

Univerzita Pardubice
Dopravní fakulta Jana Pernera

**Stanovení vlivu konstrukčního uspořádání na ocelové konzole na únavovou
životnost při cyklickém namáhání**

Václav Štech

Bakalářská práce

2019

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: Václav Štech
Osobní číslo: D15131
Studijní program: B3607 Stavební inženýrství
Studijní obor: Dopravní stavitelství
Název tématu: Stanovení vlivu konstrukčního uspořádání ocelové konzole na únavovou životnost při cyklickém namáhání
Zadávající katedra: Katedra dopravního stavitelství

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

- Teoretický rozbor únavové životnosti na základě hypotézy kumulace únavového poškození (Wöhlerovský přístup)
- Deník zkoušky
- Protokol o zkoušce
- Fotodokumentace

Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy:

Forma zpracování bakalářské práce: tištěná

Seznam odborné literatury:

- Manuál dynamického standu INOVA,
- Výkresová dokumentace INOVA,
- RŮŽIČKA, Milan, Milan ROST a Miroslav HANKE. Dynamická pevnost a životnost. 2. vyd., přeprac. Praha: České vysoké učení technické, 1992. ISBN 80-01-00886-X.
- CULEK, Bohumil: Kovové konstrukce, přednáška č.10, Pardubice 2017, dostupné ze systému STAG
- Vzorové protokoly ZL AL DFJP

Vedoucí bakalářské práce:

doc. Ing. Bohumil Culek, Ph.D.

Katedra dopravního stavitelství

Datum zadání bakalářské práce: 26. října 2018

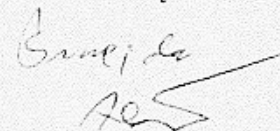
Termín odevzdání bakalářské práce: 21. května 2019



doc. Ing. Libor Švadlenka, Ph.D.
děkan

L.S.

Ing. Aleš Šmejda, Ph.D.
vedoucí katedry



V Pardubicích dne 29. října 2018

Prohlašuji:

Tuto práci jsem vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Beru na vědomí, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, a směrnicí Univerzity Pardubice č. 9/2012, bude práce zveřejněna v Univerzitní knihovně a prostřednictvím Digitální knihovny Univerzity Pardubice.

Tato bakalářská práce byla realizována s využitím technologií Výukového a výzkumného centra v dopravě (VVCD), Dopravní fakulta Jana Pernera, Univerzita Pardubice.

V Pardubicích dne 27. 5. 2019

Václav Štech

PODĚKOVÁNÍ

Zde bych chtěl poděkovat všem, kteří mi poskytli pomoc a podporu při vypracování této bakalářské práce. Mé velké díky patří především panu doc. Ing. Bohumilu Culkovi, Ph.D. za odborné vedení, cenné rady a poskytnutí studijních materiálů. Dále bych chtěl poděkovat mé rodině a přátelům za podporu při studiu.

ANOTACE

Tato bakalářská práce pojednává o únavové životnosti ocelových vzorků. V teoretické části je pojednáno o únavě materiálu, stádiích únavového procesu, únavových křivkách a jejich konstruování. Dále o podrobnostech navrhování zkušebních vzorků a jejich variantách, provádění výpočtů napětí ve vzorku s programem SCIA Engineer, složení zatěžovacího řetězce použitého při testech a o statické a dynamické zkoušce. V experimentální části jsou ověřovány únavové životnosti ocelových vzorků, stanoveny únavové křivky a jsou porovnány dosažené výsledky jednotlivých typů vzorků.

KLÍČOVÁ SLOVA

Únavová životnost, únavová křivka, cyklické namáhání

TITLE

Determination of the influence of the structural design of the steel console on fatigue life under cyclic stress

ANNOTATION

This bachelor thesis deals with fatigue life of steel samples. The theoretical part deals with material fatigue, fatigue process stages, fatigue curves and their design. Furthermore about details of designing test samples and their variants, calculating stress in the sample with SCIA Engineer, the composition of the load chain used in tests and about static and dynamic tests. In the experimental part is verified fatigue life of steel samples, are determined fatigue curves and the results of individual types of samples are compared.

KEYWORDS

Fatigue life, fatigue curve, cyclic stress

OBSAH

| | |
|---|----|
| SEZNAM OBRÁZKŮ | 8 |
| SEZNAM TABULEK A GRAFŮ..... | 10 |
| SEZNAM ZKRATEK A OZNAČENÍ | 11 |
| SEZNAM PŘÍLOH..... | 12 |
| ÚVOD..... | 13 |
| 1 Únavová životnost..... | 14 |
| 1.1 Únava materiálu..... | 14 |
| 1.2 Wöhlerova křivka | 14 |
| 1.3 Stádia únavového procesu | 18 |
| 2 Únavové křivky | 19 |
| 2.1 Únavové křivky a jejich parametry..... | 19 |
| 2.2 Konstruování únavových křivek | 19 |
| 2.3 Stanovení únavové křivky při nižším počtu zkušebních vzorků | 21 |
| 3 Cíle zkoušky | 21 |
| 4 Návrh zkušebních vzorků | 22 |
| 4.1 První varianta vzorků..... | 22 |
| 4.1.1 Stanovení kritických napětí | 23 |
| 4.2 Vliv hustoty sítě na výsledky napětí | 26 |
| 4.3 Druhá varianta vzorků | 28 |
| 5 Experimentální testy | 32 |
| 5.1 Zatěžovací sestava..... | 33 |
| 5.2 Statická zkouška | 36 |
| 5.3 Dynamická zkouška | 37 |
| 5.4 Průběh experimentálních testů..... | 37 |
| 6 Vyhodnocení | 40 |
| 6.1 Definování únavové křivky pro vzorky se zaoblením | 44 |
| 6.2 Definování únavové křivky pro vzorky s náběhem | 45 |
| 6.3 Definování únavové křivky pro kolmé vzorky | 47 |
| 6.4 Porovnání únavových křivek pro různé konstrukční uspořádání | 48 |
| ZÁVĚR..... | 54 |
| POUŽITÁ LITERATURA | 56 |
| PŘÍLOHY..... | 57 |

SEZNAM OBRÁZKŮ

| | |
|---|----|
| Obrázek 1: Členění oblasti únavy Wöhlerovy křivky [1] | 15 |
| Obrázek 2: Tvary wöhlerových křivek [1] | 16 |
| Obrázek 3: Volba báze počtu kmitů na mezi únavy pro oceli [1] | 16 |
| Obrázek 4: Závislost exponentu w na poměru meze kluzu k mezi únavy [1] | 17 |
| Obrázek 5: Křivky únavového poškození [1] | 18 |
| Obrázek 6: Způsob aproximace mediánové únavové křivky napětí [1] | 20 |
| Obrázek 7: Křivky únavové pevnosti pro rozkmity normálových napětí [6] | 21 |
| Obrázek 8: Vzorek kolmý | 22 |
| Obrázek 9: Vzorek s náběhem | 23 |
| Obrázek 10: Vzorek se zaoblením | 23 |
| Obrázek 11: Poloha upevnění a působící síly na vzorku při výpočtu (prostředí SCIA Engineer) | 24 |
| Obrázek 12: Napětí σ_E v kolmém vzorku při síle 12,76 kN (max. 877,3 MPa) | 25 |
| Obrázek 13: Napětí σ_E ve vzorku s náběhem při síle 12,76 kN (max. 587,0 MPa) | 25 |
| Obrázek 14: Napětí σ_E ve vzorku se zaoblením při síle 12,76 kN (max. 231,5 MPa) | 26 |
| Obrázek 15: Příklad zasítování vzorku s průměrnou velikostí plošného prvku 0,001 m | 27 |
| Obrázek 16: Příklad zasítování vzorku s průměrnou velikostí plošného prvku 0,1 m | 27 |
| Obrázek 17: Zasítování s průměrnou velikostí plošného prvku 0,0005 m se zahuštěním na 0,0001 m | 28 |
| Obrázek 18: Vzorek kolmý | 29 |
| Obrázek 19: Vzorek s náběhem | 29 |
| Obrázek 20: Vzorek se zaoblením | 30 |
| Obrázek 21: Napětí σ_E v kolmém vzorku při síle 12,76 kN | 31 |
| Obrázek 22: Napětí σ_E ve vzorku s náběhem při síle 12,76 kN | 31 |
| Obrázek 23: Napětí σ_E ve vzorku se zaoblením při síle 12,76 kN | 32 |
| Obrázek 24: Dynamický zkušební stav VVCD | 32 |
| Obrázek 25: Zatěžovací stav INOVA | 33 |
| Obrázek 26: Řez hydromotorem AH [7] | 34 |
| Obrázek 27: Schéma zatěžovací sestavy | 34 |
| Obrázek 28: Vizualizace upevnění vzorku s náběhem při testu | 35 |
| Obrázek 29: Část zatěžovací sestavy s upevněním vzorku | 35 |
| Obrázek 30: Průběh začátku statické zkoušky (fialová čára zobrazuje sílu, modrá polohu a červená odpovídá servoventilu) | 36 |
| Obrázek 31: Průběh konce statické zkoušky (fialová čára zobrazuje sílu, modrá polohu a červená odpovídá servoventilu) | 36 |
| Obrázek 32: Náběh dynamické zkoušky (fialová čára zobrazuje sílu, modrá polohu a červená odpovídá servoventilu) | 37 |

| | |
|--|----|
| Obrázek 33: Průběh dynamické zkoušky vzorku č. 10 (fialová čára zobrazuje sílu, modrá polohu a červená odpovídá servoventilu)..... | 38 |
| Obrázek 34: Průběh dynamické zkoušky vzorku č. 15 (fialová čára zobrazuje sílu, modrá polohu a červená odpovídá servoventilu)..... | 38 |
| Obrázek 35: Záznam v deníku zkoušky | 39 |
| Obrázek 36: Fotografie vzorků podrobených dynamickým zkouškám | 40 |
| Obrázek 37: Průběh dynamické zkoušky s vyznačeným místem vzniku trhliny..... | 42 |
| Obrázek 38: Detail průběhu dynamické zkoušky s vyznačeným místem vzniku trhliny..... | 43 |

SEZNAM TABULEK A GRAFŮ

| | |
|---|----|
| Tabulka 1: Tabulka s hodnotami napětí pro jednotlivé typy vzorků při různé síle | 24 |
| Tabulka 2: Tabulka s napětím ve vzorku při různé hustotě sítě..... | 28 |
| Tabulka 3: Tabulka s hodnotami napětí pro jednotlivé typy vzorků při různé síle | 30 |
| Tabulka 4: Tabulka s výsledky zkoušek | 41 |
| Tabulka 5: Tabulka s výslednými konstantami pro únavové křivky | 49 |
| Tabulka 6: Procentuální rozdíly konstant jednotlivých křivek | 51 |
| Tabulka 7: Procentuální rozdíly konstant jednotlivých křivek | 52 |
| Tabulka 8: Procentuální porovnání teoretických hodnot počtu cyklů na daných rozkmitech zatížení . | 52 |
| Tabulka 9: Procentuální porovnání teoretických hodnot počtu cyklů na daných rozkmitech zatížení . | 53 |
| | |
| Graf 1: Závislost výsledného napětí na hustotě sítě | 27 |
| Graf 2: Únavová křivka vzorků se zaoblením bez vzorku č. 10 | 44 |
| Graf 3: Únavová křivka vzorků se zaoblením včetně vzorku č. 10 | 45 |
| Graf 4: Únavová křivka vzorků s náběhem bez vzorku č. 6..... | 46 |
| Graf 5: Únavová křivka vzorků s náběhem včetně vzorku č. 6..... | 46 |
| Graf 6: Únavová křivka kolmých vzorků bez vzorku č. 21 | 47 |
| Graf 7: Únavová křivka kolmých vzorků včetně vzorku č. 21..... | 48 |
| Graf 8: Únavové křivky bez vzorků, u kterých nedošlo k porušení | 49 |
| Graf 9: Únavové křivky bez vzorků, u kterých nedošlo k porušení | 50 |
| Graf 10: Únavové křivky včetně vzorků, u kterých nedošlo k porušení | 50 |
| Graf 11: Únavové křivky včetně vzorků, u kterých nedošlo k porušení | 51 |

SEZNAM ZKRATEK A OZNAČENÍ

| | |
|-------------|--|
| VVCD | Výukové a výzkumné centrum v dopravě |
| INOVA | INOVA Praha s.r.o. |
| V01k | označení zkušební vzorku č. 01, kolmý s hranou |
| AH 20 – 400 | zatěžovací válec INOVA 20 kN, 400 mm |
| PID | Proporcionální, integrační a derivační konstanta nastavení hydromotoru |

| | |
|-----------------|---|
| N | je počet kmitů |
| σ_a | je amplituda nominálního napětí |
| σ_c | je mez únavy |
| σ_m | je střední napětí kmitu |
| σ_A | je mezní výkmit |
| σ_H | je časovaná mez únavy |
| N_c | je báze kmitů napětí |
| $\log N$ | je počet kmitů vyjádřený v logaritmickém tvaru |
| w | je exponent |
| $\log \sigma_a$ | je amplituda nominálního napětí vyjádřená v logaritmickém tvaru |
| σ_a^w | je amplituda nominálního napětí umocněná exponentem w |
| C | je konstanta |
| R_e | je mez kluzu |
| σ_z | je napětí na bodu zlomu |
| N_z | je počet kmitů na bodu zlomu |
| A | je konstanta |
| B | je konstanta |
| a | je konstanta |
| σ_o | je prahové napětí |
| ϵ_m | je střední poměrná deformace kmitu |
| ϵ_a | je amplituda deformace kmitu |
| i | je pořadové číslo |
| n | je počet vzorků |
| P_i | je pořadová pravděpodobnost |
| $\log C$ | je konstanta únavové křivky platná v určité oblasti N |
| m | je konstanta sklonu únavové křivky |
| σ_R | je rozkmit napětí |
| σ_E | je ekvivalentní napětí |

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha A – Deník Zkoušky

Příloha B – Protokol o zkoušce

Příloha C – Fotodokumentace

ÚVOD

Únava materiálu je ve stavebnictví i strojírenství jedna z neopomenutelných příčin poruch. Přestože je únava materiálu zkoumána již řadu let, tak kvůli složitosti tohoto jevu není do dnes zcela prozkoumána. Odhadnout přesný okamžik, kdy dojde k poruše, je velmi obtížné, hlavně kvůli velkému množství vlivů, které tento proces ovlivňují. Únava materiálu je pomalý proces, kdy se v určitém místě součásti koncentruje napětí a dochází k poškozování materiálu. V místě koncentrace napětí (na hrotu trhliny) dochází také k plastickým deformacím. K takovému poškozování dochází vlivem opakujícího se dynamického namáhání.

Únavová životnost ocelových součástí strojů nebo konstrukcí namáhaných proměnným zatížením je jedním z ukazatelů spolehlivosti těchto konstrukcí. Ačkoliv je snaha vytvářet co možná nejspolehlivější konstrukce, tak při jejich navrhování hraje podstatnou část množství použitého materiálu a cena (daná i způsobem výroby). Optimální konstrukce by tedy měla odolat navrhovanému zatížení při zachování provozuschopnosti s co možná největší pravděpodobností a měla by být ekonomická s nízkou hmotností, jednoduchá na výrobu a s malými pořizovacími náklady. Aby mohla být zaručena spolehlivost konstrukce, je potřeba znát dopady jednotlivých zatížení na životnost konstrukce. Z toho důvodu dochází ke zkoumání únavové životnosti. Jelikož je únavová životnost tak složitým dějem, nejlepší výsledky získáme experimentálním zkoušením. Nevýhodou experimentálního zkoušení je vysoká časová náročnost a vysoké náklady spojené s energetickými nároky a pořizovací cenou zařízení, na kterém je únavová životnost testována.

Cílem této práce je ověření životnosti ocelových vzorků (konzol) při dynamickém namáhání. Bude stanoven vliv konstrukčního uspořádání ocelových vzorků na únavovou životnost. Z dosažených výsledků budou stanoveny únavové křivky s následným porovnáním.

1 Únavová životnost

1.1 Únava materiálu

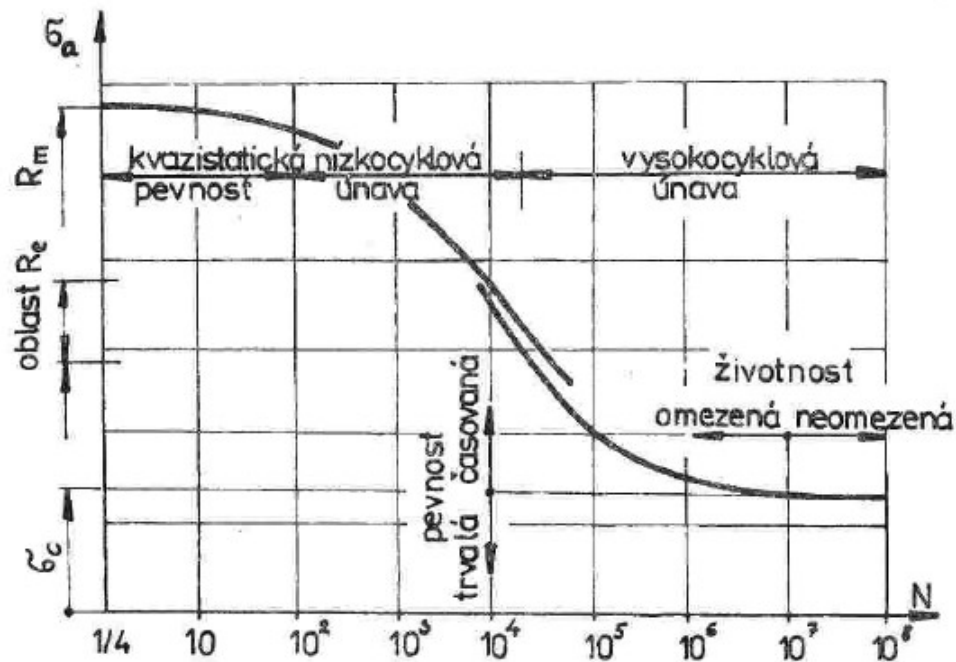
Mezním stavem únavy rozumíme stav, kdy se daná konstrukce nebo určitá část poruší vlivem dynamického zatěžování. Dynamické zatěžování je zatěžování, které se s časem mění, takové namáhání má na konstrukci ve srovnání se statickým zatížením vyšší poškozující účinek. [1, 2]

Problematiku únavy materiálu začali naši předci zkoumat s nástupem průmyslové revoluce na začátku 19. století. Nejstarší poznatky se týkaly únavy u důlních řetězů a železničních náprav. Systematicky začal s experimentálním výzkumem až August Wöhler z Německa v druhé polovině 19. století. Ten zformuloval empirické závěry, které platí dodnes:

- Pro lom součásti, který vzniká v důsledku opakovaného zatížení, je rozhodující počet změn zatížení a nikoli doba provozu.
- Poškození materiálu závisí na rozdílu maximálního a minimálního napětí v nebezpečném místě. Absolutní velikost napětí má až druhořadý vliv.
- Výsledky zkoušek lze znázornit křivkami v souřadnicích napětí – počet kmitů (dnes běžně užíváme pojmu Wöhlerovy křivky).
- Z experimentálních výsledků lze stanovit takové mezní napětí, pod nímž k únavovým lomům již nedochází. (Vymezuje tak dnešní pojem meze únavy)
- Geometrické vruby snižují únavovou pevnost o hodnotu závislou na tvaru vrubu a druhu materiálu. [1]

1.2 Wöhlerova křivka

Wöhlerova křivka je statisticky vyhodnocená experimentální únavová křivka napětí, stanovena při určitém počtu kmitů při poruše N a amplitudě nominálního napětí σ_a . Vhodně lze křivku znázornit v semilogaritmické nebo log – log souřadnicové síti. [1]

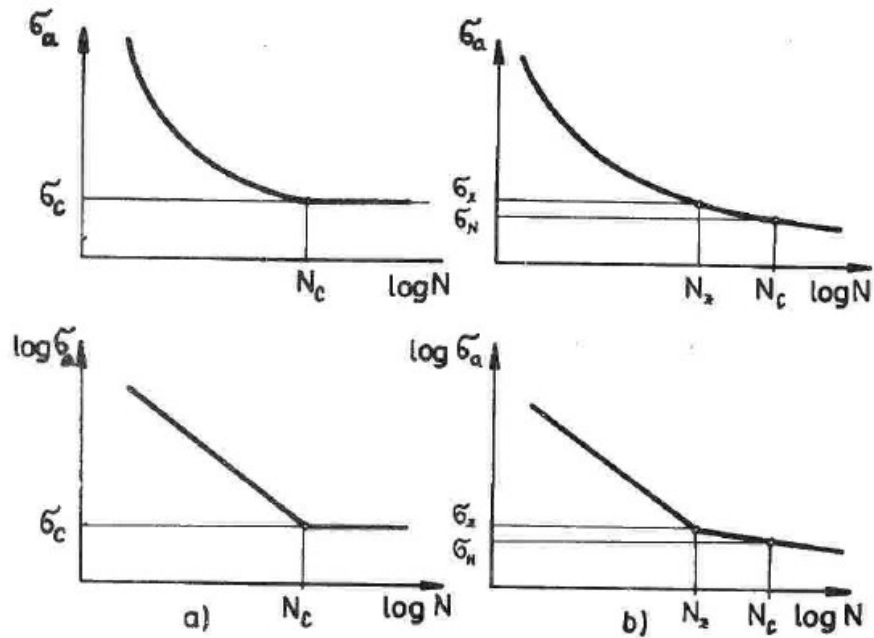


Obrázek 1: Členění oblasti únavy Wöhlerovy křivky [1]

Oblast vymezenou Wöhlerovou křivkou dělíme dle hodnoty amplitudy napětí na trvalou a časovanou pevnost. Hranice je tvořena mezi únavy σ_c . Mez únavy je kmitavé napětí $\sigma_m + \sigma_A$, kde σ_A je mezní výkmit a σ_m je střední napětí kmitu. Časované a trvalé pevnosti na vodorovné ose odpovídá omezená a neomezená životnost. [1, 2, 3]

Únavu z hlediska počtu kmitů do poruchy rozdělujeme na tři základní oblasti:

- První je oblast kvazistatického lomu, kde k porušení dochází již při prvním výkmitu zatížení nebo maximálně při několika desítkách cyklů. Nejedná se o únavový proces.
- Druhou oblastí je oblast nízkocyklové únavy, která spadá do životnosti v rozmezí 10^2 až 10^4 kmitů. Napětí v tělese je veliké a dochází k cyklické plastické deformaci materiálu. Horní hranice bývá spojována s diskontinuitami ve Wöhlerově křivce v oblasti meze kluzu materiálu.
- Poslední je oblast vysokocyklové únavy, která zahrnuje oblast vyšší než asi $5 \cdot 10^4$ kmitů. Případný lom je charakteristický hladkým vzhledem bez známek plastické deformace. Přesné rozdělení oblastí není zcela jednoznačné. [1, 2]



Obrázek 2: Tvary wöhlerových křivek [1]

Případ a) na obrázku 2 s výraznou únavovou mezí σ_c , tudíž $\sigma_a < \sigma_c$ odpovídá $N \rightarrow \infty$, je typický zejména pro uhlíkové oceli. Případ b) je typický pro hliníkové slitiny a vysokopevnostní slitinové oceli, kde je časovaná mez únavy σ_H na bázi N_c kmitů, protože i při $\sigma_a < \sigma_c$ dochází k lomu po N kmitech. Pro stanovení meze únavy je volba počtu kmitů závislá na materiálu a jeho vlastnostech, viz. obrázek 3. Pro hliníkové slitiny je N_c nejčastěji $5 \cdot 10^7$ kmitů. [1]

| pevnost oceli R_m [MPa] | do 700 | do 1 000 | do 1 250 | do 1 700 |
|------------------------------|---------------------------|---------------------------|-----------------------------------|---------------------------|
| báze N_c [kmitů] | $10^6 \dots 5 \cdot 10^6$ | $10^7 \dots 2 \cdot 10^7$ | $2 \cdot 10^7 \dots 4 \cdot 10^7$ | $4 \cdot 10^7 \dots 10^8$ |

Obrázek 3: Volba báze počtu kmitů na mezi únavy pro oceli [1]

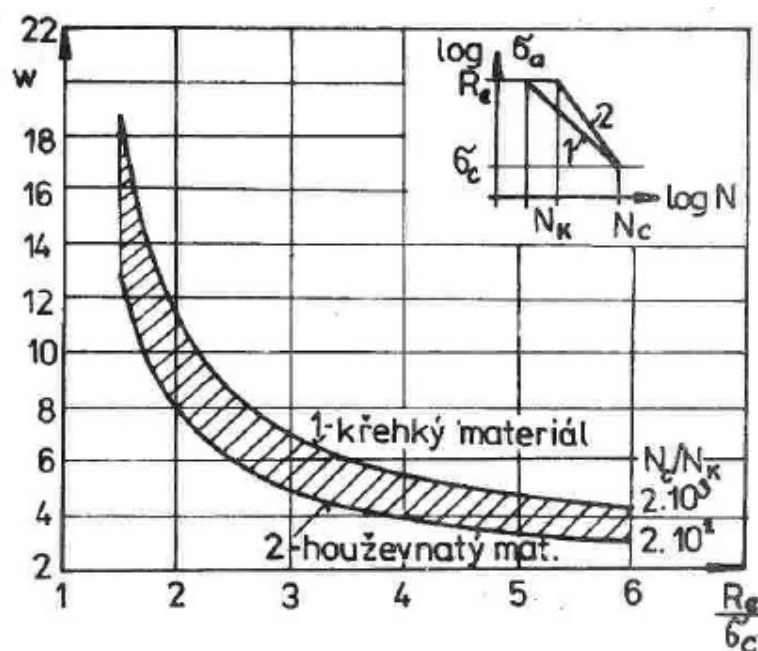
Nejjednodušší a dostatečný popis šikmé větve Wöhlerovy křivky je lineární popis v $\log - \log$ souřadnicích, použitelný v rozmezí od meze kluzu do meze únavy

$$\log N + w \cdot \log \sigma_a = konst., \quad (1)$$

neboli

$$\sigma_a^w \cdot N = C. \quad (2)$$

Konstanty C a w jsou určovány statistickým vyhodnocením experimentálních výsledků. V případě znalosti amplitudy na mezi únavy σ_c při bázi N_c , lze pro rekonstrukci šikmé části křivky využít znalosti exponentu w . Jeho hodnota se odvíjí od vrubovitosti a použitého materiálu. Vrubovitost je definovaná jako poměr meze kluzu k k mezi únavy $\frac{R_e}{\sigma_c}$, jeho obvyklé hodnoty lze odečíst z následujícího obrázku 4. [1]



Obrázek 4: Závislost exponentu w na poměru meze kluzu k k mezi únavy [1]

V případech bez výrazné meze únavy, jako na obrázku 2.b, lze použít pro šikmé části křivky dva exponenty w_1 a w_2 se společným bodem zlomu σ_z , N_z . Mezi exponenty lze užít v případě slitinových ocelí a Al - slitin vazbu

$$w_2 = 2 \cdot w_1 - 1. \quad (3)$$

Weibull navrhl složitější čtyřparametrický model

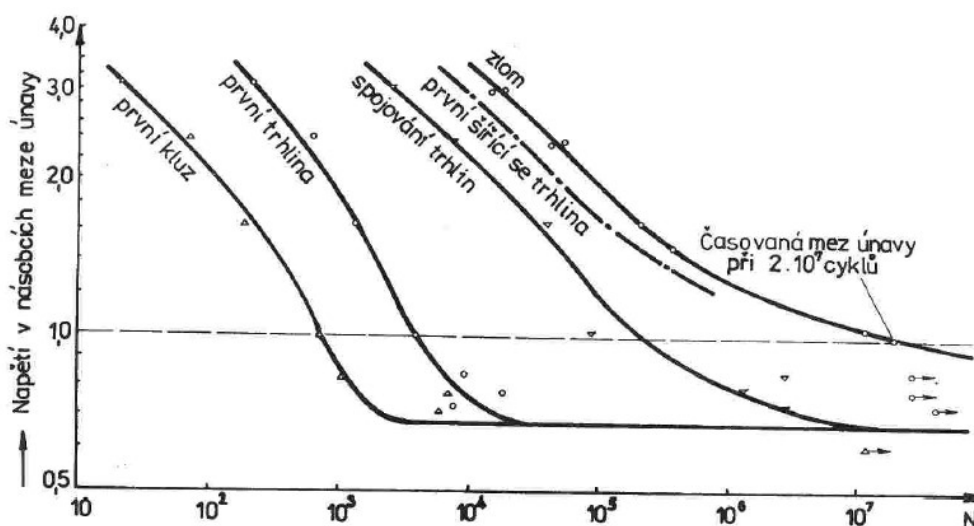
$$\sigma_a - \sigma_c = A \cdot (N - B)^{-a}. \quad (4)$$

Výhodou je, že parametrem B je respektována nízkocyklová oblast křivky. Dolní vodorovnou asymptotu křivky určuje mez únavy. Pro určení všech konstant A , a , B , σ_c je potřeba numerický iterační postup. Tento postup se proto neuzívá tak často jako předchozí. [1]

1.3 Stádia únavového procesu

Únavové poškození je už od samotného začátku zatěžování nevratným dějem. Znamky poškození však nejsou až do pokročilé fáze navenek patrné. Únavové poškození má tak na svědomí nejednu havárii nebo katastrofu. Při podrobnějším zkoumání pod mikroskopem však lze odhalit únavové změny ve struktuře materiálu. Jednotlivé fáze poškození mají systém křivek analogických ke křivce konečné poruchy. Trvalé poškození struktury a zablokování nešířící se mikrotrhliny lze pozorovat i pod mezí únavy materiálu, což vede k definici prahového napětí

$$\sigma_o = (0,4 - 0,7) \sigma_c. \quad (5)$$



Obrázek 5: Křivky únavového poškození [1]

Únavový proces lze rozčlenit do několika následujících fází:

- Stádium změn mechanických vlastností, kdy dochází ke změnám struktury kovu v celém objemu. Změny se projevují v počátcích zatěžování jako cyklické zpevnování či změkčování. Tato fáze tvoří jen malou část z celkové životnosti a není tak důležitá, jako další dvě fáze.
- Stádium nukleace únavových trhlin, zahrnuje změny v povrchových vrstvách vyvolané dislokačními jevy. V těchto místech dochází k hromadění plastických deformací a vzniku mikrotrhlin.

