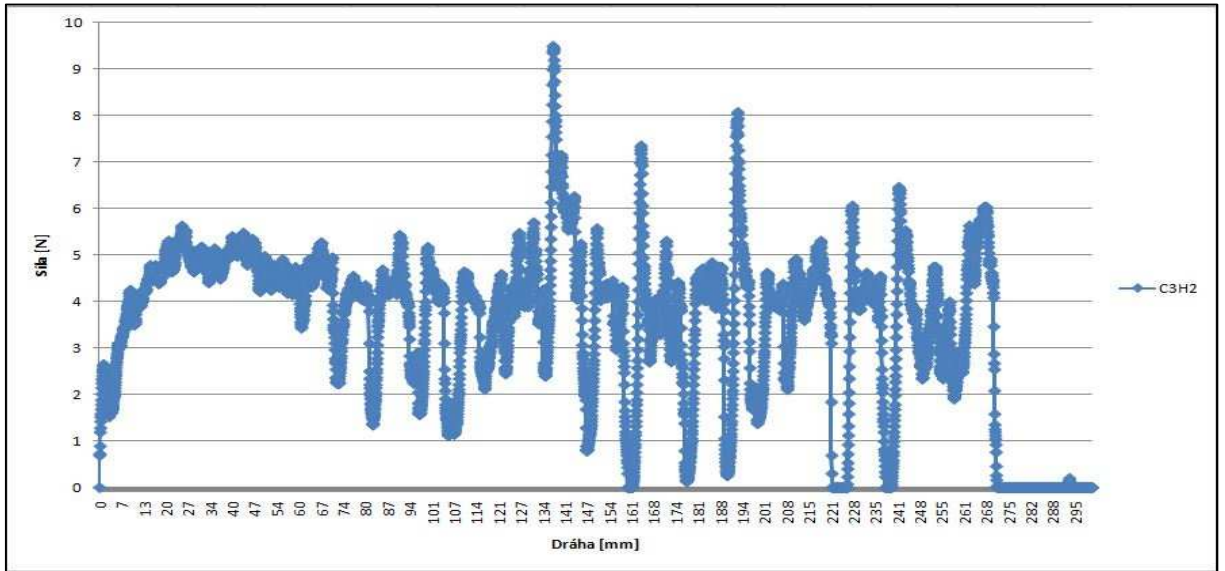


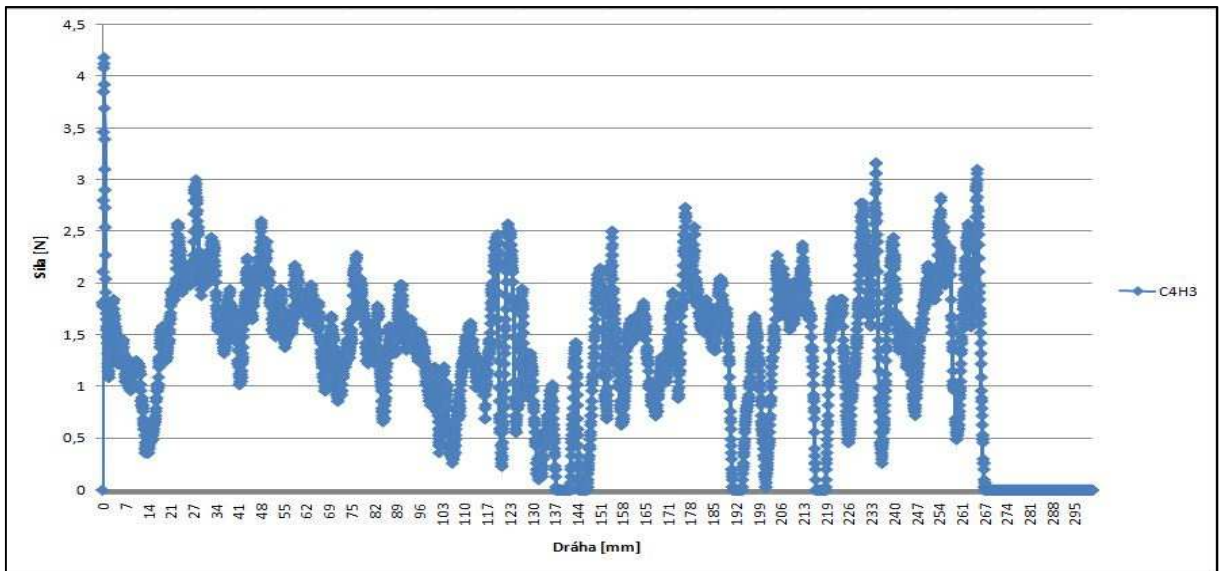
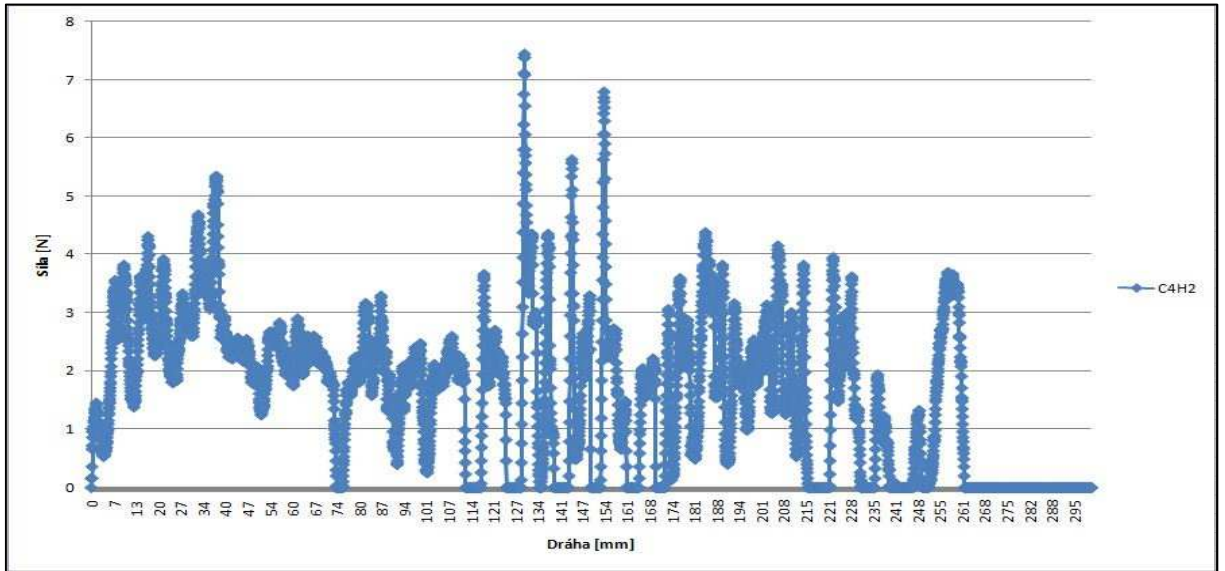












Příloha H Průběhy síly zaznamenané z druhé části měření