- c) Stádium šíření trhliny, zahrnuje růst mikrotrhliny a její šíření až do finálního lomu.
[1, 2, 4]

2 Únavové křivky

2.1 Únavové křivky a jejich parametry

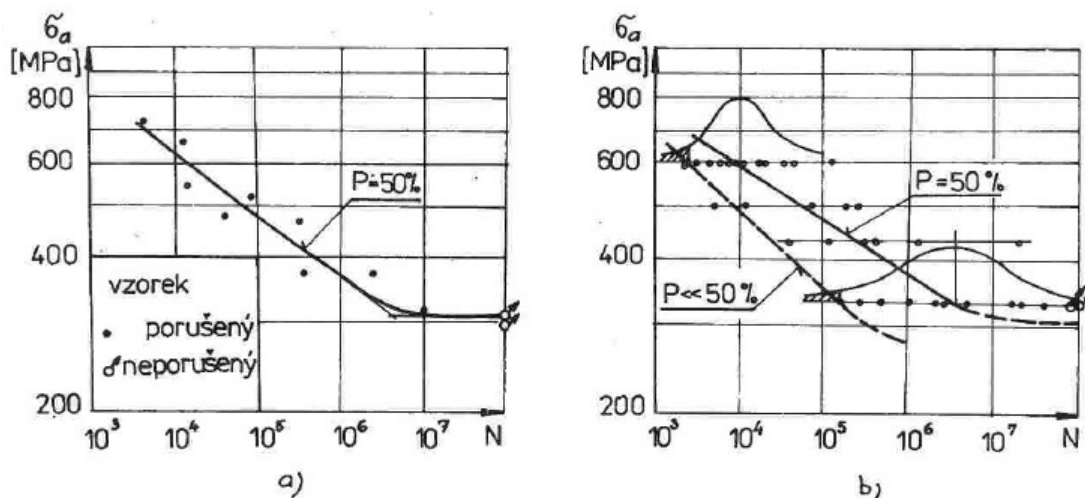
Základní úhlové vlastnosti vzorků či konstrukcí se získávají jednostupňovou únavovou zkouškou. Výsledky z takových statisticky vyhodnocených zkoušek se nazývají základní únavové křivky, či křivky životnosti. Podle charakteru zkoušeného vzorku a volby zatěžujícího režimu lze použít různé formy zpracování. [1]

- a) První formou jsou křivky v souřadnicích zatížení - počet kmitů do poruchy. Používají se pro zkoušky členitých objektů s řízenou silou zatěžování, kdy určení napětí na reálné součásti by nebylo zcela jednoznačné. Takové křivky však lze porovnávat pouze s výsledky zkoušek prováděných za shodných podmínek.
- b) Křivky v souřadnicích napětí - počet kmitů do poruchy označujeme jako únavové nebo Wöhlerovy křivky. Konstruovány jsou zejména pro amplitudu nominálního napětí σ_a při středním napětí kmitu σ_m . U členitých částí je napětí vztahováno k přesně definovanému místu.
- c) Křivky získané při zatěžování v souřadnicích amplituda či rozkmit poměrné deformace - počet kmitů, případně půlkmitů do poruchy. Tyto závislosti, které jsou většinou získávané při střední poměrné deformaci kmitu $\varepsilon_m = 0$, se nazývají únavové křivky deformace. [1]

2.2 Konstruování únavových křivek

Ne vždy je k dispozici uspokojivý počet zkušebních vzorků, časových či ekonomických kapacit pro únavové zkoušky o potřebném rozsahu. V takovém případě je potřeba přistoupit k přibližnému odhadu mediánové únavové křivky a meze únavy bez možnosti extrapolací k nižší pravděpodobnosti poruch. V případě nižšího počtu vzorků než 15 jsou voleny různé hladiny řízené veličiny (σ_a nebo ε_a), na které zkoušíme po jednom maximálně dvou vzorcích do poruchy nebo zvolené báze N_c kmitů. Mez únavy můžeme stanovit jako napětí σ_c , při kterém na hladině

vykáží minimálně dva vzorky životnost N_c , nebo druhý ze vzorků na hladině maximálně o 10% nižší. Pro vyrovnání výsledků je užívána u časované pevnosti lineární regrese. Obrázek 6 zobrazuje způsob aproximace mediánové únavové křivky napětí. [1]



Obrázek 6: Způsob aproximace mediánové únavové křivky napětí [1]

Úplný únavový diagram lze sestavit pouze v případě, že je k dispozici vyšší počet zkušebních vzorků pro stejnou hladinu napětí, při alespoň čtyřech hladinách na mezi únavy, jak je patrné vpravo na obrázku 6. Pro život vzorků je nejčastěji voleno logaritmicke - normální nebo Weibullovo statistické rozdělení. Vhodnost použitého rozdělení je posuzována vynesemím výsledků na pravděpodobnostní papír s možností aproximace přímkou. Pro každou hladinu napětí se provede následující zpracování:

- Pro všech n zkoumaných vzorků na dané amplitudě napětí seřadíme počty kmitů do poruchy N_i vzestupně podle délky životnosti.
- Všem těmto hodnotám se přiřadí pořadová pravděpodobnost P_i určená dle vztahu

$$P_i = \frac{i}{n+1}, \quad (6)$$

kde i je pořadové číslo výsledku N_i ve vzestupně uspořádané řadě.

- Hodnoty životnosti a pořadové pravděpodobnosti (N_i , P_i) se vynášejí na pravděpodobnostní papír pro zvolené statistické rozdělení.
- Po vyrovnání výsledků přímkou se vyhodnocuje vhodnost modelu.

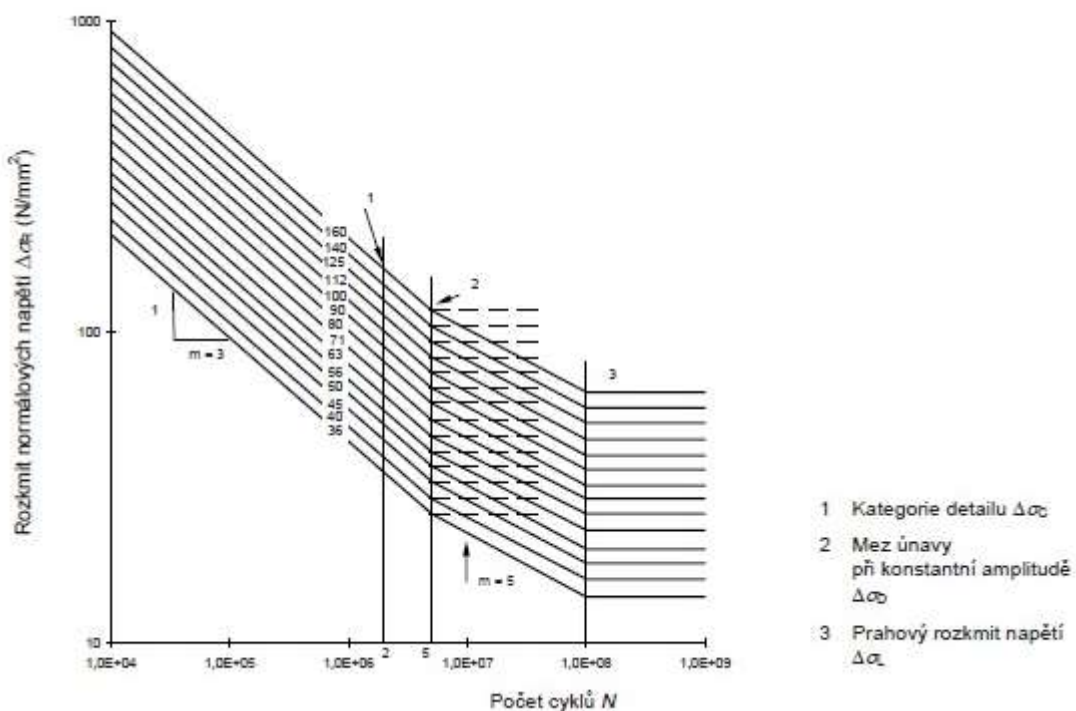
- Z grafické aproximace lze odhadnout parametry rozdělení. [1]

2.3 Stanovení únavové křivky při nižším počtu zkušebních vzorků

Jak již bylo zmíněno výše, v případě nižšího počtu zkušebních vzorků zkoušených při určeném zatížení do poruchy, lze následně získanými body proložit regresní lineární křivku. Takovou křivku lze pokládat za spojitou funkci v následujícím tvaru

$$\log N = \log C - m \cdot \log \sigma_R, \quad (7)$$

kde N = počet kmitů, $\log C$ = konstanta platná v určené oblasti N , m = konstanta sklonu únavové křivky a σ_R = rozkmit napětí. Hodnoty m sklonu trilineární křivky jsou 3 a 5, jak vyplývá z normy ČSN EN 1993-1-9 a jak lze vidět na následujícím obrázku 7. [5, 6]



Obrázek 7: Křivky únavové pevnosti pro rozkmit normálových napětí [6]

3 Cíle zkoušky

Cílem experimentální části této práce je ověření vlivu vrubu na únavovou životnost navržených ocelových konzol. Tyto konzoly byly navrženy ve třech variantách konstrukčního

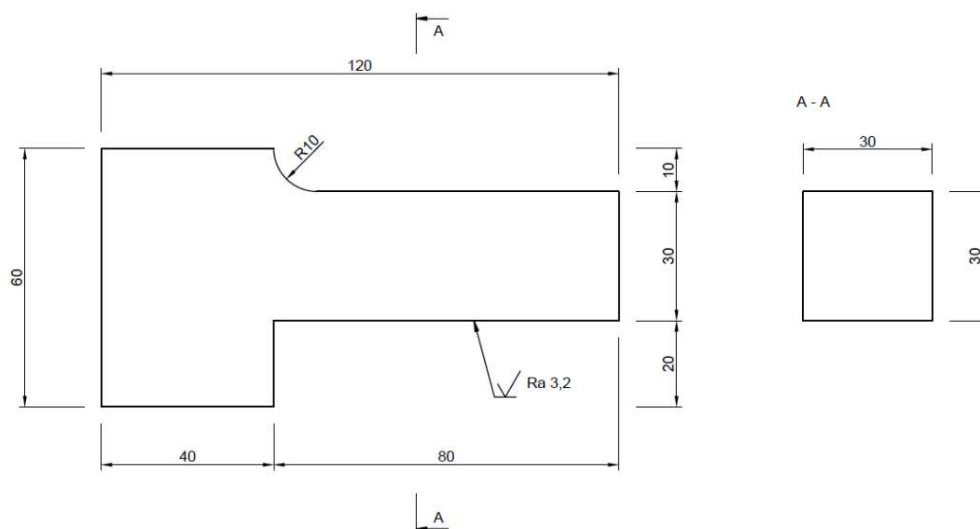
detailu přechodu do vetknutí s cílem následně určit, která varianta je z pohledu životnosti nejtrvanlivější. Pro jednotlivé typy konzol byly sestaveny mediánové únavové křivky.

4 Návrh zkušebních vzorků

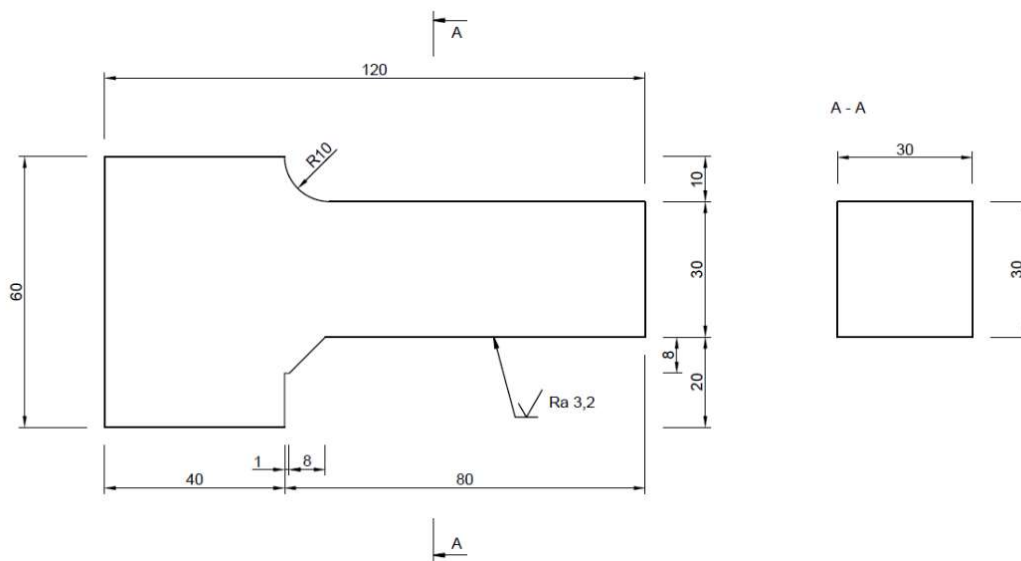
Varianty zkušebních vzorků byly voleny s ohledem na časovou a finanční náročnost výroby (předpokladem bylo, že varianta s časově nejrychlejší a nejméně náročnou výrobou bude v kontrastu s výslednou únavovou životností nejméně odolná).

4.1 První varianta vzorků

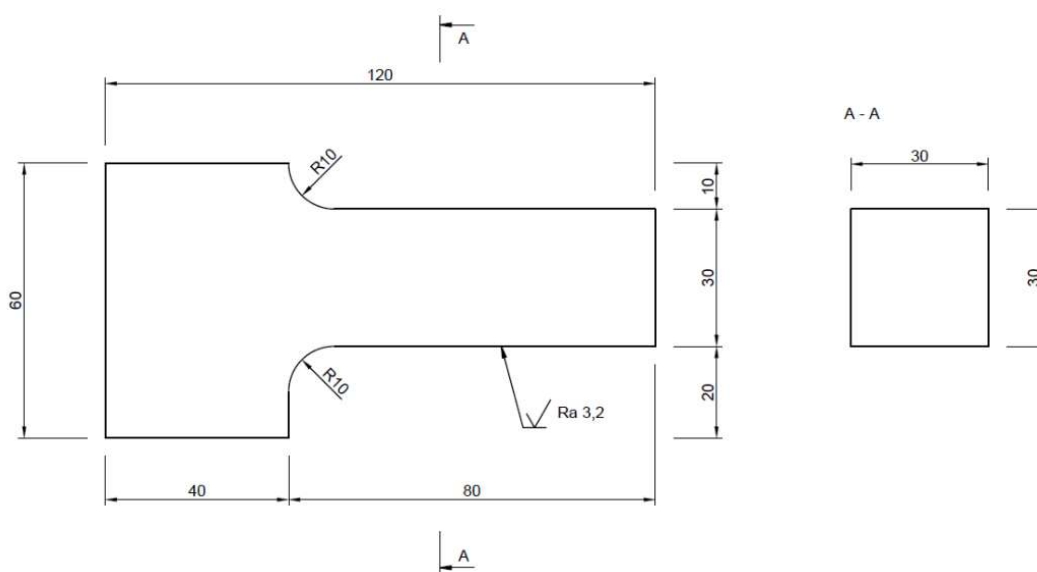
Prvotní návrh tvaru zkušebních vzorků byl odvozen od vybavení v laboratoři, které bylo následně použito pro uchycení vzorku při zkoušce. Od začátku bylo zamýšleno vytvoření třech různých typů s možností jejich následného porovnání. Po zjištění potřebných rozměrů upevnění byla zahájena práce v programu SCIA Engineer. V programu bylo zjištěno napětí ve vzorku a od toho se odvíjel jeho finální tvar. S přihlédnutím k možnostem výroby samotných vzorků a ke znalostem o únavové životnosti byla navržena následující 3 konstrukční řešení. První typ je bez úpravy s kolmým přechodem. Druhý typ je s náběhem, který by měl zmírnit účinky dynamického namáhání, ale stále se zde nachází vrub, na kterém se bude koncentrovat napětí. Třetí varianta je s ohledem na odstranění vrubu s plynulým přechodem. U všech vzorků byl na horní straně navržen plynulý přechod pro zmenšení napětí v těchto místech. Vzorky byly vyrobeny z oceli S235JR v následující podobě.



Obrázek 8: Vzorek kolmý



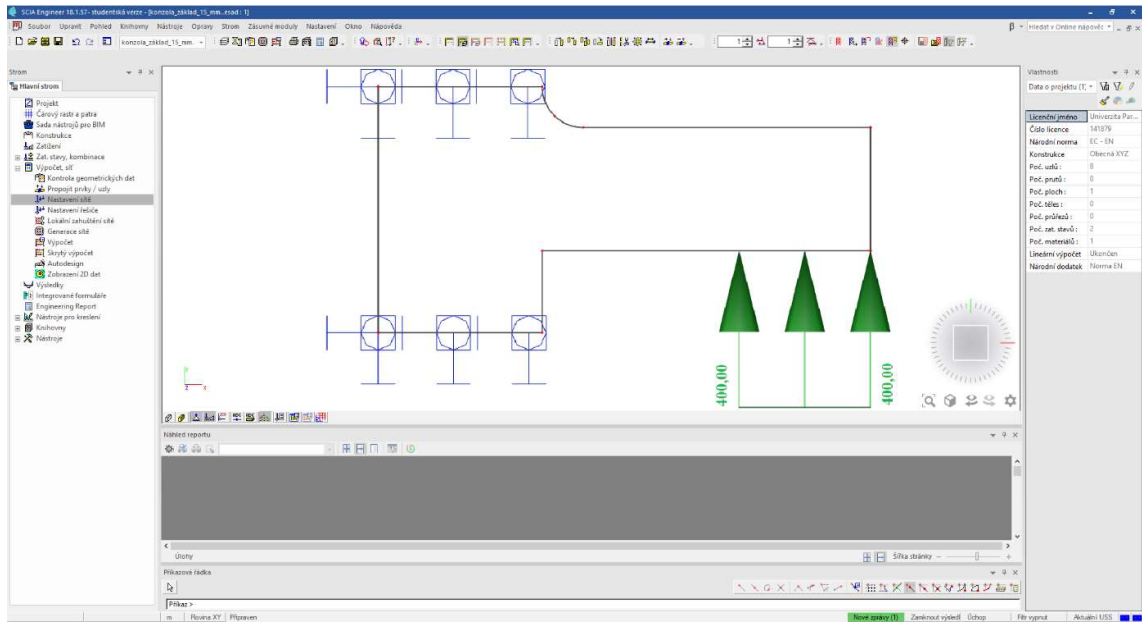
Obrázek 9: Vzorek s náběhem



Obrázek 10: Vzorek se zaoblením

4.1.1 Stanovení kritických napětí

Napětí v jednotlivých typech vzorků byla zjištěna v programu SCIA Engineer, jak již bylo zmíněno výše. Do programu byla nejprve importována předem připravená šablona vzorku, pro kterou se následně doplnily zbylé rozměry a vlastnosti. Dále bylo definováno upevnění na základě získaných rozměrů v laboratoři a přesné místo působení síly. Výpočty byly pro každý typ vzorku provedeny s několika různými hodnotami zatěžovací síly. Poloha upevnění a působící síly na vzorku při výpočtu v programu je vidět na obrázku 11.



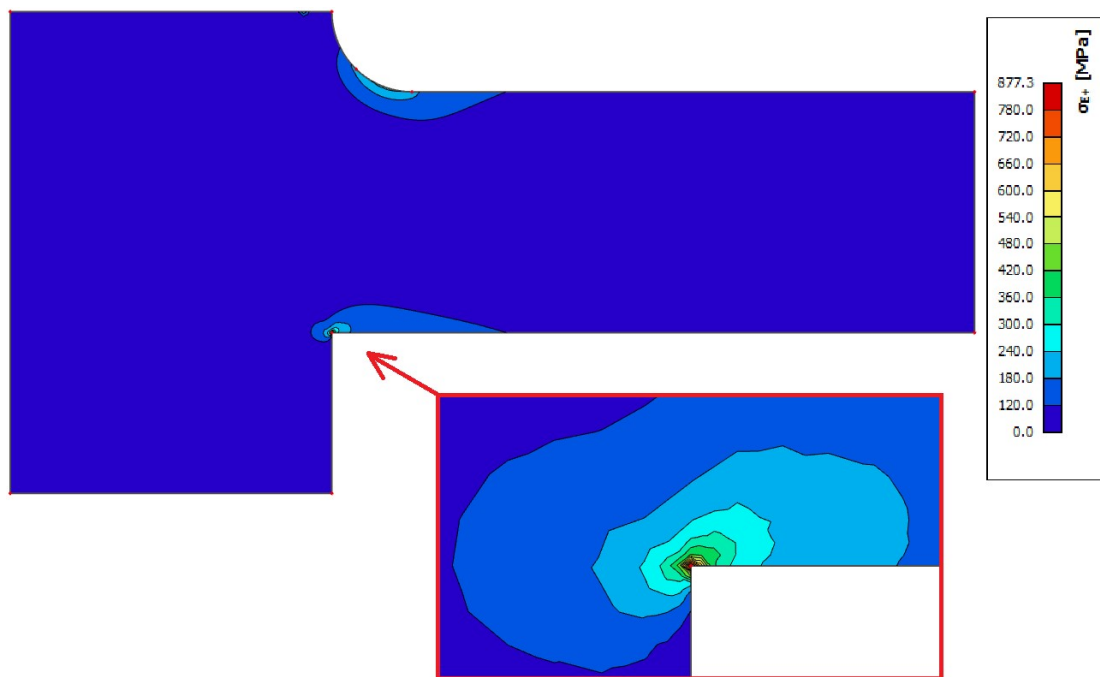
Obrázek 11: Poloha upevnění a působící síly na vzorku při výpočtu (prostředí SCIA Engineer)

Před provedením výpočtu byla dále nastavena výpočtová síť a její lokální zahuštění. Blíže je výpočtová síť popsána v kapitole 4.2. V následující tabulce je přehled vypočtených maximálních napětí u jednotlivých vzorků při daném zatížení v nejvíce namáhaném místě.

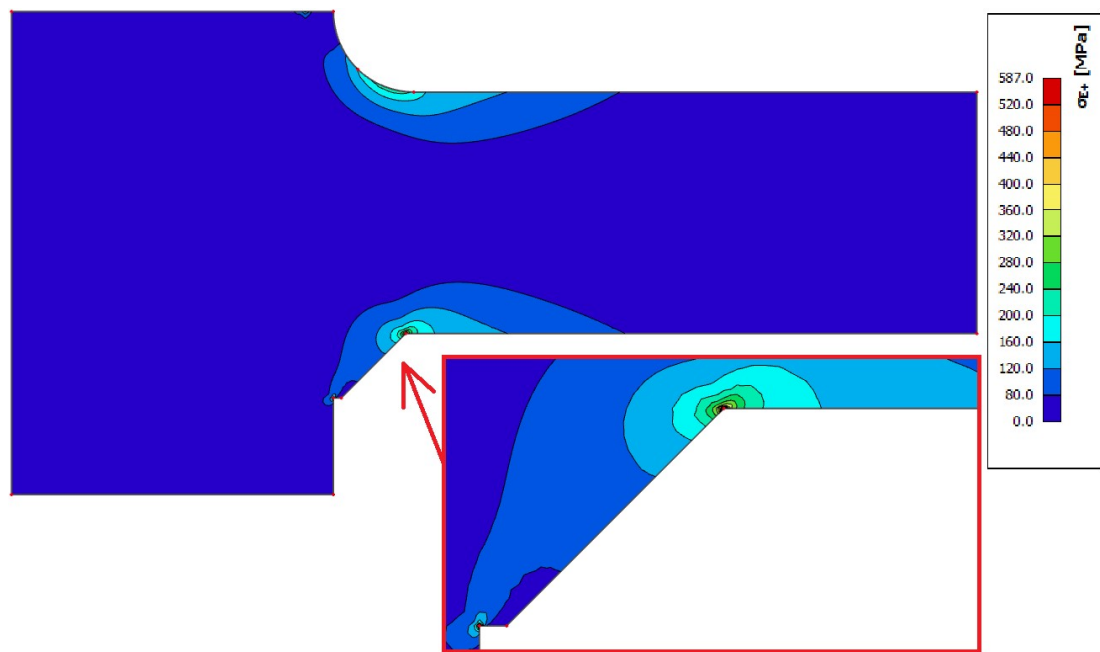
| | | Konzola s hranou | | | | | |
|-----------|-------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| Síla [kN] | Spojité zatížení [kN/m] | $\bar{\sigma}_x$ [MPa] | $\bar{\sigma}_y$ [MPa] | $\bar{\sigma}_z$ [MPa] | $\bar{\sigma}_x$ [MPa] | $\bar{\sigma}_y$ [MPa] | $\bar{\sigma}_z$ [MPa] |
| 12,76 | 400 | 751,7 | -239,2 | 647 | -107,4 | 877,3 | |
| 9,57 | 300 | 563,8 | -179,4 | 485,2 | -80,5 | 658 | |
| 6,38 | 200 | 375,8 | -119,6 | 323,5 | -53,7 | 438,6 | |
| | | Konzola s náběhem | | | | | |
| Síla [kN] | Spojité zatížení [kN/m] | $\bar{\sigma}_x$ [MPa] | $\bar{\sigma}_y$ [MPa] | $\bar{\sigma}_z$ [MPa] | $\bar{\sigma}_x$ [MPa] | $\bar{\sigma}_y$ [MPa] | $\bar{\sigma}_z$ [MPa] |
| 12,76 | 400 | 553,5 | -214,7 | 320,7 | -86,8 | 587 | |
| 9,57 | 300 | 415,1 | -161 | 240,6 | -65,1 | 440,3 | |
| 6,38 | 200 | 276,7 | -107,3 | 160,4 | -43,4 | 293,5 | |
| | | Konzola se zaoblením | | | | | |
| Síla [kN] | Spojité zatížení [kN/m] | $\bar{\sigma}_x$ [MPa] | $\bar{\sigma}_y$ [MPa] | $\bar{\sigma}_z$ [MPa] | $\bar{\sigma}_x$ [MPa] | $\bar{\sigma}_y$ [MPa] | $\bar{\sigma}_z$ [MPa] |
| 12,76 | 400 | 221,4 | -221,9 | 91,7 | -91,8 | 231,5 | |
| 9,57 | 300 | 166 | -166,4 | 68,8 | -68,9 | 173,7 | |
| 6,38 | 200 | 110,7 | -111 | 45,9 | -45,9 | 115,8 | |

Tabulka 1: Tabulka s hodnotami napětí pro jednotlivé typy vzorků při různé síle

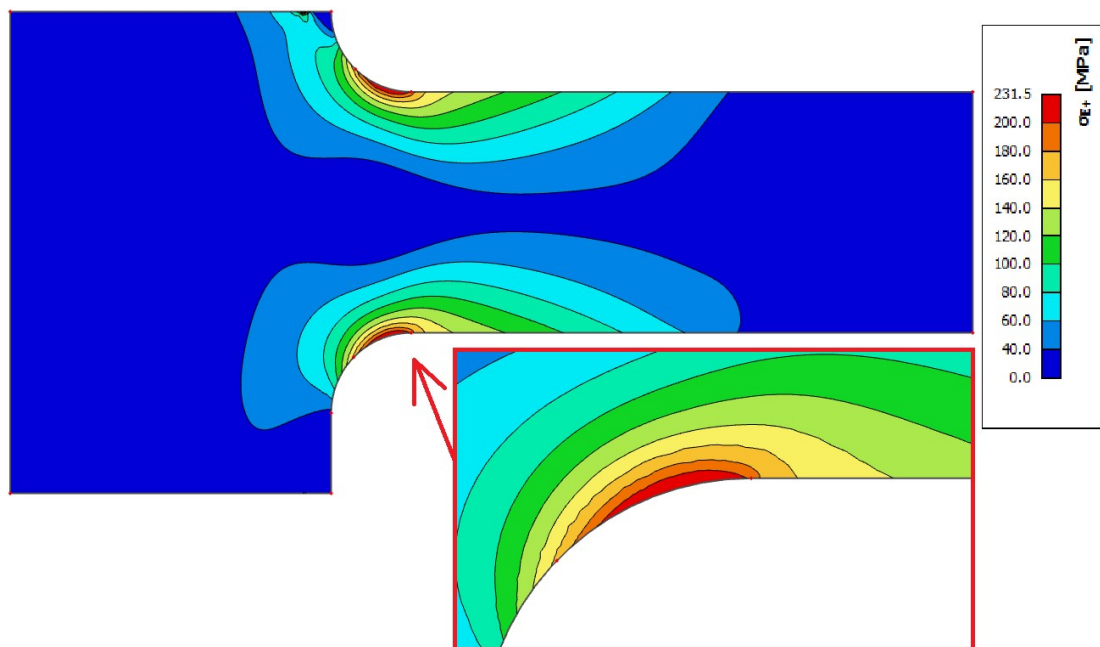
Při výpočtu byla hodnota ekvivalentního napětí $\bar{\sigma}_E$ v místě vetknutí (vrubu) u kolmého vzorku při síle 12,76 kN stanovena na 877,2 MPa, což vysoce překračuje mez kluzu použitého materiálu 235 MPa. Obrázky 12 až 14 z programu SCIA Engineer zobrazují průběh napětí v jednotlivých vzorcích při zatížení silou 12,76 kN.



Obrázek 12: Napětí σ_E v kolmém vzorku při síle 12,76 kN (max. 877,3 MPa)



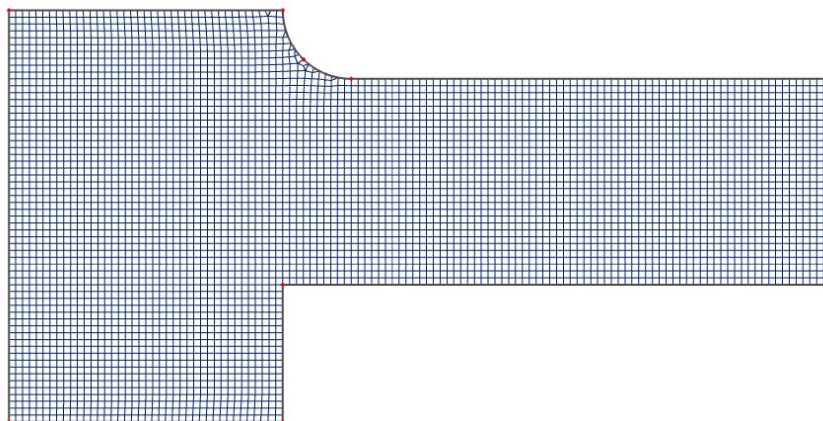
Obrázek 13: Napětí σ_E ve vzorku s náběhem při síle 12,76 kN (max. 587,0 MPa)



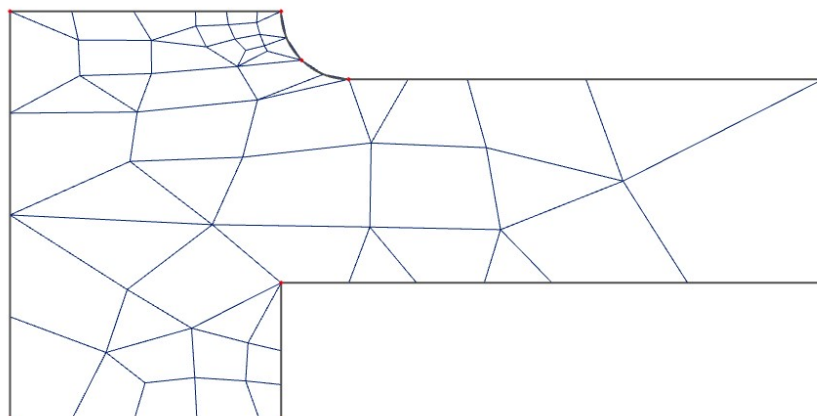
Obrázek 14: Napětí σ_E ve vzorku se zaoblením při síle 12,76 kN (max. 231,5 MPa)

4.2 Vliv hustoty sítě na výsledky napětí

Citlivost výpočtu (výsledků) na různou hustotu automaticky generované sítě (velikost elementů MKP) systémem SCIA byla ověřena na různých modelech při dané definované síle (9,57 kN), geometrii a ostatních okrajových podmínkách. Nej hustší definované zasíťování bylo dáno průměrnou velikostí plošného prvku 0,0001 m. Vyšší hustota sítě nebyla vzhledem k hardwarovým nárokům na výpočet možná. Nejnížší hustota sítě byla dána průměrnou velikostí plošného prvku 0,1 m. Dosažené hodnoty napětí při různých hustotách sítě jsou uvedeny v tabulce 2. Jednotlivými výsledky byla proložena mocninná křivka, viz. graf č. 1. Na základě uvedených závěrů bylo do výpočtu použito kombinované zasíťování s průměrnou velikostí plošného prvku 0,0005 m se zahuštěním v kritickém místě na 0,0001 m, viz. obr. 17.



Obrázek 15: Příklad zasiťování vzorku s průměrnou velikostí plošného prvku 0,001 m



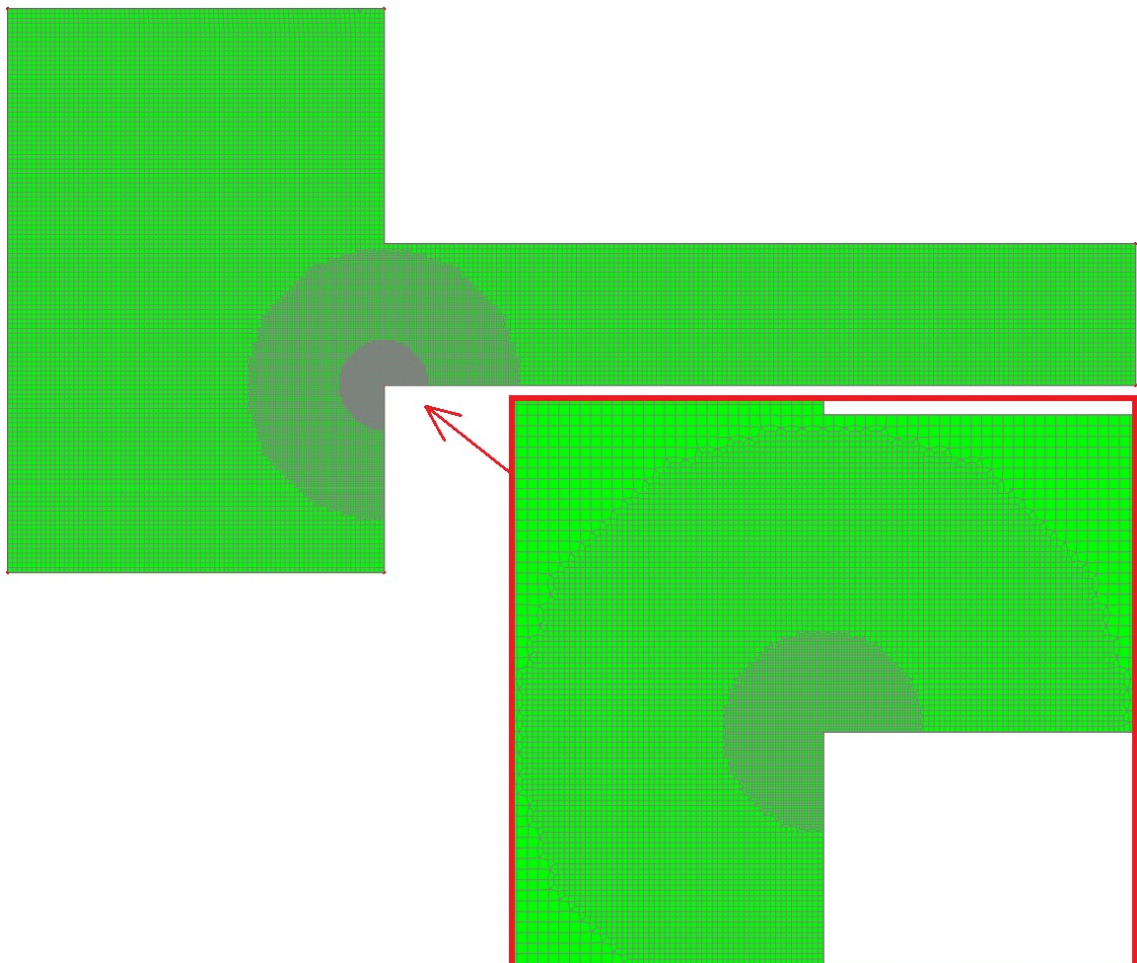
Obrázek 16: Příklad zasiťování vzorku s průměrnou velikostí plošného prvku 0,1 m



Graf 1: Závislost výsledného napětí na hustotě sítě

| velikost sítě | počet uzlů | 2D prvky | napětí sigma x | | napětí sigma y | | napětí sigma E |
|---------------|------------|----------|----------------|--------|----------------|--------|----------------|
| 0,1 | 64 | 56 | 103,9 | -138,2 | 28,4 | -55 | 144,4 |
| 0,05 | 83 | 73 | 122,7 | -116,7 | 64,6 | -54,3 | 118,9 |
| 0,01 | 74 | 54 | 106,8 | -114,9 | 47,1 | -46,2 | 117,1 |
| 0,005 | 229 | 192 | 128,5 | -144,2 | 66,8 | -62,7 | 154 |
| 0,001 | 5002 | 4826 | 223,7 | -177,4 | 158,4 | -80,8 | 250,2 |
| 0,0005 | 19642 | 19293 | 295,8 | -179,3 | 226,4 | -80 | 340 |
| 0,0001 | 483929 | 482177 | 581,8 | -317,8 | 501,5 | -143,5 | 700,3 |
| 0,0005+0,0001 | 23160 | 22507 | 563,8 | -179,4 | 485,2 | -80,5 | 658 |

Tabulka 2: Tabulka s napětím ve vzorku při různé hustotě sítě

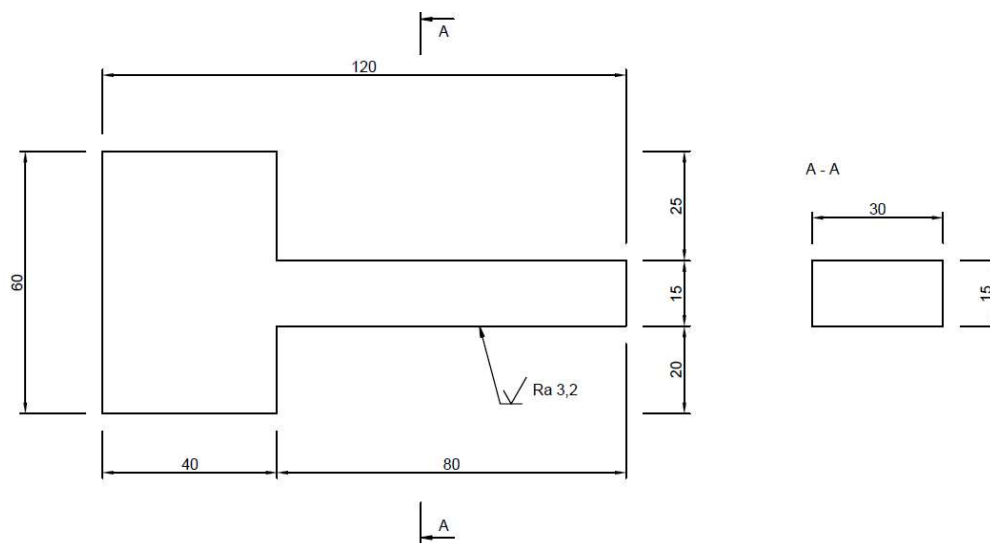


Obrázek 17: Zasítování s průměrnou velikostí plošného prvku 0,0005 m se zahuštěním na 0,0001 m

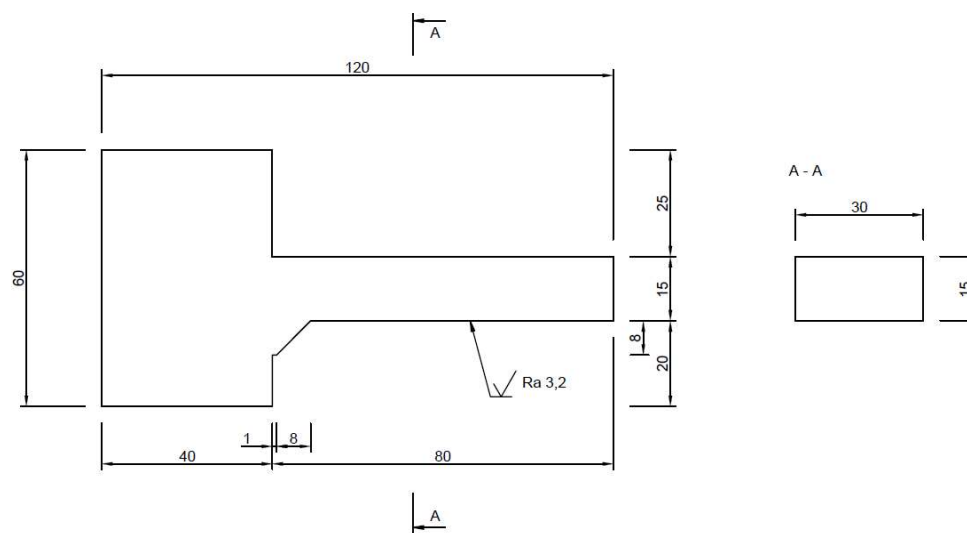
4.3 Druhá varianta vzorků

Při zatěžování prvního vzorku byla únavová pevnost podstatně vyšší oproti původnímu teoretickému předpokladu. Experimentální dynamické namáhání nevyvolalo u vzorku č. V01n

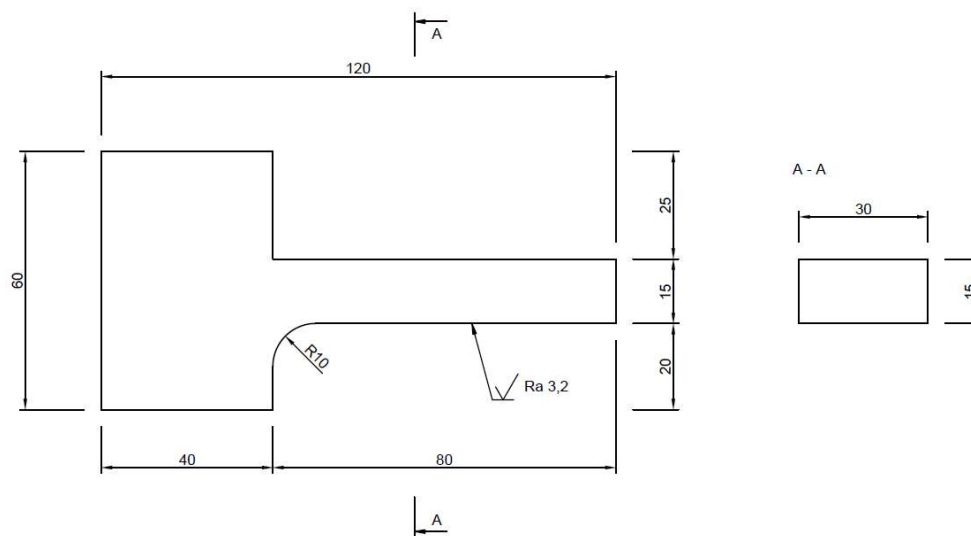
žádnou viditelnou únavovou poruchu. Namáhání bylo realizováno silou 15 kN, bylo dosaženo 3,8 mil cyklů. Vzhledem k časové náročnosti zkoušek a použitému zatížení bylo rozhodnuto dále s danou geometrií vzorků v testech nepokračovat (použitý vzorek byl s náběhem, lze předpokládat, že vzorek se zaoblením by vzhledem k silovým možnostem použitého válce INOVA, s max. působící silou 20 kN, nebylo možno dynamicky porušit vlivem únavy materiálu). Vzhledem k tomu byly provedeny nové výpočty ve výše uvedeném programu a vzorky byly upraveny odfrézováním horní poloviny ramene konzoly do podoby na obrázcích 18 až 20.



Obrázek 18: Vzorek kolmý



Obrázek 19: Vzorek s náběhem

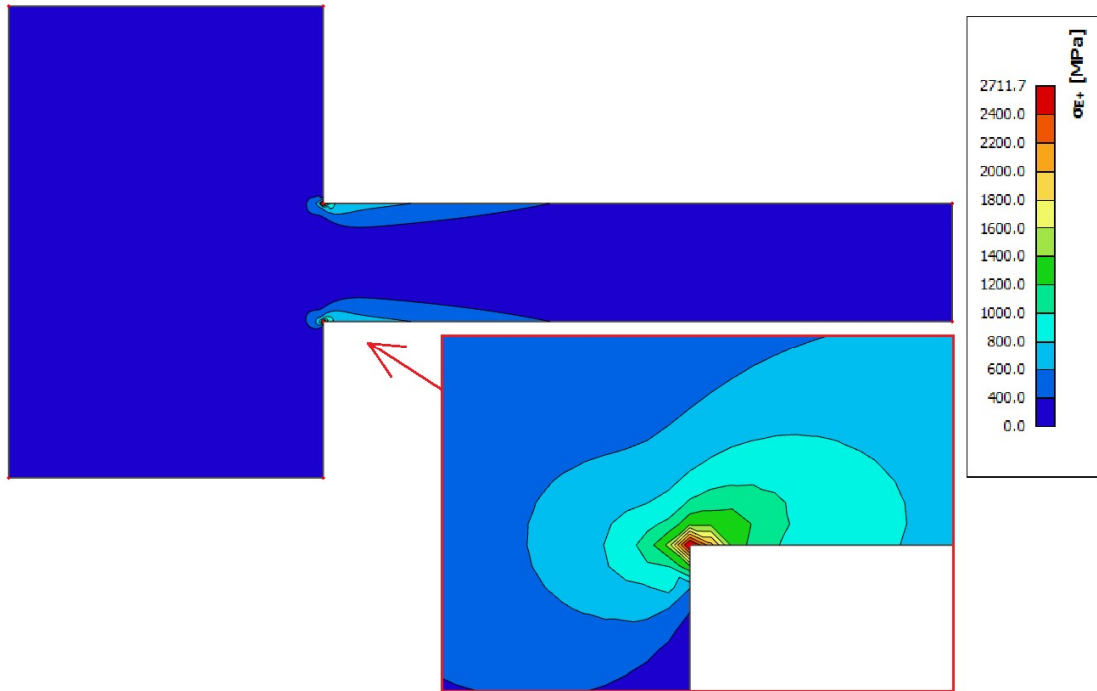


Obrázek 20: Vzorek se zaoblením

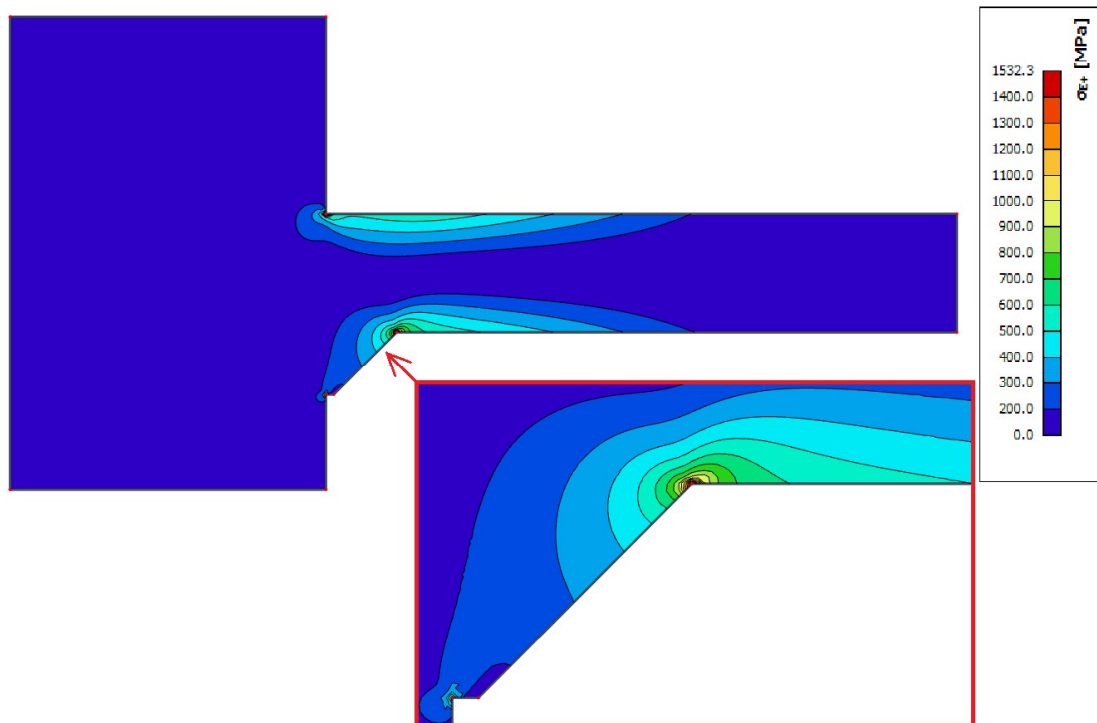
| Konzola s hranou | | | | | | |
|------------------------------|-------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|--------|--------|
| Síla [kN] | Spojité zatížení [kN/m] | $\bar{\sigma}_x$ [MPa] | $\bar{\sigma}_y$ [MPa] | $\bar{\sigma}_E$ [MPa] | | |
| 12,76 | 400 | 2312,9 | -1351,4 | 1861,1 | -931,8 | 2711,7 |
| 9,57 | 300 | 1734,7 | -1013,6 | 1395,8 | -698,8 | 2033,7 |
| 6,38 | 200 | 1156,5 | -675,7 | 930,5 | -465,9 | 1355,8 |
| Konzola s náběhem | | | | | | |
| Síla [kN] | Spojité zatížení [kN/m] | $\bar{\sigma}_x$ [MPa] | $\bar{\sigma}_y$ [MPa] | $\bar{\sigma}_E$ [MPa] | | |
| 12,76 | 400 | 1435,8 | -856,6 | 574,1 | -569,4 | 1532,3 |
| 9,57 | 300 | 1076,8 | -642,5 | 430,6 | -427 | 1149,2 |
| 6,38 | 200 | 717,9 | -428,3 | 287,1 | -284,7 | 766,2 |
| Konzola s plynulým přechodem | | | | | | |
| Síla [kN] | Spojité zatížení [kN/m] | $\bar{\sigma}_x$ [MPa] | $\bar{\sigma}_y$ [MPa] | $\bar{\sigma}_E$ [MPa] | | |
| 12,76 | 400 | 818,2 | -975,5 | 265,4 | -651,5 | 1077,2 |
| 9,57 | 300 | 613,7 | -731,6 | 199,1 | -488,6 | 807,9 |
| 6,38 | 200 | 409,1 | -487,7 | 132,7 | -325,8 | 538,6 |

Tabulka 3: Tabulka s hodnotami napětí pro jednotlivé typy vzorků při různé síle

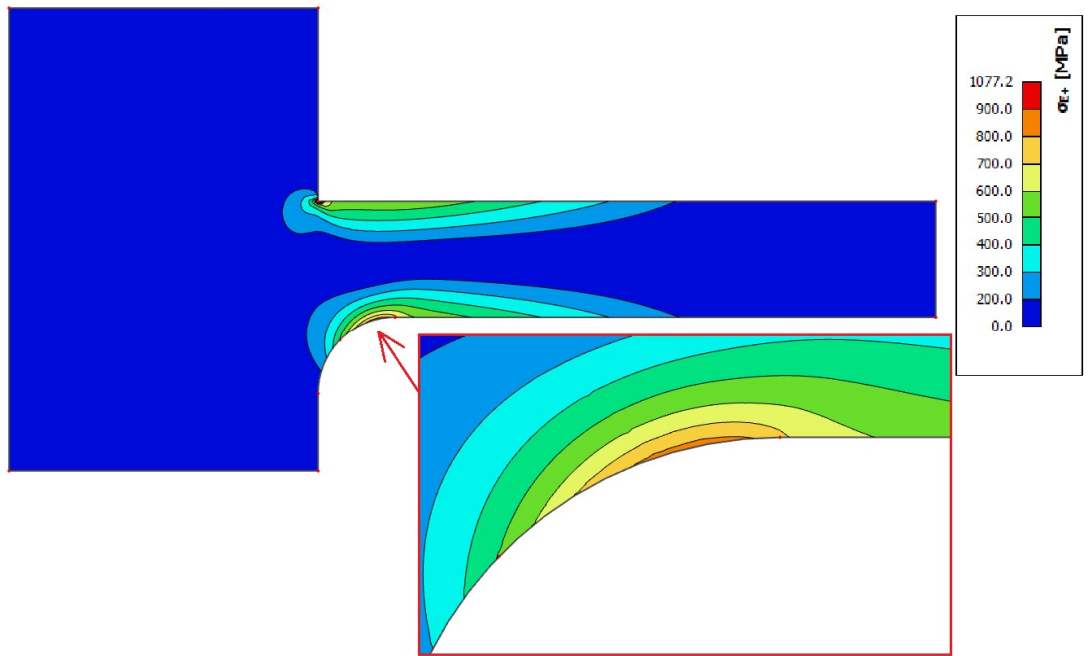
Uvedené hodnoty v tabulce 3 znázorňují, že provedené změny podstatně zvýšily hodnotu kritického napětí v místě vrubu. U prvního kolmého vzorku se hodnota ekvivalentního napětí zvýšila na 2711,7 MPa z původních 877,3 MPa. Vzorků bylo vyrobeno 10 kusů každého typu. Na obrázcích 21 až 23 z programu SCIA Engineer je uveden průběh napětí σ_E v jednotlivých vzorcích při dané síle.



Obrázek 21: Napětí σ_E v kolmém vzorku při síle 12,76 kN (max. 2711,8 MPa)



Obrázek 22: Napětí σ_E ve vzorku s náběhem při síle 12,76 kN (max. 1532,3 MPa)



Obrázek 23: Napětí σ_E ve vzorku se zaoblením při síle 12,76 kN (max. 1077,2 MPa)

5 Experimentální testy

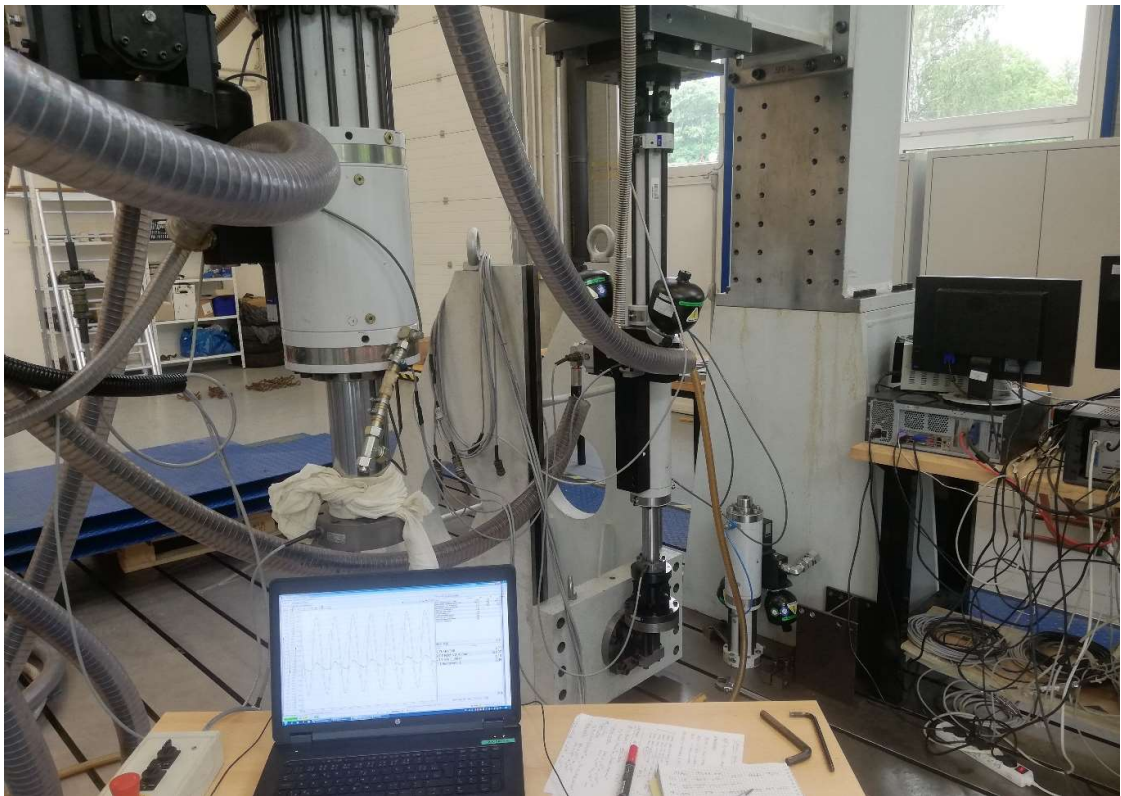


Obrázek 24: Dynamický zkušební stav VVCD

Experimentální test byl u každého vzorku reprezentován statickým a dynamickým zatížením. Statická část byla realizována za účelem ověření silového působení na vzorek a za účelem ověření stability celého systému během následující dynamické zkoušky. Dynamická část byla realizována za účelem zjištění únavové životnosti vzorku. Testy probíhaly v dynamické laboratoři Výukového a výzkumného centra v Dopravě (VVCD), Univerzity Pardubice v sekci DZS, viz. obr. 24.

5.1 Zatěžovací sestava

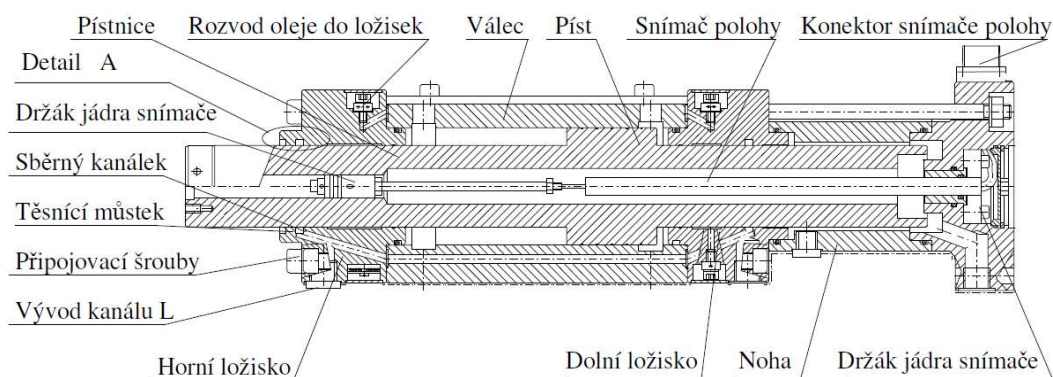
Zatěžování bylo realizováno na zkušebním stavu INOVA. Celá sestava se skládá z hydroagregátu, rozvodu oleje, napaječe, přípojné desky, servoventilů, válce, upínacího pole, zatěžovacího rámu, opěry a kloubů. Zatěžovací stav INOVA je zobrazen na obrázku 25.



Obrázek 25: Zatěžovací stav INOVA

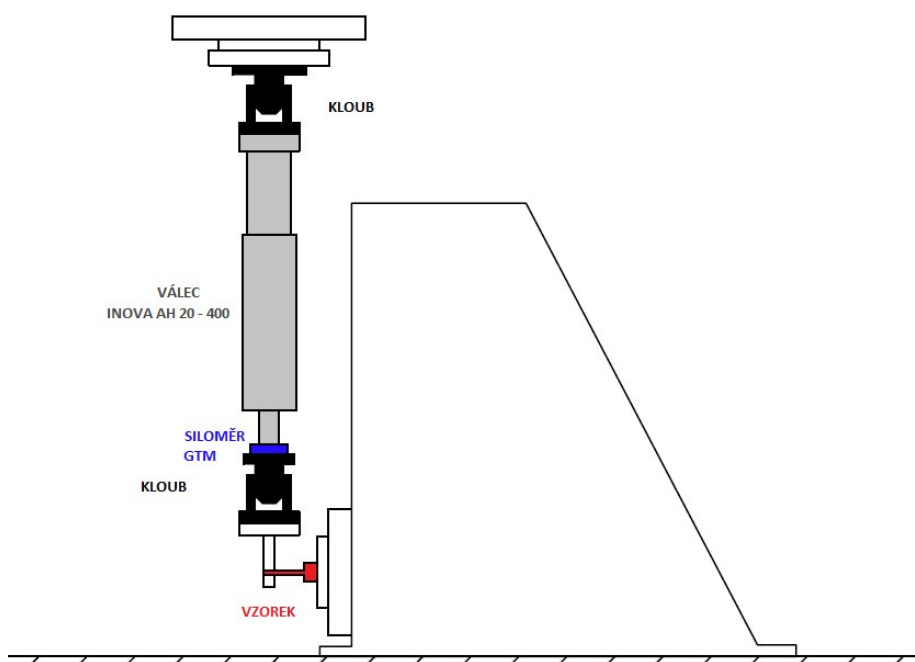
Hlavní částí sestavy byl válec AH 20 – 400, což je přímočarý hydromotor pro kvazistatické a dynamické zatěžování. Válec má hydrostatická ložiska s polyamidovým potahem a je schopen vyvinout sílu 20 kN a provést zdvih 400 mm, pracovní tlak je 28 MPa. Válec je bez stíracích kroužků (zapojeno odsávací čerpadlo). Ovládán je prostřednictvím programu TestControl. Pro řízení byly použity dva servoventily Moog připojené k SCA desce,

ke které byly připojeny přívodní hadice a hydropneumatické akumulátory. V pístnici hydromotoru se nachází indukční snímač polohy. Na obrázku 26 je řez válcem AH. [7]



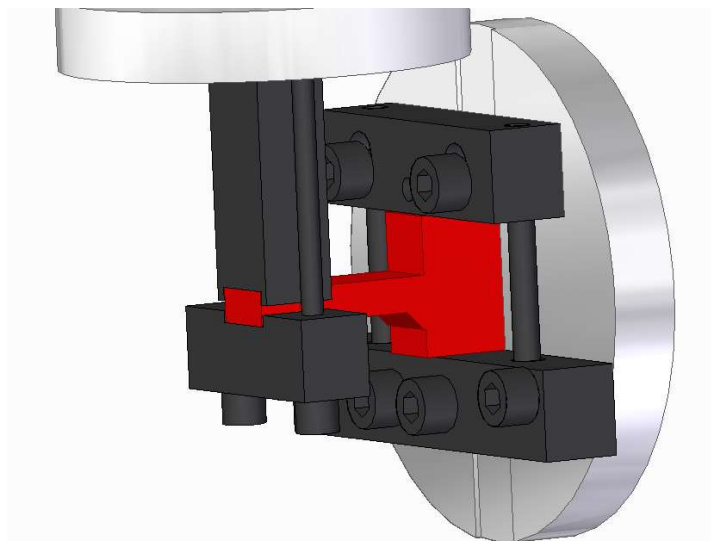
Obrázek 26: Řez hydromotorem AH [7]

Dále byla sestava vybavena siloměrem GMT WLG20. Siloměr byl připojen k pístnici válce. Na siloměr byl z druhé strany připojen kardanový kloub. Kardanové klouby JC se montují v případě nesouosostí v zatěžovacím řetězci a umožňují vychýlení o 8° ve všech směrech. Klouby byly namontovány na přírubu hydromotoru na horní straně a na opačné straně k siloměru. Na spodní kloub byly dále připojeny součásti pro uchycení vzorku. Vrchní kloub byl připojen k podložkám upevněným na příčnici zatěžovacího rámu. Schéma zatěžovací sestavy je zobrazeno na obrázku 27.



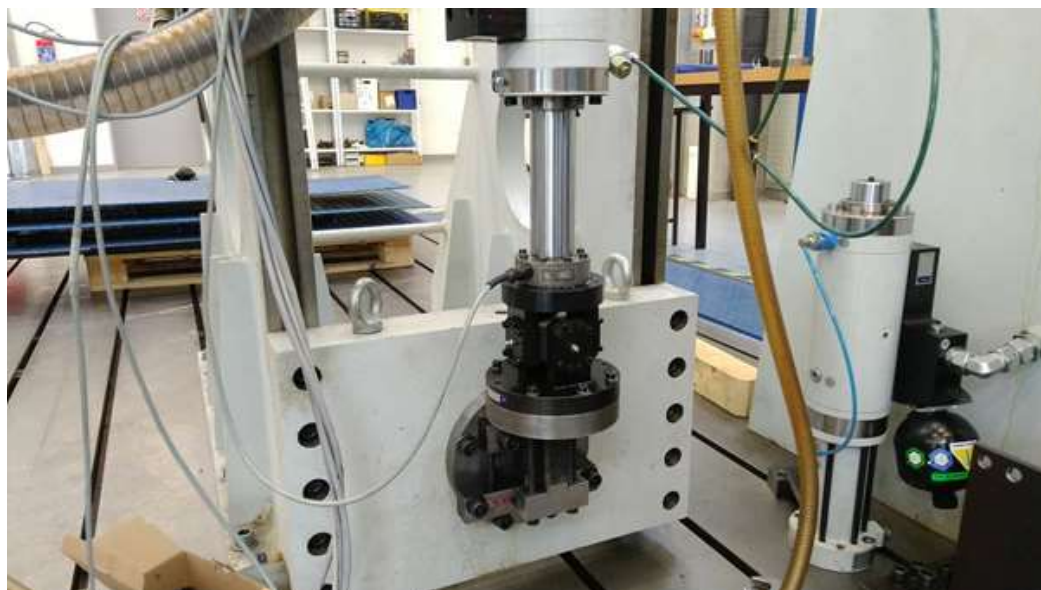
Obrázek 27: Schéma zatěžovací sestavy

Celý zatěžovací rám se skládá z příčnicku a dvou sloupů, které jsou složeny z krátké širší části a dlouhé části. Jedná se o velice robustní konstrukci širokou 4 metry a vysokou skoro 4,2 metrů, váha samotného rámu je téměř 4,5 tuny. Rám se nacházel na upínacím poli, na kterém byla umístěna i druhá část upevnění vybavená potřebnými částmi pro dostatečné upevnění zkušebního vzorku. Na obrázku 28 je 3D vizualizace upevnění vzorku při zkoušce.



Obrázek 28: Vizualizace upevnění vzorku s náběhem při testu

Zatěžovací sestava byla sestavena bezprostředně před zahájením testů. Část sestavy s upevněním je zobrazena na obrázku 29. Další fotografie z průběhu stavby jsou uvedeny v Příloze C (fotodokumentace).



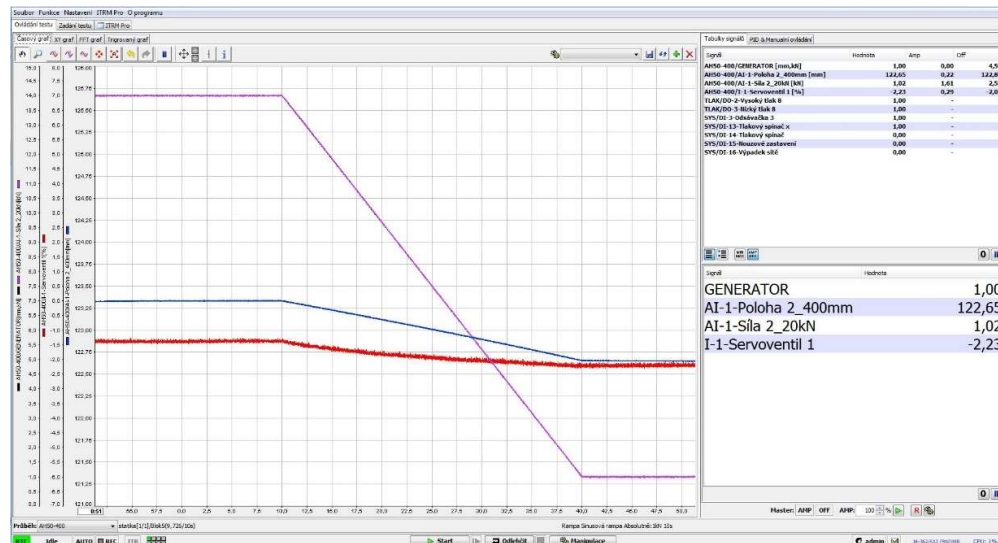
Obrázek 29: Část zatěžovací sestavy s upevněním vzorku

5.2 Statická zkouška

Během statické zkoušky zatěžovací válec postupně dosáhl během 10 s síly 1 kN, kde 10 s setrval, poté během 30 s zvyšoval sílu na danou hodnotu (působící síla shodná s následným dynamickým zatěžováním), na které setrval 20 s a následně během 30 s snížil sílu zpět na 1 kN, po dalších 10 s setrvání zkouška skončila. Nastavené hodnoty PID pro zkoušku byly $P = 0,5$, $I = 0,5$ a $D = 0,0$. Na obrázku 30 je začátek statické zkoušky a její doběh je na obrázku 31. Zaznamenávání probíhalo se vzorkovací frekvencí 500 Hz.



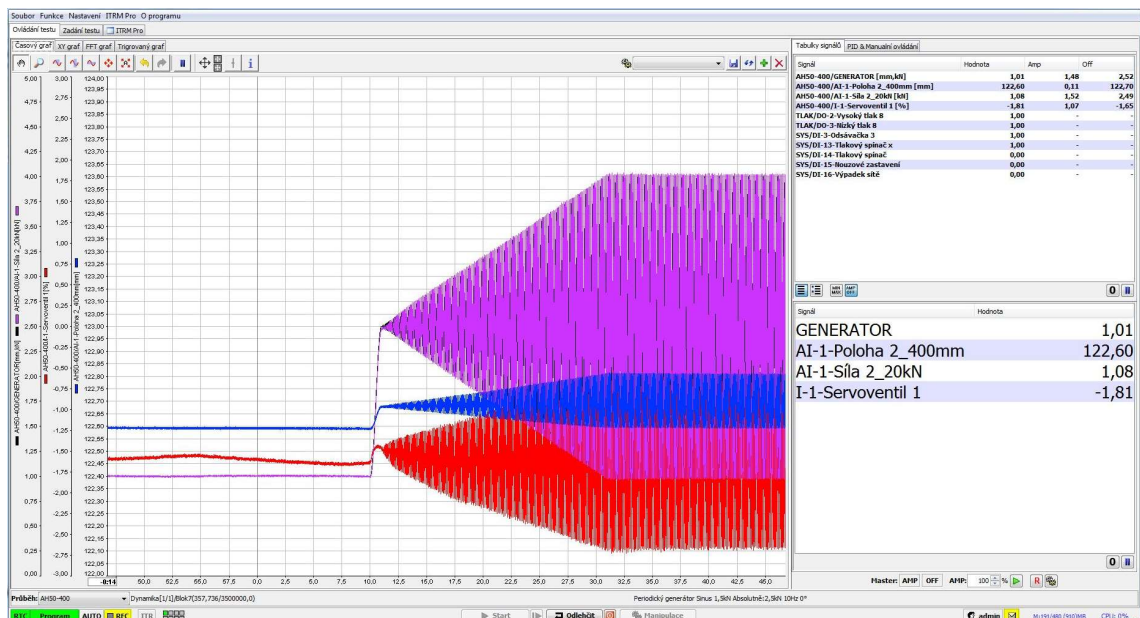
Obrázek 30: Průběh začátku statické zkoušky (fialová čára zobrazuje sílu, modrá polohu a červená odpovídá servoventilu)



Obrázek 31: Průběh konce statické zkoušky (fialová čára zobrazuje sílu, modrá polohu a červená odpovídá servoventilu)

5.3 Dynamická zkouška

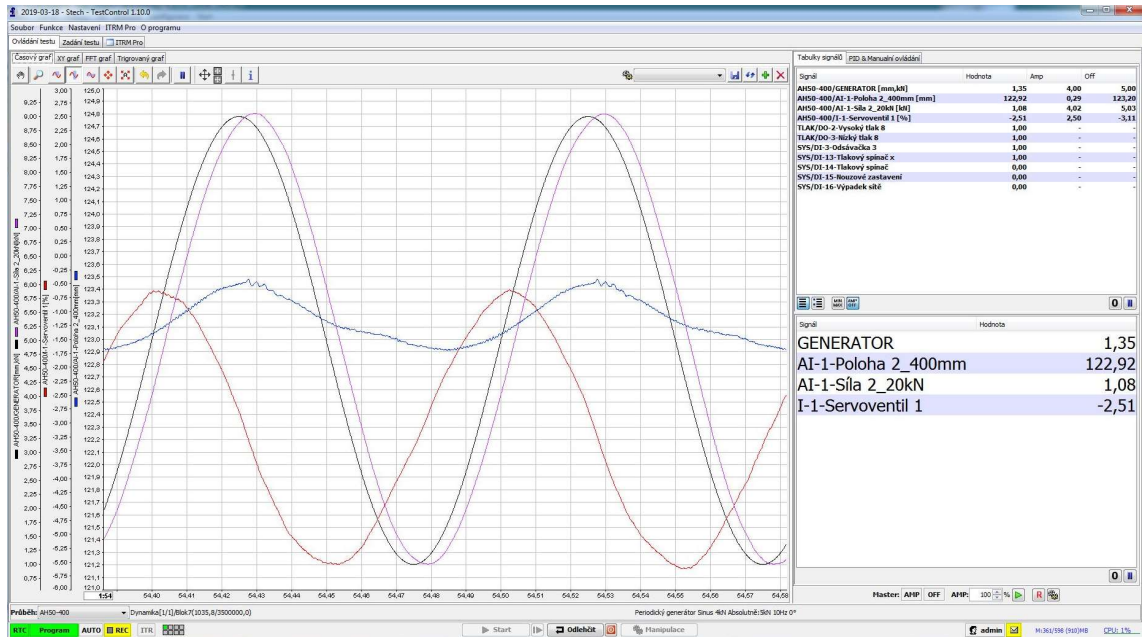
Zatěžování probíhalo na dynamickém stavu INOVA. Vzorky byly namáhány dynamicky tahovou silou vyvozenou při pohybu pístu válce. Jednalo se o pulzující sílu v tahu (sinusového tvaru), kde nejnižší síla byla vždy definována 1 kN a nejvyšší byla navrhována s ohledem na stávající průběh testů. Síla pulzovala se zatěžovací frekvencí cyklů 10 Hz. Hodnoty PID byly shodné se statickými zkouškami. Na obrázku 33 je výstup z programu při průběhu realizace dynamické zkoušky. Záznamy průběhu zkoušky v programu TestControl byly při dynamické zkoušce redukovány z důvodu velikosti. Zaznamenávání probíhalo každou minutu v délce jedné sekundy se vzorkovací frekvencí 500 Hz. Na obrázku 32 je náběh dynamické zkoušky (postupné zesilování zatěžování na požadovanou hodnotu působící síly). Na obrázku 33, 34 jsou zobrazeny dva odlišné průběhy dynamické zkoušky (vzorek č. 10, vzorek č. 15).



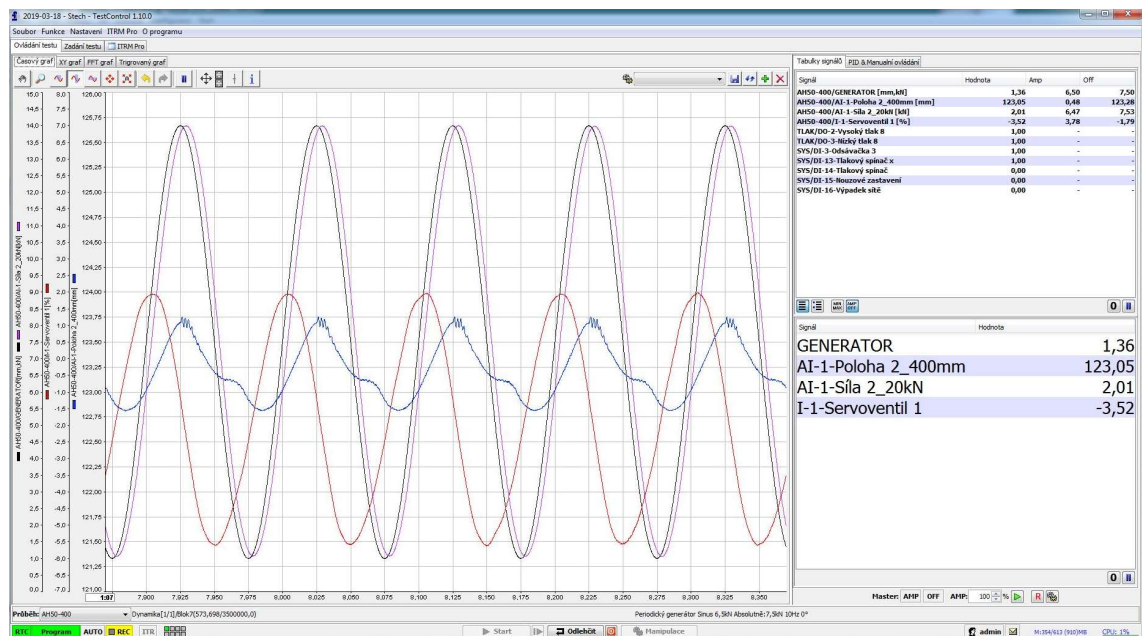
Obrázek 32: Náběh dynamické zkoušky (fialová čára zobrazuje sílu, modrá poloha a červená odpovídá servoventilu)

5.4 Průběh experimentálních testů

Během testů byly informace o každém vzorku zaznamenávány do Deníku zkoušky, který je přílohou této práce. Způsob záznamu do deníku je na obrázku 35.



Obrázek 33: Průběh dynamické zkoušky vzorku č. 10 (fialová čára zobrazuje sílu, modrá polohu a červená odpovídá servoventilu)



Obrázek 34: Průběh dynamické zkoušky vzorku č. 15 (fialová čára zobrazuje sílu, modrá polohu a červená odpovídá servoventilu)

Číslo vzorku: V05_n

| | | |
|---------------------|---|--|
| Typ konzoly: | s náběhem | |
| Den zahájení testu: | 18. 4. 2019 | |
| Zatěžovací síla: | $F_{max} = 6 \text{ kN}$ 2042 | |
| Počet cyklů: | $N = 249\ 575$ cyklů | |
| Poznámky: | vzorkovací 500 Hz statika 01 → data_0027 dynamika 01 → data_0028 PID jako u předchozích poloha offset = 123,77 poloha = 123,78 | |
| Statická zkouška: | statika 01 6 kN | |

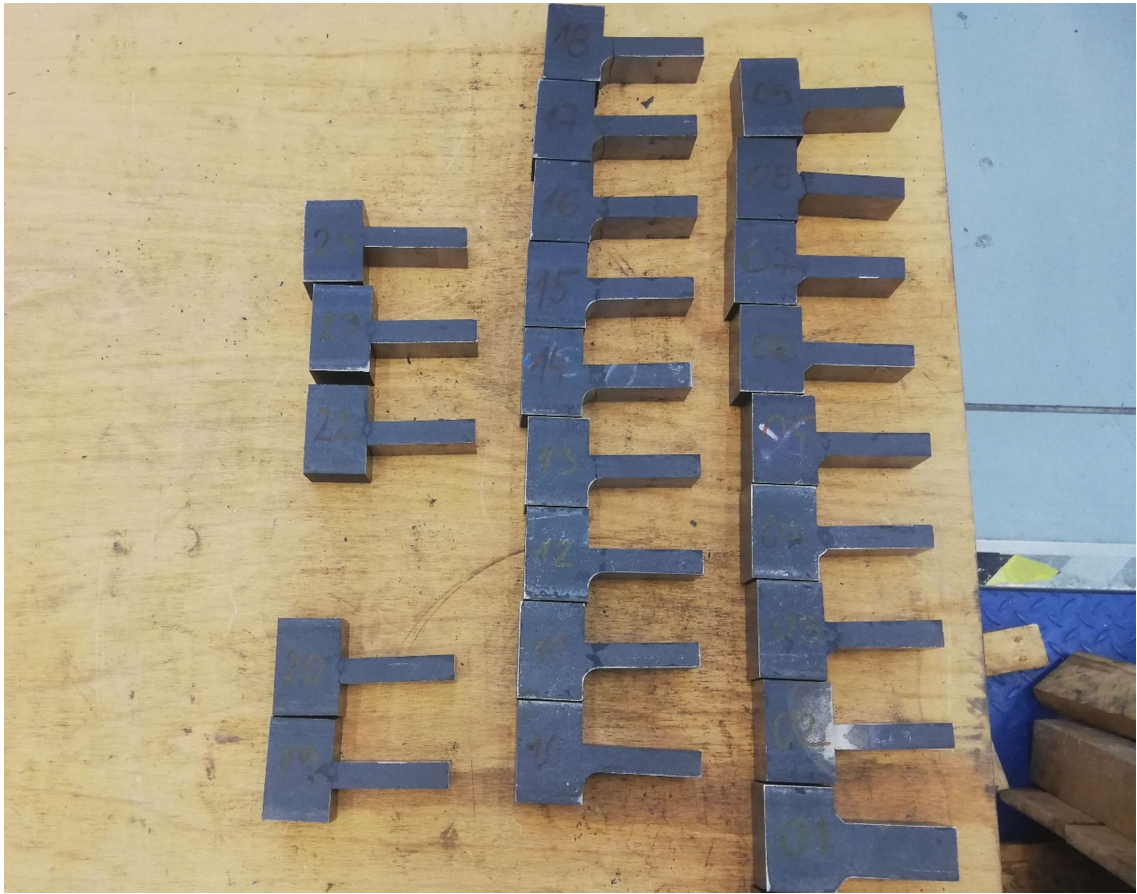
Číslo vzorku: V06_n

| | | |
|---------------------|--|--|
| Typ konzoly: | s náběhem | |
| Den zahájení testu: | 19. 4. 2019 | |
| Zatěžovací síla: | $F_{max} = 4 \text{ kN}$ | |
| Počet cyklů: | $N = 2\ 376\ 100 +$ cyklů | |
| Poznámky: | vzorkovací 500 Hz statika 01 → data_0029 dynamika 01 → data_0030 vzorek neprusknul PID manipulace: P=0,2 I=0,0 D=0,0 PID čísla: P=0,5 I=0,5 D=0,0 23. 4. 19 - pokus o zobrazení signálu, HW se odpojil → zkonštr. zastavena Soubor data_0030 je příliš velkým ukládalo se kše | |
| Statická zkouška: | statika 01 4 kN | |

Obrázek 35: Záznam v deníku zkoušky

6 Vyhodnocení

Během zkoušení na dynamickém stavu INOVA bylo podrobena zkouškám celkem 24 vzorků, z toho 8 s náběhem (včetně vzorku V01n první varianty), 9 se zaoblením a 7 s kolmým přechodem, viz. obrázek 36. Celkem bylo realizováno 21,232 milionů cyklů.

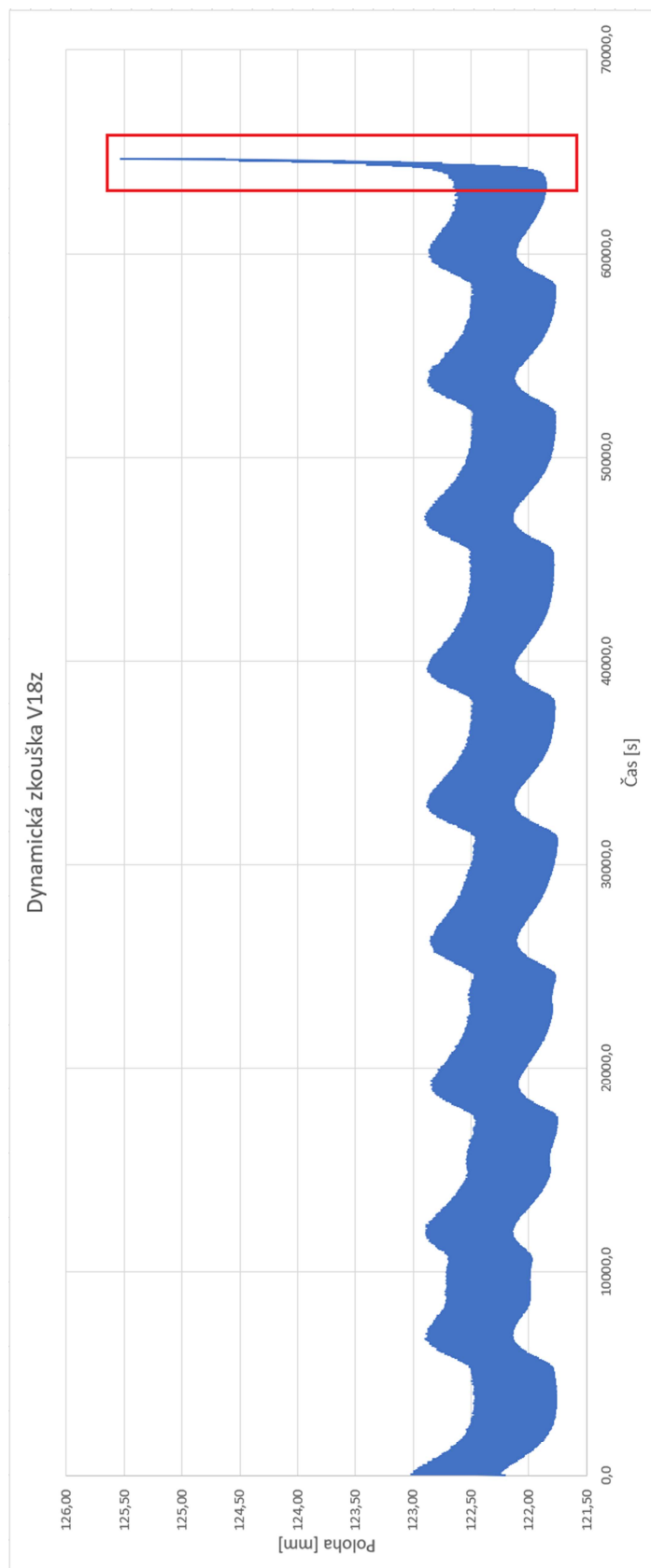


Obrázek 36: Fotografie vzorků podrobených dynamickým zkouškám

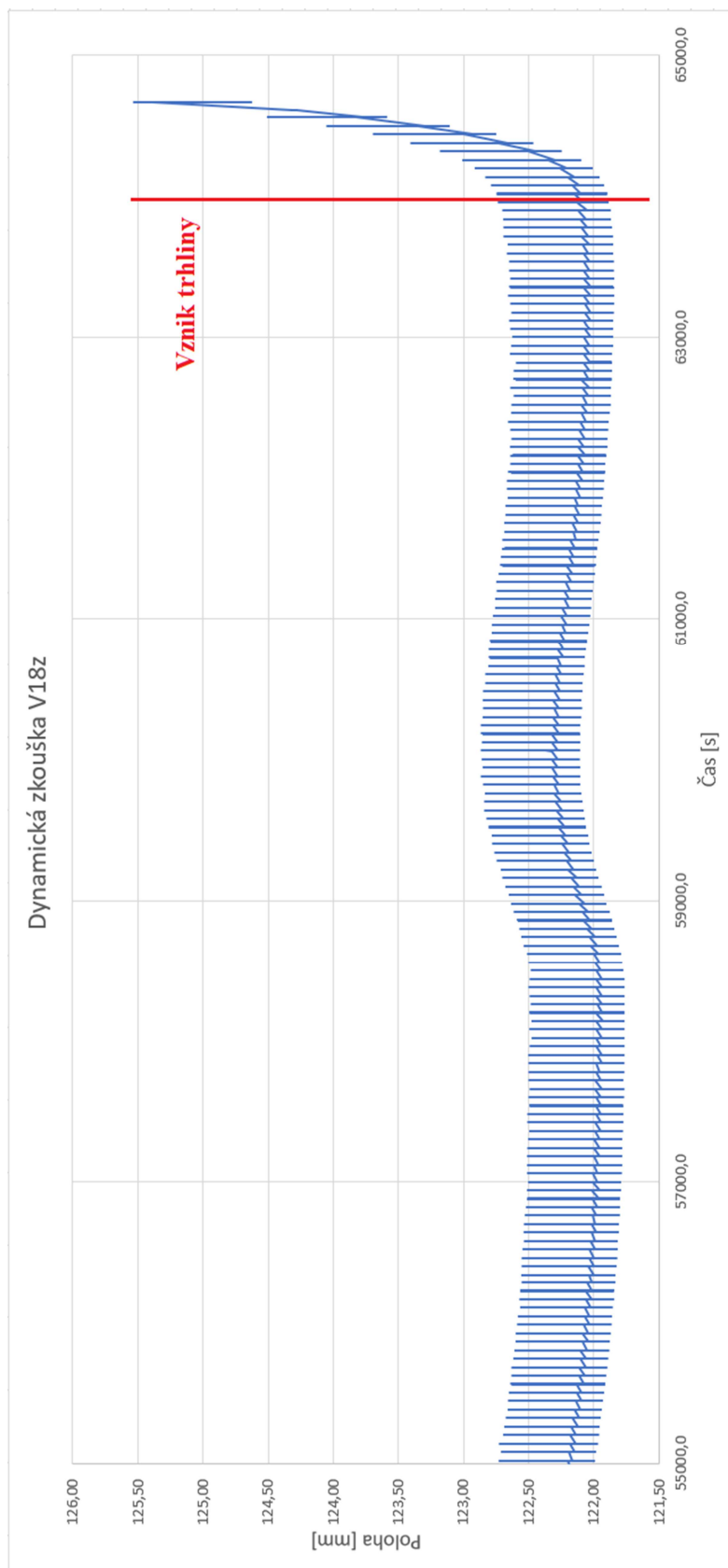
Výsledky zkoušek jsou uvedeny v Protokolu o zkoušce, který je Přílohou B této práce. V následující tabulce 4 je uveden přehled všech zkoušených vzorků s definováním počtu cyklů do vzniku trhliny při definované síle. Skutečná hodnota síly se od požadované lišila do 2,5 %. Ze zaznamenaných dat byly sestaveny grafy, ze kterých následně byly definovány počty cyklů při iniciaci trhliny. Hlavním ukazatelem vzniku trhliny je změna polohy. Na obrázku 37 je místo vzniku trhliny vyznačeno v záznamu průběhu zkoušky. Na obrázku 38 je toto místo zobrazeno detailněji.

| Vzorek | Typ vzorku | max. síla válce při zatěžování [kN] | min. síla válce při zatěžování [kN] | N cyklů | Počet cyklů při zastavení zkoušky |
|--------|--------------|---|---|----------|---|
| V01n | s náběhem | 15 | 1 | 3800000+ | 3800000+ |
| V02k | kolmý | 15 | 1 | 3597 | 3597 |
| V03n | s náběhem | 12 | 1 | 17700 | 19270 |
| V04n | s náběhem | 9 | 1 | 28230 | 30295 |
| V05n | s náběhem | 6 | 1 | 346800 | 349595 |
| V06n | s náběhem | 4 | 1 | 3376100+ | 3376100+ |
| V07n | s náběhem | 7 | 1 | 94200 | 96419 |
| V08n | s náběhem | 5,5 | 1 | 358270 | 360500 |
| V09n | s náběhem | 5 | 1 | 1259400 | 1264000 |
| V10z | se zaoblením | 9 | 1 | 5891000+ | 5891000+ |
| V11z | se zaoblením | 15 | 1 | 82800 | 89465 |
| V12z | se zaoblením | 13 | 1 | 163770 | 145923 |
| V13z | se zaoblením | 12 | 1 | 492900 | 498066 |
| V14z | se zaoblením | 11 | 1 | 589810 | 591022 |
| V15z | se zaoblením | 14 | 1 | 120000 | 123826 |
| V16z | se zaoblením | 13,5 | 1 | 76200 | 78989 |
| V17z | se zaoblením | 12,5 | 1 | 87120 | 89927 |
| V18z | se zaoblením | 10,5 | 1 | 643200 | 646682 |
| V19k | kolmý | 6 | 1 | 156000 | 159508 |
| V20k | kolmý | 4 | 1 | 755640 | 767231 |
| V21k | kolmý | 4,5 | 1 | 2076000+ | 2076600+ |
| V22k | kolmý | 5,5 | 1 | 242400 | 248969 |
| V23k | kolmý | 6,5 | 1 | 116400 | 121378 |
| V24k | kolmý | 5 | 1 | 374400 | 382948 |

Tabulka 4: Tabulka s výsledky zkoušek



Obrázek 37: Průběh dynamické zkoušky s vyznačeným místem vzniku trhliny



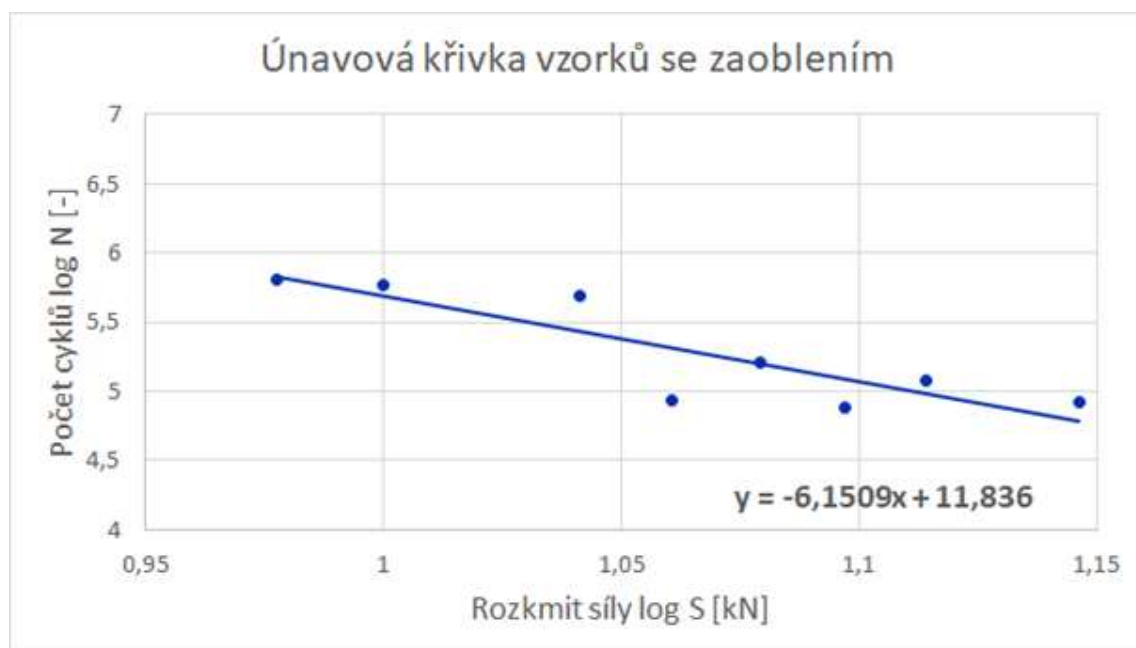
Obrázek 38: Detail průběhu dynamické zkoušky s vyznačeným místem vzniku trhliny

Z výsledků uvedených v tabulce 4 byly následně konstruovány únavové křivky. Při testech se vyskytly i vzorky, které zatížení odolaly (vzorky č.: 01, 06, 10, 21). Takové vzorky byly po několika milionech cyklů označeny jako odolné vůči danému zatížení (testování bylo ukončeno z důvodu vysoké časové náročnosti dalších testů) a jejich zkoušení bylo zastaveno. Vzhledem k tomu, že přesný počet cyklů do lomu nebyl stanoven, neznáme přesnou polohu bodu na případné únavové křivce. Z toho důvodu byly pro vzorky stejné konstrukční varianty sestrojeny dvě únavové křivky, kdy na jedné byly pouze vzorky se známou životností a na druhé byly všechny vzorky (vzorky u kterých nedošlo k únavovému porušení, byly uvažovány odhadem). Skupinou bodů byla proložena spojnice. Následně byly vyhodnoceny materiálové konstanty únavové křivky definované vztahem:

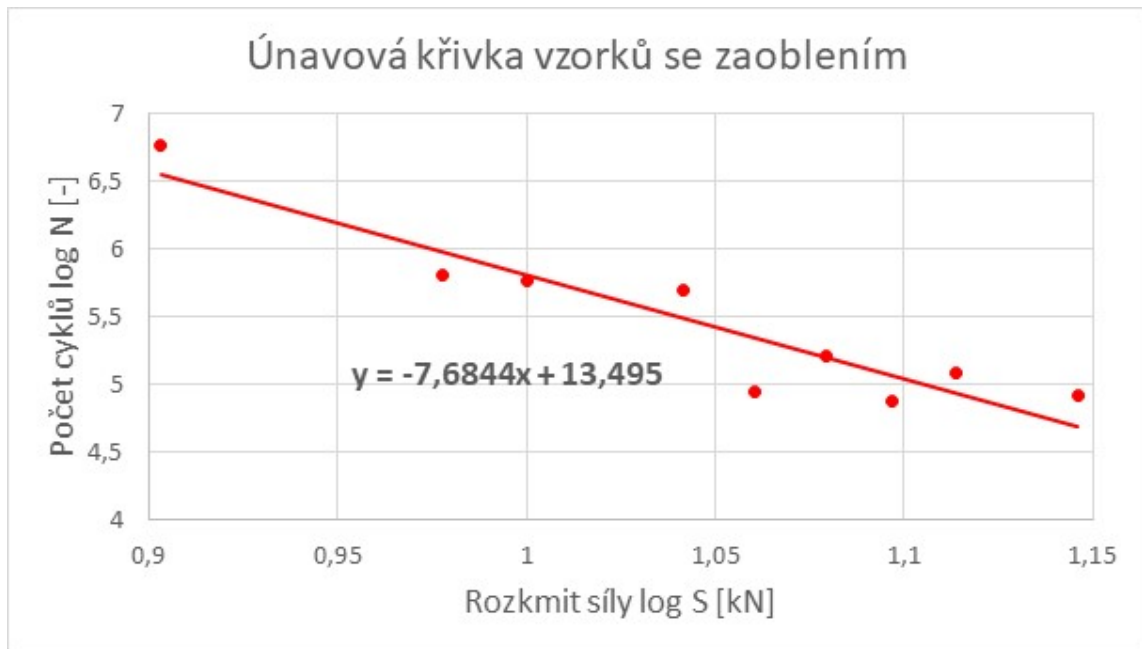
$$\log N = \log C - m \cdot \log \sigma_R. \quad (7)$$

6.1 Definování únavové křivky pro vzorky se zaoblením

V grafech 2 a 3 jsou uvedeny únavové křivky pro vzorky se zaoblením. Vzhledem k realizovaným matematickým úpravám jsou grafy zobrazeny s transponovanými osami (vč. zobrazené rovnice regresní křivky odpovídající rovnici č. 7). První je bez vzorku č. 10, pro který není znám přesný počet cyklů do lomu.



Graf 2: Únavová křivka vzorků se zaoblením bez vzorku č. 10



Graf 3: Únavová křivka vzorků se zaoblením včetně vzorku č. 10

Materiálové konstanty pro únavovou křivku bez vzorků, u kterých nedošlo k porušení:

$$m_{1z} = 6,1509 \quad \log C_{1z} = 11,836$$

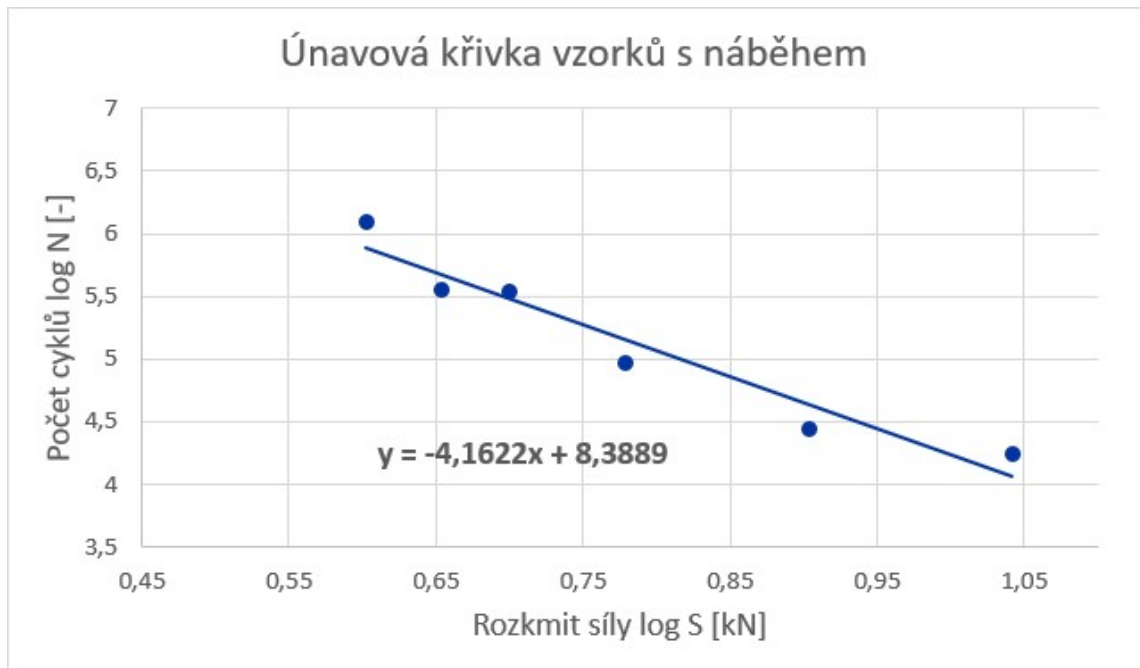
Materiálové konstanty pro únavovou křivku včetně vzorků, u kterých nedošlo k porušení:

$$m_{2z} = 7,6844 \quad \log C_{2z} = 13,495$$

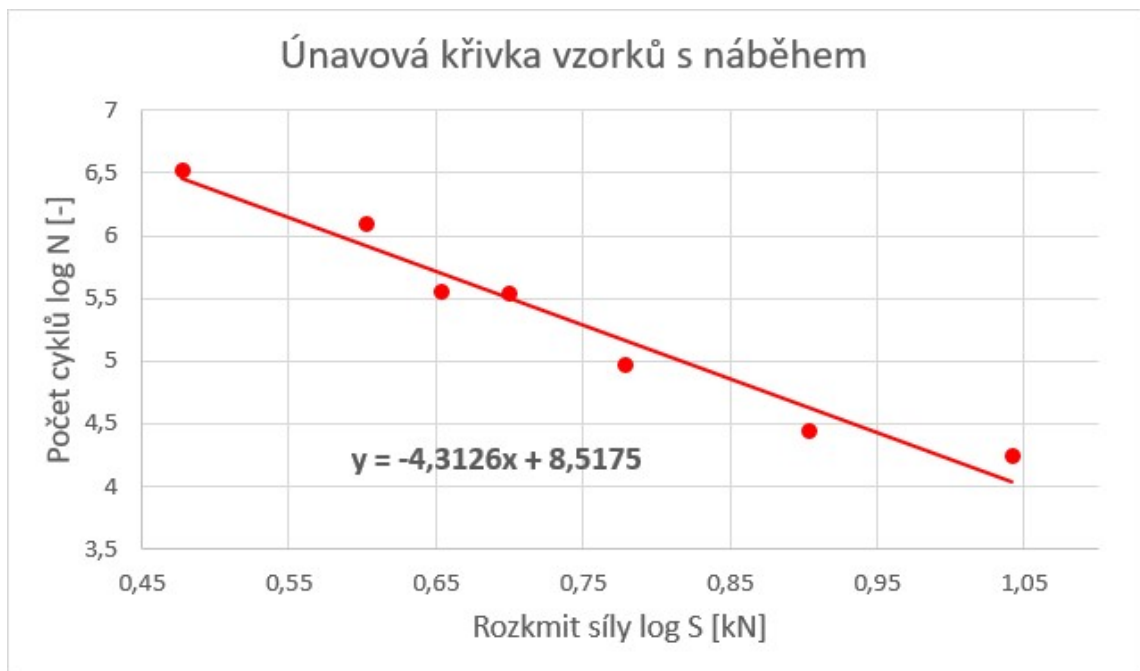
Dle normy ČSN EN 1993-1-9 je hodnota sklonu únavové křivky $m = 3$. Získané hodnoty s uvedenou normovou hodnotou nekorespondují, byť zahrnují údaje odpovídající cyklům nižším než 5 mil. Uvedené hodnoty sklonu odpovídají dosaženým výsledkům uvedeným v [8].

6.2 Definování únavové křivky pro vzorky s náběhem

V grafech 4 a 5 jsou uvedeny únavové křivky pro vzorky s náběhem. Vzhledem k realizovaným matematickým úpravám jsou grafy zobrazeny s transponovanými osami (vč. zobrazené rovnice regresní křivky odpovídající výše uvedené rovnici). První je bez vzorku č. 6, pro který není znám přesný počet cyklů do lomu.



Graf 4: Únavová křivka vzorků s náběhem bez vzorku č. 6



Graf 5: Únavová křivka vzorků s náběhem včetně vzorku č. 6

Materiálové konstanty pro únavovou křivku bez vzorků, u kterých nedošlo k porušení:

$$m_{1n} = 4,1622 \quad \log C_{1n} = 8,3889$$

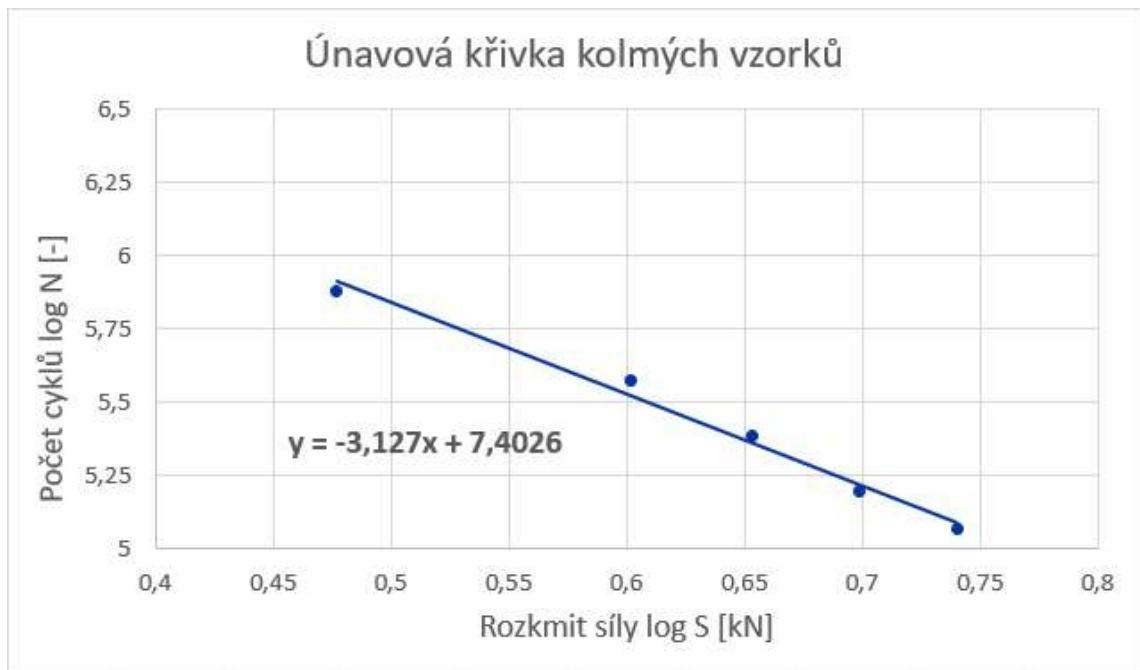
Materiálové konstanty pro únavovou křivku včetně vzorků, u kterých nedošlo k porušení:

$$m_{2n} = 4,3126 \quad \log C_{2n} = 8,5175$$

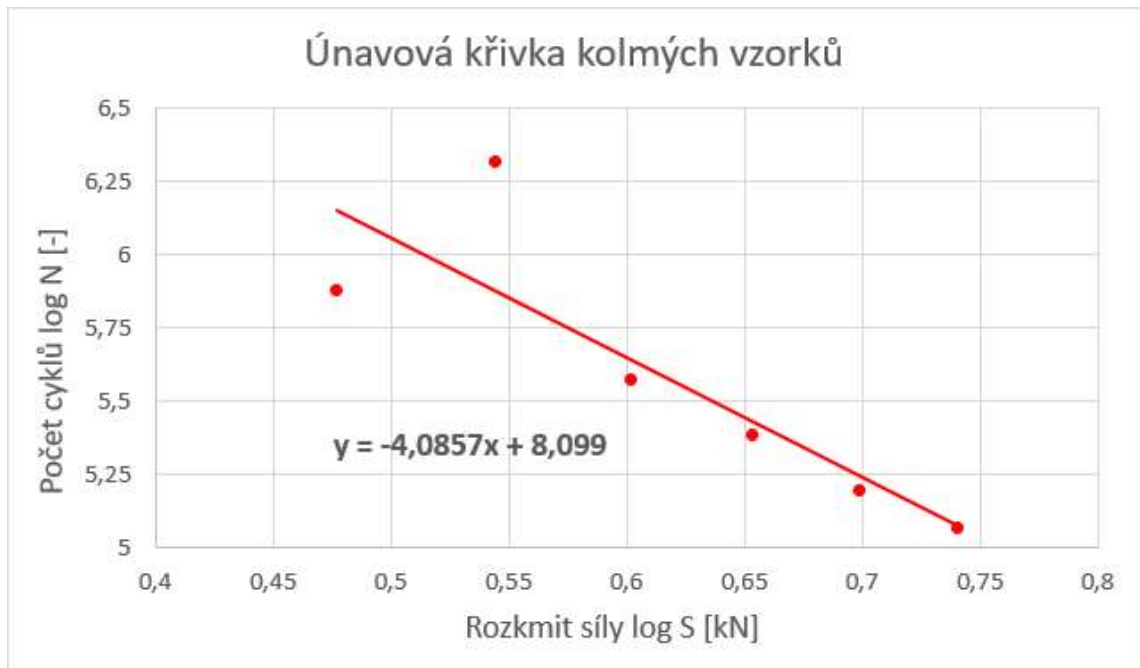
Dle normy ČSN EN 1993-1-9 je hodnota sklonu únavové křivky $m = 3$. Získané hodnoty s uvedenou normovou hodnotou nekorespondují, byť zahrnují údaje odpovídající cyklům nižším než 5 mil.

6.3 Definování únavové křivky pro kolmé vzorky

V grafech 6 a 7 jsou uvedeny únavové křivky pro vzorky se zaoblením. Vzhledem k realizovaným matematickým úpravám jsou grafy zobrazeny s transponovanými osami (vč. zobrazené rovnice regresní křivky odpovídající rovnici č. 7). První je bez vzorku č. 21, pro který není znám přesný počet cyklů do lomu.



Graf 6: Únavová křivka kolmých vzorků bez vzorku č. 21



Graf 7: Únavová křivka kolmých vzorků včetně vzorku č. 21

Materiálové konstanty pro únavovou křivku bez vzorků, u kterých nedošlo k porušení:

$$m_{1k} = 3,127 \quad \log C_{1k} = 7,4026$$

Materiálové konstanty pro únavovou křivku včetně vzorků, u kterých nedošlo k porušení:

$$m_{2k} = 4,0857 \quad \log C_{2k} = 8,099$$

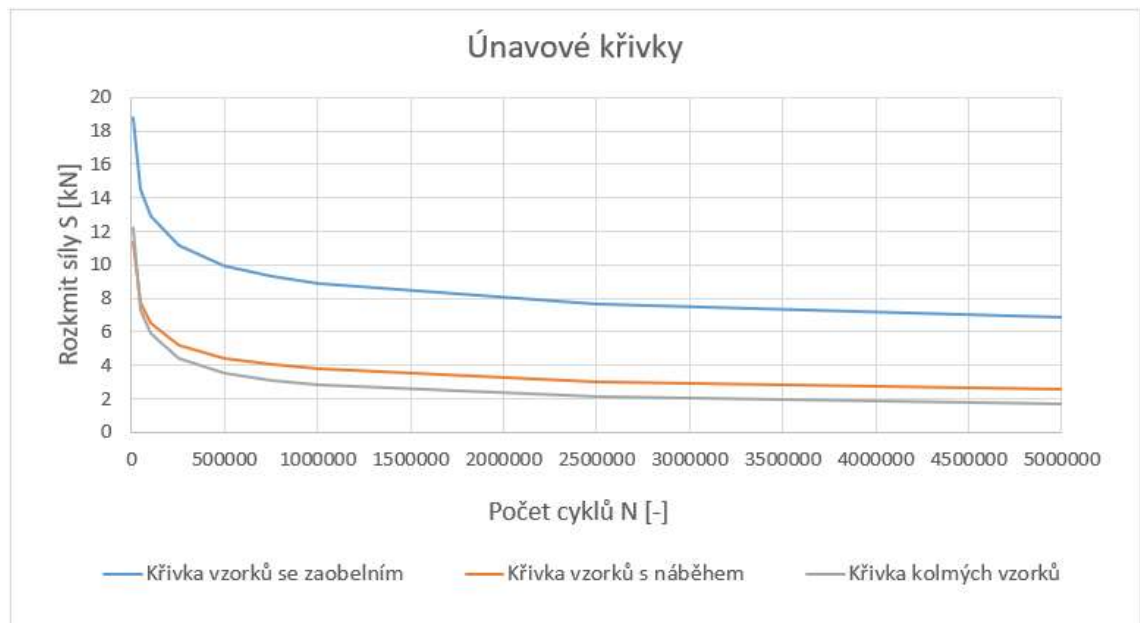
Dle normy ČSN EN 1993-1-9 je hodnota sklonu únavové křivky $m = 3$. Získané hodnoty se uvedené normové hodnotě blíží, zejména hodnota z křivky bez vzorku č. 21.

6.4 Porovnání únavových křivek pro různé konstrukční uspořádání

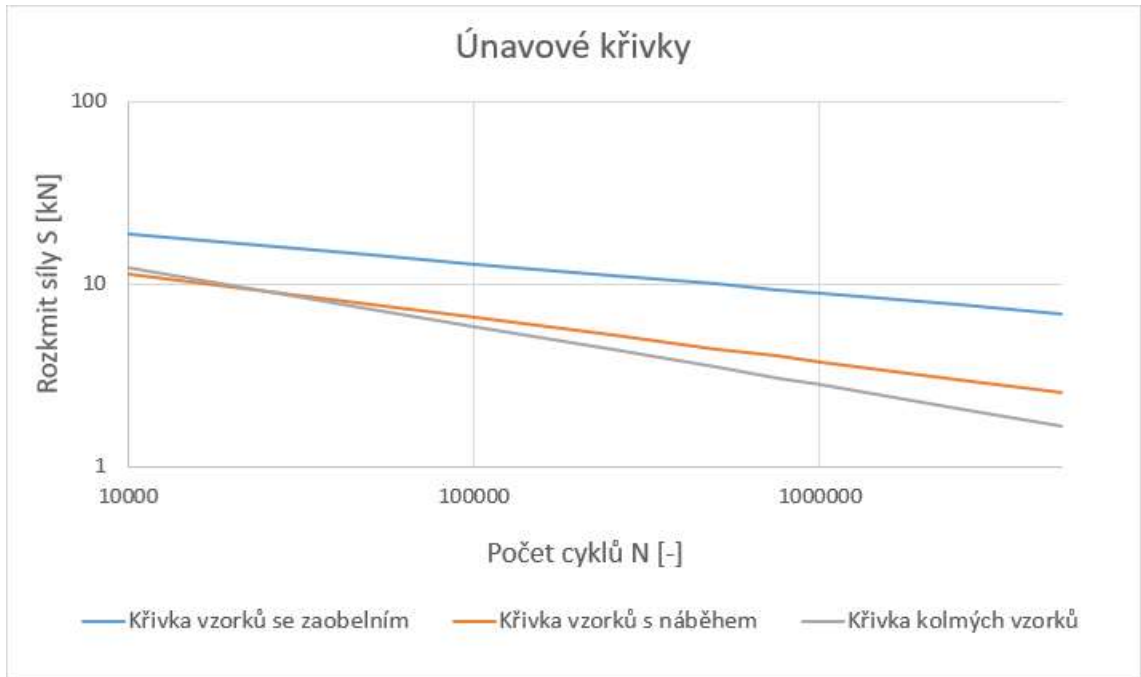
Porovnáním jednotlivých konstrukčních řešení mezi sebou lze zjistit, která konstrukční varianta vykazuje nejvyšší únavovou odolnost, viz tabulka 5. Uvedené výsledky lze demonstrovat graficky, viz. grafy 8 až 11, kde jsou únavové křivky vykresleny v tradičním uspořádání os. Grafy 9 a 11 mají osy v logaritmickém měřítku, aby došlo k napřímení křivek.

| Konzoly | Materiálové konstanty pro únavové křivky bez vzorků č.: 6, 10, 21 | Materiálové konstanty pro únavové křivky včetně vzorků č.: 6, 10, 21 |
|--------------|---|--|
| Kolmé | $m_{1k} = 3,127 \quad \log C_{1k} = 7,4026$ | $m_{2k} = 4,0857 \quad \log C_{2k} = 8,099$ |
| S náběhem | $m_{1n} = 4,1622 \quad \log C_{1n} = 8,3889$ | $m_{2n} = 4,3126 \quad \log C_{2n} = 8,5175$ |
| Se zaoblením | $m_{1z} = 6,1509 \quad \log C_{1z} = 11,836$ | $m_{2z} = 7,6844 \quad \log C_{2z} = 13,495$ |

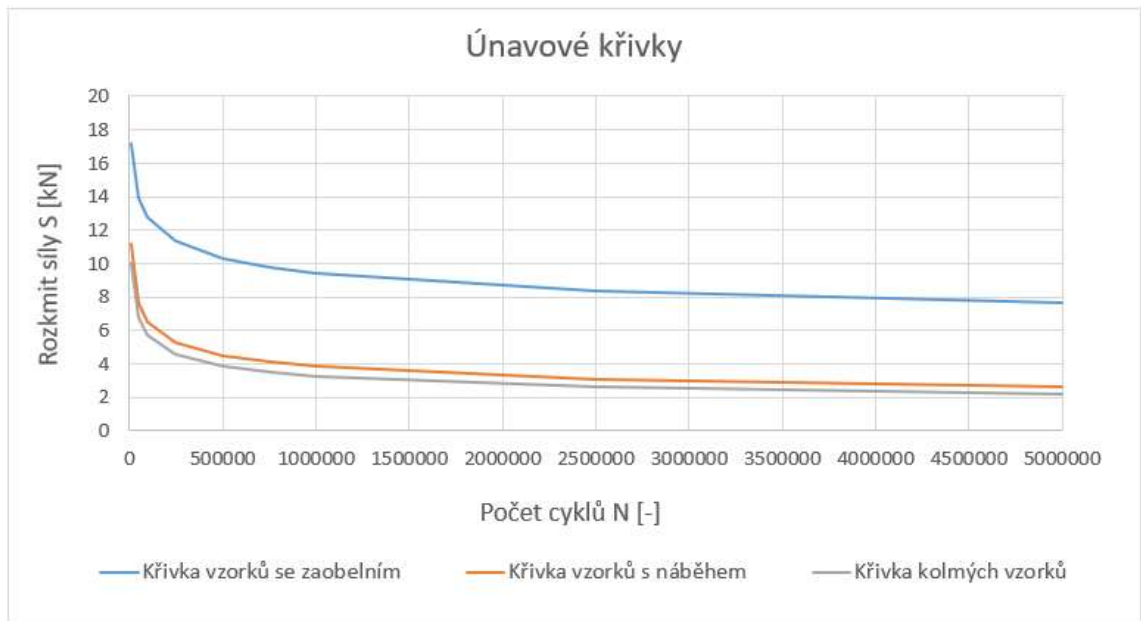
Tabulka 5: Tabulka s výslednými konstantami pro únavové křivky



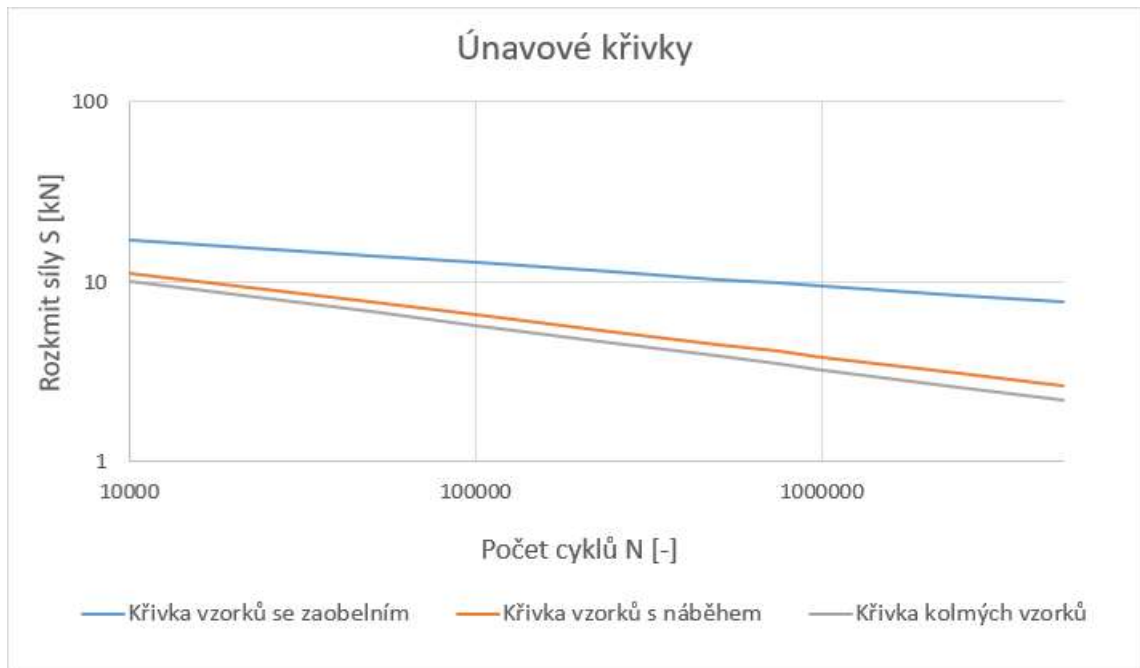
Graf 8: Únavové křivky bez vzorků, u kterých nedošlo k porušení



Graf 9: Únavové křivky bez vzorků, u kterých nedošlo k porušení



Graf 10: Únavové křivky včetně vzorků, u kterých nedošlo k porušení



Graf 11: Únavové křivky včetně vzorků, u kterých nedošlo k porušení

Vyhodnocením se potvrdilo, že z hlediska únavové životnosti je nejdolnější varianta se zaoblením, jak již vyplývalo z teorie a provedených výpočtů. Výrazně nižší únavová pevnost byla vyhodnocena u konstrukčního uspořádání s výraznými vruby (s náběhem a s kolmým přechodem). Vzorek s kolmým přechodem vykazuje nejnižší únavovou pevnost. Porovnáním všech tří variant lze definovat rozdíly ve sklonu únavových křivek i v konstantě. Procentuální rozdíly jsou uvedeny v následujících tabulkách 6 a 7 (vztažná hodnota byla uvažována křivka se zaoblením).

| Konzoly | Materiálové konstanty pro únavové křivky bez vzorků č.: 6, 10, 21 | | | |
|--------------|---|---------|------------------------|---------|
| | m | % | log C | % |
| Kolmé | $m_{1k} = 3,127$ | 50,84 % | $\log C_{1k} = 7,4026$ | 62,54 % |
| S náběhem | $m_{1n} = 4,1622$ | 67,67 % | $\log C_{1n} = 8,3889$ | 70,88 % |
| Se zaoblením | $m_{1z} = 6,1509$ | 100 % | $\log C_{1z} = 11,836$ | 100 % |

Tabulka 6: Procentuální rozdíly konstant jednotlivých křivek

| Konzoly | Materiálové konstanty pro únavové křivky včetně vzorků č.: 6, 10, 21 | | | |
|--------------|--|----------------|------------------------------------|----------------|
| | m | % | log C | % |
| Kolmé | m_{2k} = 4,0857 | 53,17 % | log C_{2k} = 8,099 | 60,01 % |
| S náběhem | m_{2n} = 4,3126 | 56,12 % | Log C_{2n} = 8,5175 | 63,12 % |
| Se zaoblením | m_{2z} = 7,6844 | 100 % | log C_{2z} = 13,495 | 100 % |

Tabulka 7: Procentuální rozdíly konstant jednotlivých křivek

Dopady rozdílů únavových charakteristik jednotlivých detailů lze charakterizovat definováním teoretických hodnot počtu cyklů na daných rozkmitech zatížení, viz. tabulky 8 a 9. Hodnoty v tabulce 8 jsou stanoveny z rovnice pro únavovou křivku bez vzorků, u kterých nedošlo k porušení.

| Rozkmit zatížení | Vzorek | | | | | |
|------------------|---------|--------|-----------|--------|--------------|-------|
| | Kolmý | | S náběhem | | Se zaoblením | |
| | N cyklů | % | N cyklů | % | N cyklů | % |
| 5 kN | 164 786 | 0,48 % | 301 750 | 0,88 % | 34 411 642 | 100 % |
| 5,5 kN | 122 317 | 0,64 % | 202 938 | 1,06 % | 19 147 106 | 100 % |
| 6 kN | 93 180 | 0,83 % | 141 279 | 1,26 % | 11 211 649 | 100 % |
| 6,5 kN | 72 547 | 1,06 % | 101 249 | 1,48 % | 6 852 535 | 100 % |
| 7 kN | 57 541 | 1,32 % | 74 376 | 1,71 % | 4 343 966 | 100 % |
| 7,5 kN | 46 375 | 1,63 % | 55 811 | 1,96 % | 2 841 749 | 100 % |
| 8 kN | 37 900 | 1,98 % | 42 664 | 2,23 % | 1 910 662 | 100 % |
| 8,5 kN | 31 355 | 2,38 % | 33 149 | 2,52 % | 1 315 943 | 100 % |
| 9 kN | 26 223 | 2,83 % | 26 131 | 2,82 % | 925 869 | 100 % |
| 9,5 kN | 22 144 | 3,34 % | 20 865 | 3,14 % | 663 926 | 100 % |
| 10 kN | 18 863 | 3,90 % | 16 854 | 3,48 % | 484 284 | 100 % |

Tabulka 8: Procentuální porovnání teoretických hodnot počtu cyklů na daných rozkmitech zatížení

Při zatížení 5 kN je pokles mezi variantou se zaoblením a variantou kolmou 208násobný, mezi variantou se zaoblením a variantou s náběhem 114násobný. Při zatížení 10 kN je pokles mezi variantou se zaoblením a variantou kolmou 25násobný, mezi variantou se zaoblením a variantou s náběhem 28násobný. Hodnoty v tabulce 9 jsou stanoveny z rovnice pro únavovou křivku včetně vzorků, u kterých nedošlo k porušení.

| Rozkmit zatížení | Vzorek | | | | | |
|------------------|---------|--------|-----------|--------|--------------|-------|
| | Kolmý | | S náběhem | | Se zaoblením | |
| | N cyklů | % | N cyklů | % | N cyklů | % |
| 5 kN | 175 073 | 0,13 % | 318 509 | 0,24 % | 132 994 873 | 100 % |
| 5,5 kN | 118 604 | 0,19 % | 211 160 | 0,33 % | 63 937 691 | 100 % |
| 6 kN | 83 120 | 0,25 % | 145 092 | 0,44 % | 32 762 311 | 100 % |
| 6,5 kN | 59 935 | 0,34 % | 102 738 | 0,58 % | 17 711 225 | 100 % |
| 7 kN | 44 277 | 0,44 % | 74 633 | 0,74 % | 10 021 405 | 100 % |
| 7,5 kN | 33 401 | 0,57 % | 55 426 | 0,94 % | 5 897 653 | 100 % |
| 8 kN | 25 659 | 0,71 % | 41 960 | 1,17 % | 3 591 661 | 100 % |
| 8,5 kN | 20 030 | 0,89 % | 32 306 | 1,43 % | 2 254 100 | 100 % |
| 9 kN | 15 858 | 1,09 % | 25 248 | 1,74 % | 1 452 844 | 100 % |
| 9,5 kN | 12 715 | 1,33 % | 19 997 | 2,09 % | 958 916 | 100 % |
| 10 kN | 10 311 | 1,59 % | 16 029 | 2,48 % | 646 547 | 100 % |

Tabulka 9: Procentuální porovnání teoretických hodnot počtu cyklů na daných rozkmitcích zatížení

Při zatížení 5 kN je pokles mezi variantou se zaoblením a variantou kolmou 760násobný, mezi variantou se zaoblením a variantou s náběhem 417násobný. Při zatížení 10 kN je pokles mezi variantou se zaoblením a variantou kolmou 62násobný, mezi variantou se zaoblením a variantou s náběhem 40násobný. Z předchozího vyplývá, že varianta se zaoblením je mnohonásobně odolnější vůči únavovému namáhání než zbylé dvě varianty.

ZÁVĚR

Cíle bakalářské práce byly splněny. V teoretické části byla popsána únavová životnost, stručně i její historie a stádia únavového procesu. Dále únavové křivky a jejich sestrojení. Popsán byl také návrh jednotlivých zkušebních vzorků, které byly zhotoveny ve třech variantách, i s jejich dodatečnou úpravou. A také způsob jejich zkoušení na sestaveném dynamickém stavu INOVA v dynamické laboratoři Výukového a výzkumného centra VVCD, Dopravní fakulty Jana Pernera, Univerzity Pardubice. Materiál použitý na výrobu vzorků byla ocel S253JR.

V experimentální části byly jednotlivé vzorky podrobovány dynamickému zatěžování do vzniku únavové trhliny. Pro některé vzorky byly zvoleny malé síly a nedošlo tak k jejich porušení. Všechny vyrobené vzorky nebyly z důvodu nedostatku času testům podrobeny. Během zkoušek v laboratoři byl veden deník zkoušky. Získaná data při jednotlivých zkouškách byla vyhodnocena v protokolu o zkoušce. Na základě experimentálně získaných údajů byly sestrojeny únavové křivky pro jednotlivá konstrukční řešení. Křivky byly sestrojeny pro kolmou variantu, variantu s náběhem, variantu se zaoblením. Hodnoty sklonů křivek m a konstanty $\log C$ jsou (varianta s indexem 1 značí užití pouze vzorků s lomem, varianta s indexem 2 značí užití všech vzorků):

$$m_{1k} = 3,127 \quad \log C_{1k} = 7,4026 \quad m_{2k} = 4,0857 \quad \log C_{2k} = 8,099$$

$$m_{1n} = 4,1622 \quad \log C_{1n} = 8,3889 \quad m_{2n} = 4,3126 \quad \log C_{2n} = 8,5175$$

$$m_{1z} = 6,1509 \quad \log C_{1z} = 11,836 \quad m_{2z} = 7,6844 \quad \log C_{2z} = 13,495$$

Všechny typy vzorků byly porovnány z hlediska únavové životnosti a byl potvrzen odhad na základě teorie a výsledků z výpočtů v programu SCIA Engineer. Potvrdilo se, že varianta se zaoblením je nejodolnější vůči dynamickému namáhání, protože nemá vrub, u kterého by se koncentrovalo napětí, jako ve zbylých dvou případech. Nejmenší životnosti dosahovaly vzorky s kolmým přechodem.

Zajímavým výsledkem je, že vzorky s kolmým uspořádáním se nejvíce blíží normové hodnotě stanovení sklonu únavové křivky $m=3$, dle EN 1993-1-9 [6], naopak vzorky se zaoblením se této hodnotě nejvíce vzdalují a více korespondují s testy komplikovaných strukturálních celků, uvedených např. v [8]. Vzorky s náběhem mají sklon únavové křivky mezi.

Pokles únavové životnosti s ohledem na působící sílu je u kolmých vzorků a vzorků s náběhem oproti vzorkům se zaoblením mnohonásobný. Následující hodnoty platí pro vzorky, které dosáhly lomu. Při zatížení 5 kN je pokles mezi variantou se zaoblením a variantou kolmou 208násobný, mezi variantou se zaoblením a variantou s náběhem 114násobný. Při zatížení 10 kN je pokles mezi variantou se zaoblením a variantou kolmou 25násobný, mezi variantou se zaoblením a variantou s náběhem 28násobný.

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] RŮŽIČKA, Milan. *Dynamická pevnost a životnost*. Praha: České vysoké učení technické, 1987. ISBN 80-01-00886-X.
- [2] HÖSCHL, Cyril. *Únava materiálu při periodickém zatěžování: sborník*. Praha: Dům techniky ČSVTS, 1981. Stavba strojů.
- [3] RŮŽIČKA, Milan. *Únavové křivky a únavová bezpečnost: Přednášky část 2* [online]. In: . s. 40 [cit. 2019-05-30]. Dostupné z: http://mechanika.fs.cvut.cz/content/files/DPZ_2017_predn_02_R%C5%AF.pdf
- [4] RŮŽIČKA, Milan. *Základy únavové pevnosti: Přednášky část 1* [online]. In: . s. 42 [cit. 2019-05-30]. Dostupné z: http://mechanika.fs.cvut.cz/content/files/DPZ/2017/DPZ_2017_predn_01_Rů.pdf
- [5] CULEK, Bohumil. *Hodnocení únavové životnosti ocelových konstrukcí při složitém namáhání*. Pardubice, 2002. Disertační práce. Univerzita Pardubice.
- [6] *EN 1993-1-9: Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-9: Fatigue*. Brussels: CEN, 2005.
- [7] NOVA PRAHA. *Hydromotory s hydrostatickými ložisky AH: návod*. Praha, 2006, 13 s.
- [8] CULEK, Bohumil ml., Bohumil CULEK a Lukáš BERAN. *Fatigue critical detail of the bridge with member deck – fatigue curve determination*. UNIVERSITY OF PARDUBICE, 2008.
- [9] BÍLÝ, Matěj, S. V. IVANOVA a V. F. TERENCEV. *Pevnost' sůčastí a materiálův pri premennom zatážení*. Bratislava: Veda, 1976.
- [10] CULEK, Bohumil. *Kovové Konstrukce: Přednáška č. 10 - Únava*. Univerzita Pardubice, 2018.

PŘÍLOHY

Příloha A – Deník Zkoušky

Příloha B – Protokol o zkoušce

Příloha C – Fotodokumentace

Příloha A

Deník zkoušky



UNIVERZITA PARDUBICE
Dopravní fakulta Jana Pernera
Studentská 95, 532 10 Pardubice

DENÍK ZKOUŠKY

Název zkoušky: **Dynamické testy ocelových vzorků**

Předmět zkoušky: **Ocelové vzorky konzol s různými přechody do vetknutí**

Místo a datum zkoušky: **Pardubice, duben - květen 2019**

Číslo smlouvy: **Realizováno v rámci Bc. práce**

Název a adresa objednatele: **Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta Jana Pernera,
Studentská 95, 53210 Pardubice**

Vedoucí zkoušky: **Václav Štech**

Vedoucí práce: **doc. Ing. Bohumil CULEK, Ph.D.**

Datum vystavení deníku: **2019**



Obsah:

1. Identifikace zkoušky
2. Měřené veličiny
3. Seznam použitých přístrojů
4. Cíl zkoušky
5. Předmět zkoušky
6. Zkušební zatížení



1. Identifikace zkoušky

| | |
|-------------------------------|---|
| Číslo smlouvy | Realizováno v rámci Bc. práce |
| Identifikace měřeného vzorku | Ocelová konzola se třemi druhy konstrukčního detailu |
| Stručný popis měřeného vzorku | Jedná se o ocelovou konzolu vyrobenou z oceli S235JR, která byla zhotovena ve třech variantách. Jednotlivé varianty se liší geometrií konstrukčního detailu (S hranou, s náběhem a se zaoblením). |
| Vedoucí zkoušky | Václav Štech |
| Vedoucí práce | doc. Ing. Bohumil Culek Ph.D. |
| Období měření | duben – květen 2019 |
| | |



2. Měřené veličiny

| Měrná veličina: | Zkratka: | Rozměr: |
|-----------------|----------|---------|
| Síla | S | [kN] |
| Poloha | P | [mm] |
| Počet cyklů | N | [-] |



3. Seznam použitých přístrojů

| Název | Typ | Evidenční číslo |
|--|----------------|-----------------|
| Siloměr GTM Gassmann testing and metrology | Serie K – 20kN | 54085 |
| Válec INOVA AH 20 - 400 | AH20 400M064 | 20 08 685 |
| Posuvný snímač polohy Messotron | WGL 400 | 20 08 685 |
| | | |
| | | |
| | | |



4. Cíl zkoušky

Cílem zkoušky je zjistit dynamické únavové vlastnosti ocelových konzol. Konzoly byly vyrobeny s ohledem na únavovou životnost ve třech provedeních (viz. další kapitola). Po porušení všech konzol vlivem dynamického zatěžování vyhodnotíme získaná data a stanovíme únavové křivky. Hodnoty napětí byly stanoveny na základě přepočtu MKP v závislosti na působící síle.

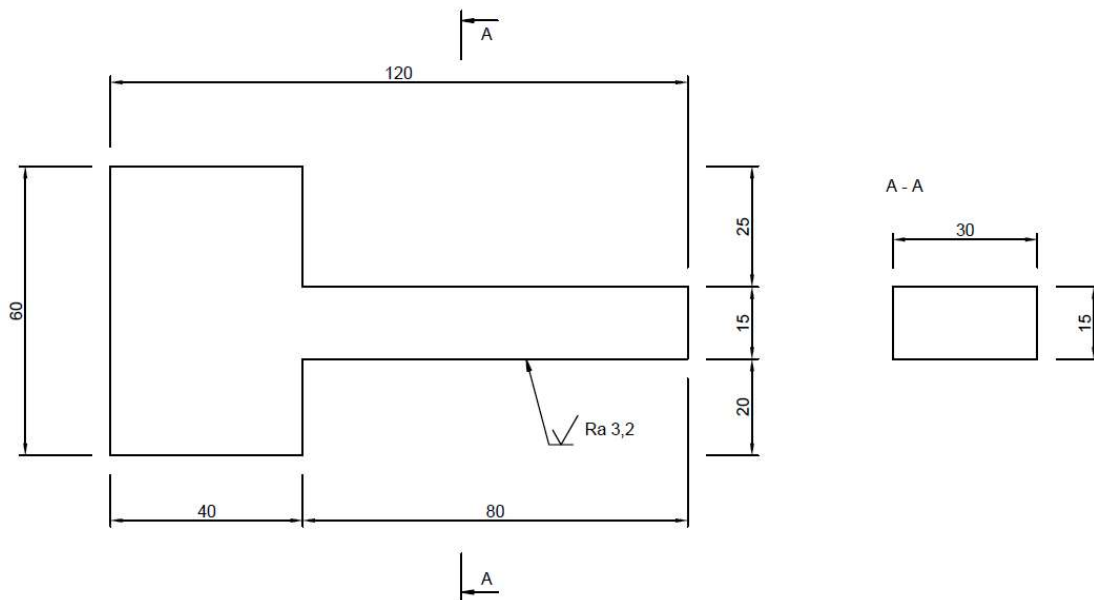


5. Předmět zkoušky

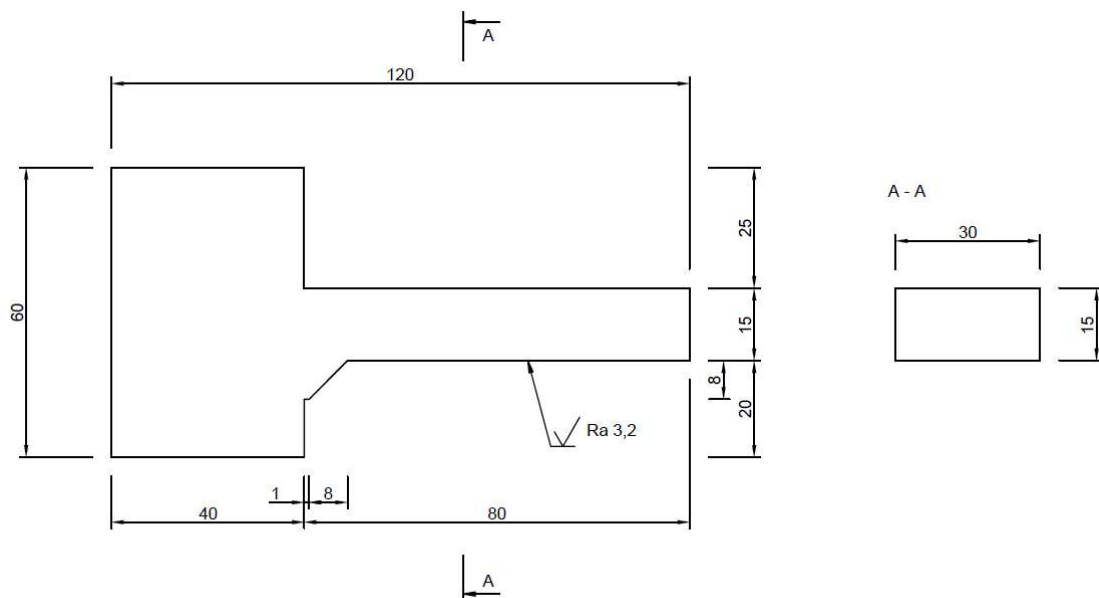
Předmětem cyklického namáhání je ocelová konzola, která byla zhotovena ve třech variantách konstrukčního uspořádání. Vyrobená byla z ocele S235JR. Cílem práce je určit, která varianta bude z hlediska únavové životnosti nejlepší, tedy která bude nejdéle odolávat dynamickému namáhání.

Výkresy jednotlivých konzol:

Varianta s hranou



Varianta s náběhem





Varianta se zaoblením

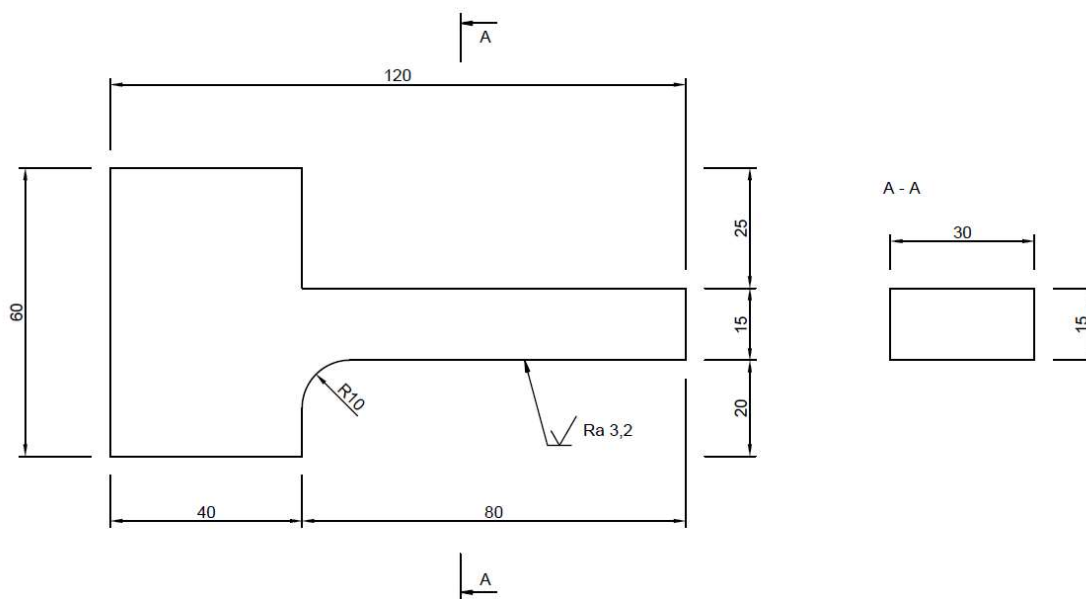


Schéma zkoušky:

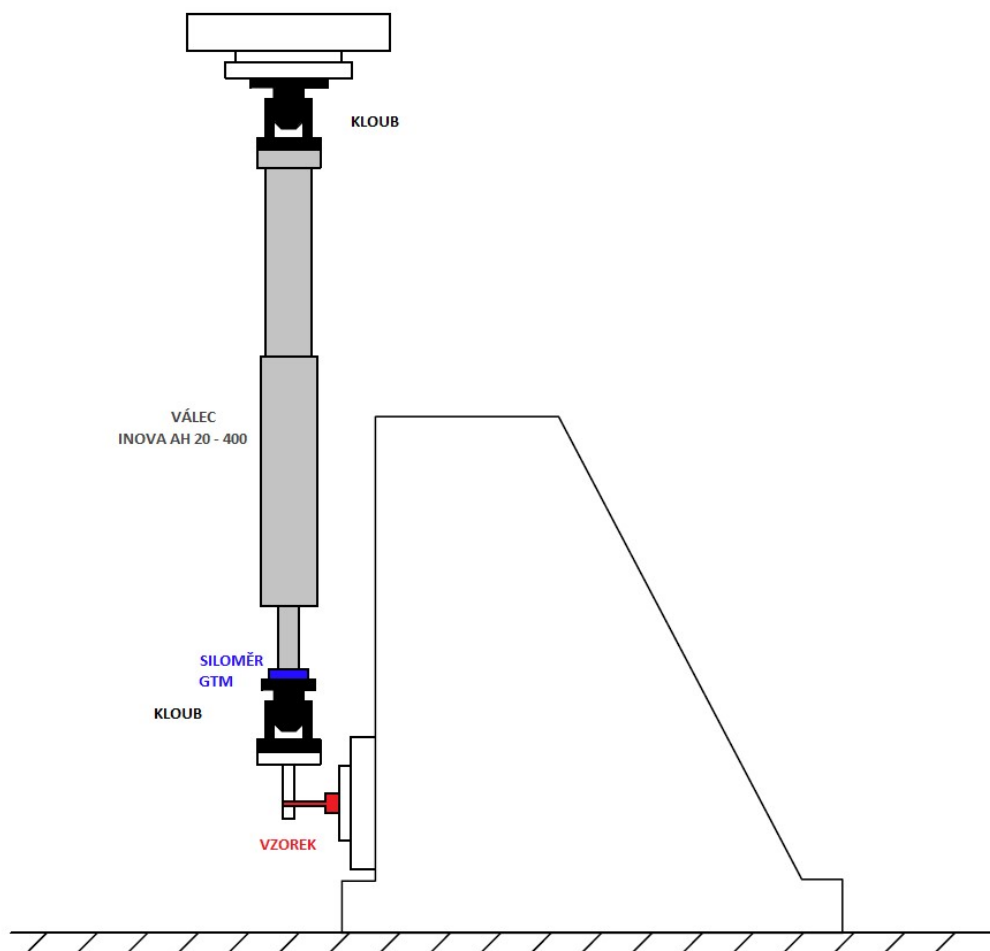
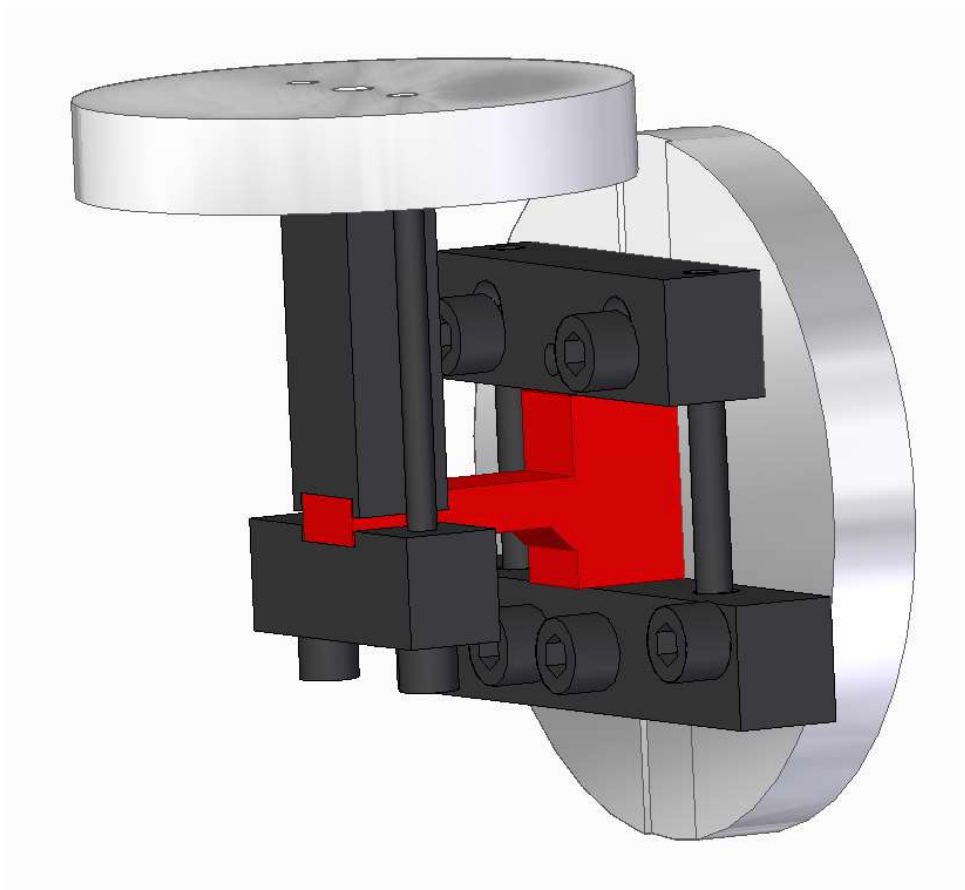




Schéma upevnění konzoly:





6. Zkušební zatížení

Zatěžování bude probíhat na dynamickém standu INOVA. Vzorky budou namáhány dynamicky tahovou silou vyvozenou při pohybu pístu válce.

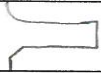
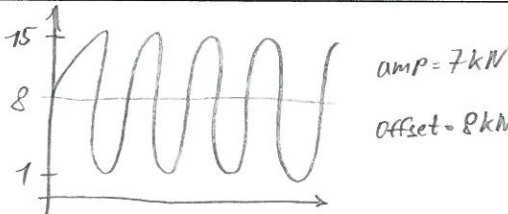
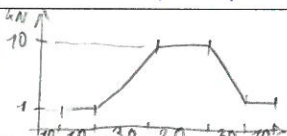
Napětí ve vzorcích bylo předem pro různé síly spočítáno v programu SCIA Engineer.

| Konzola s hranou | | | | | | | |
|------------------------------|-------------------------|------------------|---------|------------------|--------|------------------|--|
| Síla [kN] | Spojité zatížení [kN/m] | σ_x [MPa] | | σ_y [MPa] | | σ_z [MPa] | |
| 12,76 | 400 | 2312,9 | -1351,4 | 1861,1 | -931,8 | 2711,7 | |
| 9,57 | 300 | 1734,7 | -1013,6 | 1395,8 | -698,8 | 2033,7 | |
| 6,38 | 200 | 1156,5 | -675,7 | 930,5 | -465,9 | 1355,8 | |
| Konzola s plynulým přechodem | | | | | | | |
| Síla [kN] | Spojité zatížení [kN/m] | σ_x [MPa] | | σ_y [MPa] | | σ_z [MPa] | |
| 12,76 | 400 | 818,2 | -975,5 | 265,4 | -651,5 | 1077,2 | |
| 9,57 | 300 | 613,7 | -731,6 | 199,1 | -488,6 | 807,9 | |
| 6,38 | 200 | 409,1 | -487,7 | 132,7 | -325,8 | 538,6 | |
| Konzola s náběhem | | | | | | | |
| Síla [kN] | Spojité zatížení [kN/m] | σ_x [MPa] | | σ_y [MPa] | | σ_z [MPa] | |
| 12,76 | 400 | 1435,8 | -856,6 | 574,1 | -569,4 | 1532,3 | |
| 9,57 | 300 | 1076,8 | -642,5 | 430,6 | -427 | 1149,2 | |
| 6,38 | 200 | 717,9 | -428,3 | 287,1 | -284,7 | 766,2 | |


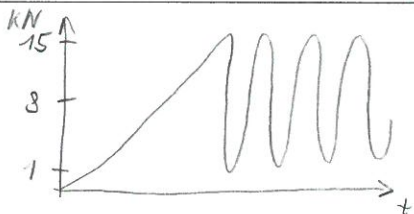
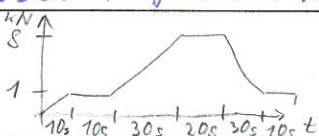
Před zahájením dynamické zkoušky bude provedena ještě statická zatěžovací zkouška. Válec postupně dosáhne síly 1 kN, kde 10 s setrvá, poté bude během 30 s zvyšovat sílu na zadanou hodnotu, na které vydrží 20 s a následně během 30 s sníží sílu zpět na 1 kN, po dalších 10 s setrvání zkouška končí.



Číslo vzorku: V01n

| | | |
|---------------------|---|---|
| Typ konzoly: | původní varianta s náběhem (zaoblení na horní straně) |  |
| Den zahájení testu: | 9.4.2019 | |
| Zatěžovací síla: | $F_{max} = 15 \text{ kN}$ frekvence 10 Hz |  |
| Počet cyklů: | počet cyklů při frekvenci 10 Hz = 200 000 + 200 000 + 200 000 + 1400 000 = $N = 3800 000$ cyklů | |
| Poznámky: | PID při testu $P=0,5$ $I=0,5$ $D=0,0$ dynamika 01 → data_0002; 10 kN; frekvence 2 Hz; 400 cyklů dynamika 02 → data_0003; 15 kN; frekvence 2 Hz; 400 cyklů dynamika 03-07 → data_0004-0008; zpyšováka frekvence 3 Hz, 4 Hz, 5 Hz, 6 Hz, 8 Hz; vřd, 400 cyklů (15 kN) dynamika 08 → data_0009; frekvence 10 Hz; 15 kN; vše OK, 1000 cyklů dynamika 09 → data_0010; frekvence 10 Hz; 15 kN; 800 000 cyklů; data_0011 = 800 000 cyklů; data_0012 = 800 000 cyklů; data_0013 = 800 000 cyklů data_0015 = 1400 000 cyklů test přeruščen - žádné známky poškození | |
| Statická zkouška: | statika 01 → data_0000 10 kN |  |

Číslo vzorku: V02k

| | | |
|---------------------|--|--|
| Typ konzoly: | kolmá |  |
| Den zahájení testu: | 16.4.2019 | |
| Zatěžovací síla: | $F_{max} = 15 \text{ kN}$ frekvence 10 Hz |  |
| Počet cyklů: | $N = 3597$ cyklů | |
| Poznámky: | PID manipulace $P=0,2$ $I=0,0$ $D=0,0$ PID testu $P=0,5$ $I=0,5$ $D=0,0$ statika 01 → data_0017 statika 02 → data_0018 poloha poč.: 122,69 nakonci: 123,09 → 122,83 Dynamika → data_0019 → přeruščen nastaveno jinak ukládání data_0020 | |
| Statická zkouška: | statika 01 8 kN |  |



Číslo vzorku: V03 n

| | | |
|---------------------|--|--|
| Typ konzoly: | s náběhem | |
| Den zahájení testu: | 17.4.2019 | |
| Zatěžovací síla: | $F_{max} = 12\text{ kN}$ frekvence 10 Hz | |
| Počet cyklů: | $N = 19\ 270$ cyklů | |
| Poznámky: | vzorkovací frekvence 500 Hz PID stejné jako u předchozího statika 01 → data_0021 dynamika 01 → data_0022 poloha offset = 124,42 poloha = 124,22 | |
| Statická zkouška: | statika 01 12 kN | |

Číslo vzorku: V04 n

| | | |
|---------------------|--|--|
| Typ konzoly: | s náběhem | |
| Den zahájení testu: | 18.4.2019 | |
| Zatěžovací síla: | $F_{max} = 9\text{ kN}$ frekvence 10 Hz | |
| Počet cyklů: | $12\ 215 + 17\ 099 + 987$ $N = 30\ 295$ cyklů | |
| Poznámky: | vzorkovací frekvence 500 Hz statika 01 → data_0023 dynamika 01 → data_0024 ukládaři 1s/1mib poloha offset = 122,29 poloha = 122,06 } → zastaveno (sedla poloha) data_0025 } ↓ } zastaveno na mezi 124 mm data_0026 | |
| Statická zkouška: | statika 01 9 kN | |

Číslo vzorku: V05_n

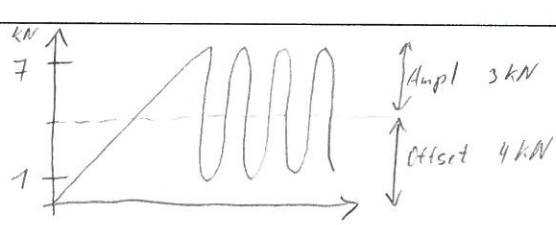
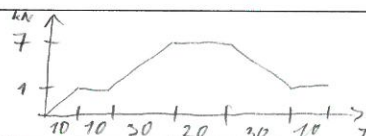
| | | |
|---------------------|---|--|
| Typ konzoly: | s náběhem | |
| Den zahájení testu: | 18. 4. 2019 | |
| Zatěžovací síla: | $F_{max} = 6 \text{ kN}$ 20 Hz | |
| Počet cyklů: | $N = 3\ 49\ 595$ cyklů | |
| Poznámky: | vzorkování 500 Hz PID jako u předchozích statika 01 → data_0027 dynamika 01 → data_0028 poloha offset = 123,77 poloha = 123,78 | |
| Statická zkouška: | statika 01 6 kN | |

Číslo vzorku: V06_n

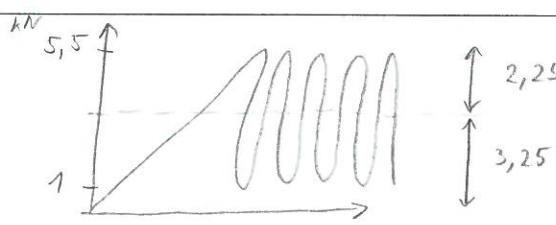
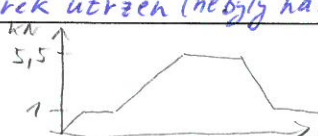
| | | |
|---------------------|---|--|
| Typ konzoly: | s náběhem | |
| Den zahájení testu: | 19. 4. 2019 | |
| Zatěžovací síla: | $F_{max} = 4 \text{ kN}$ | |
| Počet cyklů: | $N = 3\ 376\ 100 +$ cyklů | |
| Poznámky: | vzorkování 500 Hz PID manipulace P=0,2 I=0,0 D=0,0 statika 01 → data_0029 PID testu P=0,5 I=0,5 D=0,0 dynamika 01 → data_0030 23. 4. 19 - pokus o zobrazení signálu, HW se odpojil → zkouška zastavena soubor data_0030 je příliš velký ukládal se vše vzorek neprasknul | |
| Statická zkouška: | statika 01 4 kN | |



Číslo vzorku: V07n

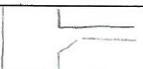
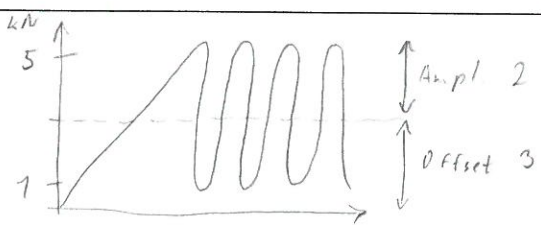
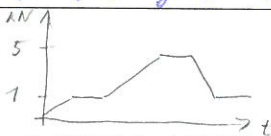
| | |
|---------------------|--|
| Typ konzoly: | s náběhem |
| Den zahájení testu: | 23. 4. 2019 |
| Zatěžovací síla: | $F_{max} = 7 \text{ kN}$ frekvence 10 Hz  |
| Počet cyklů: | $N = 96\,419$ cyklů |
| Poznámky: | vzorkování 500 Hz PID - dle předchozího statika 01 → data_0031 dynamika 01 → data_0032 ukládač 1s/1min poloha po 11000 cyklech = 122,87 po 30800 - 4 - = 122,38 poloha offset = 122,55 poloha = 122,61 |
| Statická zkouška: | statika 01 7 kN  |

Číslo vzorku: V08n

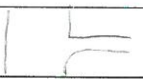
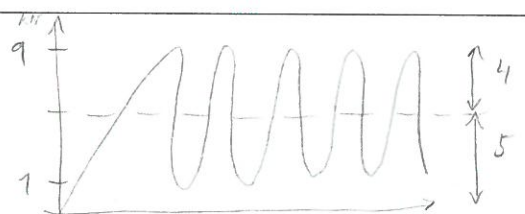
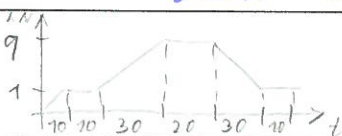
| | |
|---------------------|--|
| Typ konzoly: | s náběhem |
| Den zahájení testu: | 24. 4. 2019 |
| Zatěžovací síla: | $F_{max} = 5,5 \text{ kN}$ frekvence = 10 Hz  |
| Počet cyklů: | $N = 360\,500$ cyklů |
| Poznámky: | vzorkování 500 Hz PID viz předchozí statika 01 → data_0033 dynamika 01 → data_0034 poloha = 122,01 44 361 cyklů → nouzové zastavení → systémové SYS/DI -15 → pomohlo odpojit HW → zkouška puštěna dál (poloha = 122,64) 733 410 cyklů → vzorek utržen (nebyly nastaveny meze) → trhlina již při 360 500 cyklů |
| Statická zkouška: | statika 01 5,5 kN  |



Číslo vzorku: V09_n


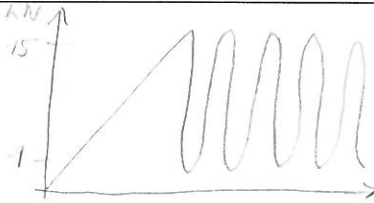
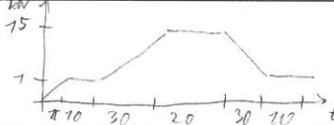
| | | |
|---------------------|--|--|
| Typ konzoly: | s náběhem |  |
| Den zahájení testu: | 25. 4. 2019 | |
| Zatěžovací síla: | $F_{max} = 5 \text{ kN}$ frekvence 10 Hz |  |
| Počet cyklů: | $N = 1264000$ cyklů | |
| Poznámky: | Vzorová 500 Hz PID viz předložil statika 01 → data -0035 poloha = 123,47 dynamika 01 → data -0036 poloha po 98500 cyklů = 123,18 -u po 777 770 cyklů = 123,05 $1,264 \cdot 10^6$ cyklů → kolaps | |
| Statická zkouška: | statika 01 5 kN |  |

Číslo vzorku: V10_z


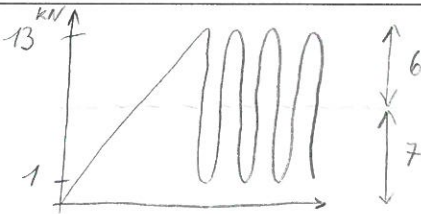
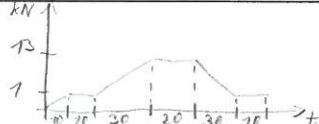
| | | |
|---------------------|---|--|
| Typ konzoly: | zaoblený |  |
| Den zahájení testu: | 29. 4. 2019 | |
| Zatěžovací síla: | $F_{max} = 9 \text{ kN}$ frekvence 10 Hz |  |
| Počet cyklů: | ukončeno bez trhliny 6. 5. 19 3 305 000 + 2586000 cyklů | |
| Poznámky: | 500 Hz PID jako vzorek 2 statika 01 → data -0037 dynamika 01 → data -0038 po 254700 cyklů, poloha = 123,2 mm běží 30. 4. 19 701 200 cyklů, poloha = 123,0 1 082 600 cyklů, poloha = 123,2 zk. běží 6. 5. 19 + 2586 000 cyklů poloha = 123,23 2. 5. 19 2 818 200 cyklů, poloha = 123,1 mm ukončeno bez trhliny 3. 5. 19 3 305 000 cyklů, poloha = 123,15 → zk. spuštěna znovu (data -0039) | |
| Statická zkouška: | statika 01 9 kN |  |



Číslo vzorku: V11 z


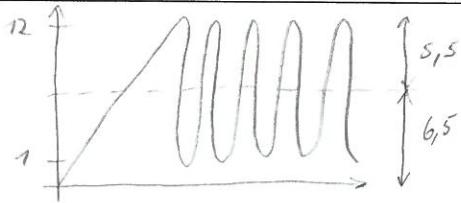
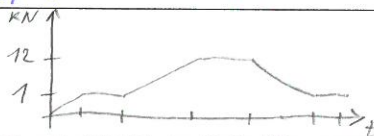
| | | |
|---------------------|--|--|
| Typ konzoly: | zaoblená |  |
| Den zahájení testu: | 6. 5. 2019 | |
| Zatěžovací síla: | $F_{max} = 15 \text{ kN}$ frekvence 10 Hz |  |
| Počet cyklů: | $N = 89\,465$ cyklů | |
| Poznámky: | 500 Hz vzorkování PID jako vzorek 2 statika 01 → data_0060 dynamika 01 → data_0041 při 47000 cyklů poloha = 123,93 87 781 stop na mezích poloha 124,40 = 15 kN | |
| Statická zkouška: | statika 01 15 kN |  |

Číslo vzorku: V12 z

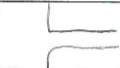
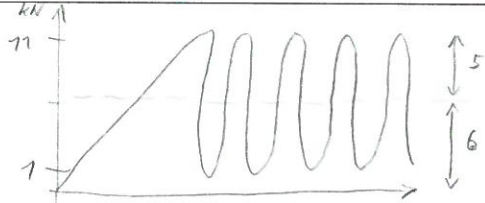
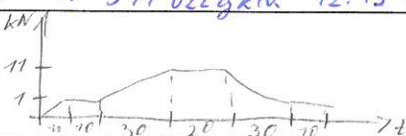
| | | |
|---------------------|---|--|
| Typ konzoly: | zaoblená |  |
| Den zahájení testu: | 7. 5. 2019 | |
| Zatěžovací síla: | $F_{max} = 13 \text{ kN}$ frekvence 10 Hz |  |
| Počet cyklů: | $N_1 = 20\,970$ cyklů + $N_2 = 145\,923$ cyklů = 166 893 | |
| Poznámky: | vzorkování 500 Hz PID jako vzorek 2 statika 01 → data_0042 dynamika 01 → data_0043 poloha na počátku 122,45 poloha 50000 cyklů 121,41 test přerušen → změna ukládači data_0044 | |
| Statická zkouška: | statika 01 13 kN |  |



Číslo vzorku: V 13 z


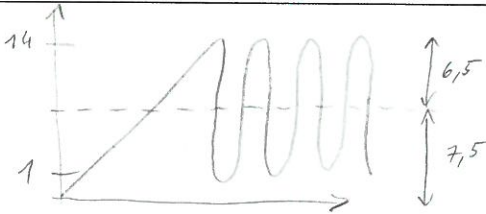
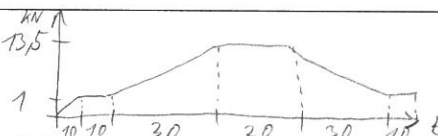
| | |
|---------------------|--|
| Typ konzoly: | zaoblená'  |
| Den zahájení testu: | 9. 5. 2019 |
| Zatěžovací síla: | $F_{max} = 12 \text{ kN}$ frekvence 10 Hz  |
| Počet cyklů: | $N = 498\ 066 \text{ cyklů}$ |
| Poznámky: | vzorová ml 500 Hz PID jako v2.2 Statika 01 → data_0045 statika 02 → data_0046 → statika opakovaná (problém v poloze) dynamika 01 → data_0047 poloha = 122,79 90 000 cyklů → poloha = 122,34 10.5.19 - 135 815 cyklů, test přerušen - vybití baterie notebooku → znovu puštěno poloha = 123,43 225 800 cyklů - poloha = 122,85 364 000 cyklů - poloha = 123,5 ~ 326 000 cyklů - poloha = 123,29 |
| Statická zkouška: | statika 01 statika 02 12 kN  |

Číslo vzorku: V 14 z


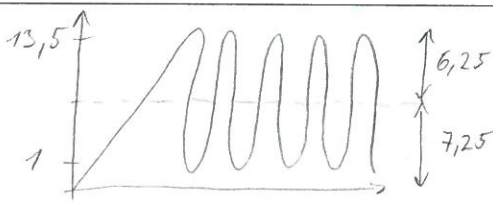
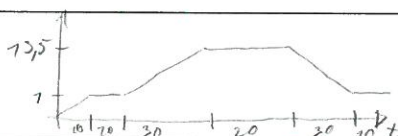
| | |
|---------------------|--|
| Typ konzoly: | zaoblená'  |
| Den zahájení testu: | 11. 5. 2019 |
| Zatěžovací síla: | $F_{max} = 11 \text{ kN}$ frekvence 10 Hz  |
| Počet cyklů: | $N = 591\ 022 \text{ cyklů}$ |
| Poznámky: | vzorová ml 500 Hz PID viz předchozí statika 01 → data_0048 dynamika 01 → data_0049 poloha = 123,51 12.5.19 → hydroagregát vyprázdněn 337 303 cyklů → RTC chyba (RTC úplně vypnuté) poloha 123,86 → 9:39 opět puštěno → 13:37 480 436 cyklů → došlo k vypnutí hydroagregátu → překročena dolní meze síly $\leq 0,0 \text{ kN}$ → RTC - OK, systém zůstal v manipulaci. 13. 5. 19 8:48 - test puštěn znovu, poloha 123,94 557 000 cyklů → poloha = 123,10 → 591 022 cyklů 12:13 → tržlina |
| Statická zkouška: | statika 01 11 kN  |



Číslo vzorku: V 15 z

| | |
|---------------------|---|
| Typ konzoly: | zaoblená'  |
| Den zahájení testu: | 14.5.2019 |
| Zatěžovací síla: | $F_{max} = 14 \text{ kN}$ frekvence 10 Hz  |
| Počet cyklů: | $N = 123\ 826$ cyklů |
| Poznámky: | vzorkování 500 Hz PID viz vzorek 2 statika 01 → data_0050 dynamika 01 → data_0051 poloha = 123,04 14.56 předročení neze: poloha → 125,5 mm → Trhline 123 826 cyklů |
| Statická zkouška: | statika 07 14 kN  |

Číslo vzorku: V 16 z

| | |
|---------------------|---|
| Typ konzoly: | zaoblená  |
| Den zahájení testu: | 15.5.2019 |
| Zatěžovací síla: | $F_{max} = 13,5 \text{ kN}$ frekvence 10 Hz  |
| Počet cyklů: | $N = 78\ 989$ cyklů |
| Poznámky: | vzorkování 500 Hz PID viz vzorek 2 statika 07 → data_0052 dynamika 01 → data_0053 |
| Statická zkouška: | statika 07 13,5 kN  |



Číslo vzorku: V77z


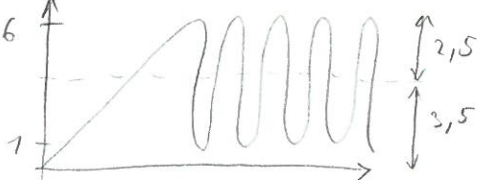
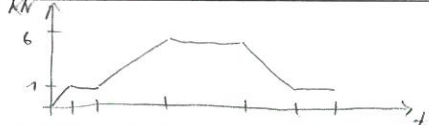
| | | |
|---------------------|--|---|
| Typ konzoly: | zaoblená | |
| Den zahájení testu: | 15. 5. 2019 | |
| Zatěžovací síla: | $F_{max} = 12,5 \text{ kN}$ frekvence 10 Hz | |
| Počet cyklů: | $N = 89\ 927$ cyklů | |
| Poznámky: | vzor kovalení 500 Hz dynamika 01 → data_0055 poloha = 121,95 | PID viz vzorek 2 statika 01 → data_0054 větší rozptyl v sílně na servu |
| Statická zkouška: | statika 01 12,5 kN | |

Číslo vzorku: V18z


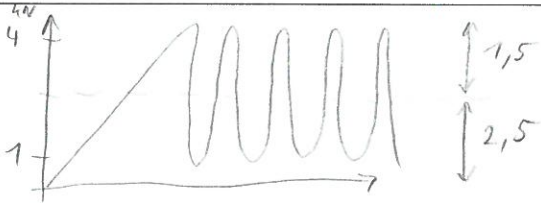
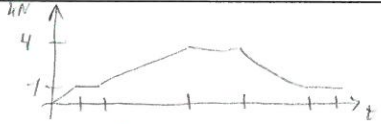
| | | |
|---------------------|--|--|
| Typ konzoly: | zaoblená | |
| Den zahájení testu: | 15. 5. 2019 | |
| Zatěžovací síla: | $F_{max} = 10,5 \text{ kN}$ frekvence 10 Hz | |
| Počet cyklů: | $N = 640\ 682$ cyklů | |
| Poznámky: | vzor kovalení 500 Hz dynamika 01 → data_0057 16. 5. 19 8:01 → 609 563 cyklů → běží | PID viz vzorek 2 statika 01 → data_0056 poloha = 122,37 poloha = 122,11 |
| Statická zkouška: | statika 01 10,5 kN | |



Číslo vzorku: V19k

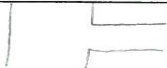
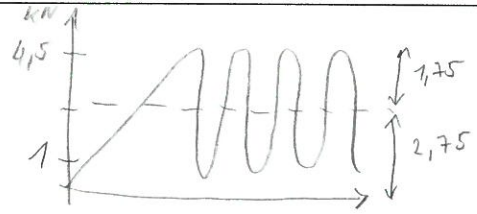
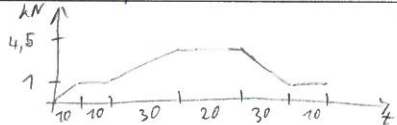
| | |
|---------------------|---|
| Typ konzoly: | kolmá  |
| Den zahájení testu: | 16. 5. 2019 |
| Zatěžovací síla: | $F_{max} = 6 \text{ kN}$ frekvence 20 Hz  |
| Počet cyklů: | $N = 159\ 508$ cyklů |
| Poznámky: | vzorovací 500 Hz P10 viz vzorek 2 statika 01 → data_0058 dynamika 01 → data_0059 poloha = 122,35 |
| Statická zkouška: | 6 kN statika 01 6 kN  |

Číslo vzorku: V20k

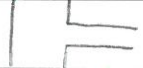
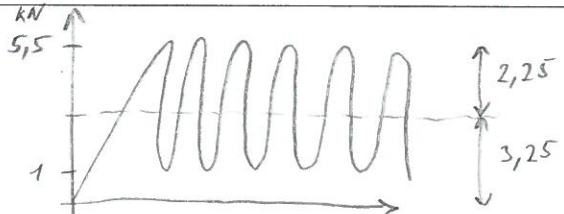
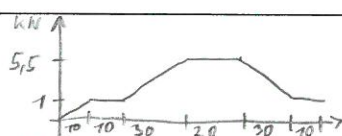
| | |
|---------------------|---|
| Typ konzoly: | kolmá  |
| Den zahájení testu: | 17. 5. 2019 |
| Zatěžovací síla: | $F_{max} = 4 \text{ kN}$ frekvence 20 Hz  |
| Počet cyklů: | $N = 767\ 231$ cyklů |
| Poznámky: | vzorovací 500 Hz P10 viz vzorek 2 statika 01 → data_0060 dynamika 01 → data_0061 94 350 cyklů → poloha = 122,42 202 927 cyklů → výpadek testu na mezi síla = 0 kN - bez trhliny → pustěho dál |
| Statická zkouška: | 4 kN statika 01 4 kN  |



Číslo vzorku: V 21 k


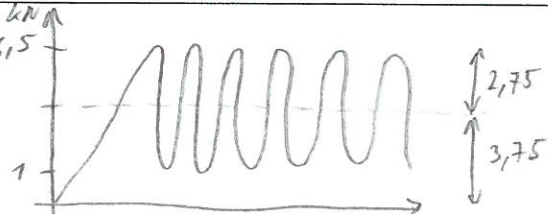
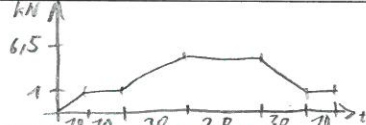
| | |
|---------------------|---|
| Typ konzoly: | kolmá  |
| Den zahájení testu: | 20.5. 2019 |
| Zatěžovací síla: | $F_{max} = 4,5 \text{ kN}$ frekvence 20 Hz  |
| Počet cyklů: | $N = 2076600 + \text{gklů}$ |
| Poznámky: | vzorkování 500 Hz PID viz vzorek 2 statika 01 → data_0062 dynamika 01 → data_0063 poloha = 122,55 236 000 cyklů → poloha = 122,73 2 076 600 cyklů → 22.5. výpadek el. energie 835 000 cyklů → poloha = 122,77 vzorek bez vizuální úhlině 1 088 000 cyklů → poloha = 122,81 2 045 000 cyklů → poloha = 122,77 |
| Statická zkouška: | statika 01 4,5 kN  |

Číslo vzorku: V 22 k


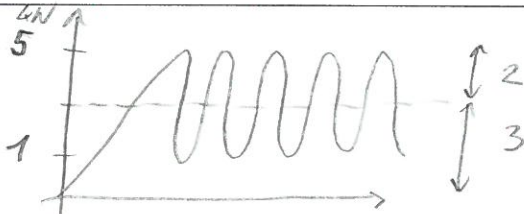
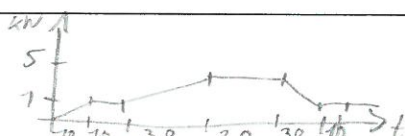
| | |
|---------------------|--|
| Typ konzoly: | kolmá  |
| Den zahájení testu: | 27.5. 2019 |
| Zatěžovací síla: | $F_{max} = 5,5 \text{ kN}$ frekvence 10 Hz  |
| Počet cyklů: | $N = 248969 \text{ gklů}$ |
| Poznámky: | vzorkování 500 Hz PID → P=0,5, i=0,5, D=0,0 statika 01 → data_0064 dynamika 01 → data_0065 → poloha = 122,43 mm 127 370 cyklů → poloha = 122,59 |
| Statická zkouška: | statika 01 5,5 kN  |



Číslo vzorku: V23k

| | |
|---------------------|---|
| Typ konzoly: | kolmá'  |
| Den zahájení testu: | 28. 5. 2019 |
| Zatěžovací síla: | $F_{max} = 6,5 \text{ kN}$ frekvence 10 Hz  |
| Počet cyklů: | $N = 121\ 378$ cyklů |
| Poznámky: | vzorkování frekvence 500 Hz PID viz předchozí vzorek statika 01 → data_0066 dynamika 01 → data_0067 |
| Statická zkouška: | $6,5 \text{ kN}$ statika 01  |

Číslo vzorku: V24k

| | |
|---------------------|--|
| Typ konzoly: | kolmá'  |
| Den zahájení testu: | 28. 5. 2019 |
| Zatěžovací síla: | $F_{max} = 5 \text{ kN}$ frekvence 10 Hz  |
| Počet cyklů: | $N = 382\ 948$ cyklů |
| Poznámky: | vzorkování 500 Hz PID viz předchozí statika 01 → data_0068 dynamika 01 → data_0069 → poloha = 122,70 102 800 cyklů → zkouška běžela |
| Statická zkouška: | 5 kN statika 01  |

Příloha B

Protokol o zkoušce



UNIVERZITA PARDUBICE

Dopravní fakulta Jana Pernera

Studentská 95, 532 10 Pardubice

PROTOKOL O ZKOUŠCE

Číslo protokolu: **DZS-P-01-19**

Název zkoušky: **Dynamické testy ocelových vzorků**

Předmět zkoušky: **Ocelové vzorky konzol s různými přechody do vetknutí**

Místo a datum zkoušky: **Pardubice, duben - květen 2019**

Číslo smlouvy: **Realizováno v rámci Bc. práce**

Název a adresa objednatele: **Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta Jana Pernera,
Studentská 95, 53210 Pardubice**

Vedoucí zkoušky: **Václav Štech**

Vedoucí práce: **doc. Ing. Bohumil CULEK, Ph.D.**

Datum vystavení protokolu: **29. května 2019**

Výtisk č.: **1** Počet stran textu: **38**

Počet výtisků: **1** Počet příloh: **0**



OBSAH

| | |
|---------------------------------|----|
| Seznam použitých označení | 3 |
| Seznam použitých zkratek..... | 4 |
| Seznam použitých přístrojů..... | 5 |
| 1. Cíl zkoušky | 6 |
| 2. Předmět zkoušky | 7 |
| 3. Zatěžování | 9 |
| 4. Měřené veličiny..... | 12 |
| 5. Naměřené údaje..... | 14 |
| 6. Vyhodnocení | 38 |



Seznam použitých označení

| <u>Použité označení:</u> | <u>Význam označení:</u> | <u>Rozměr:</u> |
|------------------------------|--|----------------|
| P – poloha | Svislá poloha zatěžovacího válce INOVA AH 20 – 400 | [mm] |
| S – síla | Tahová síla válce INOVA AH 20 – 400 při zatěžování konzol | [kN] |
| N – počet cyklů | Počet cyklů do lomu | [-] |

DZS-P-01-19



Seznam použitých zkratek

INOVA INOVA Praha s.r.o.

V01k označení zkušebního vzorku č. 01, kolmý s hranou

AH 20 – 400 zatěžovací válec INOVA 20 kN, 400 mm



Seznam použitých přístrojů

| Název | Typ | Výrobní číslo |
|--|----------------|---------------|
| Siloměr GTM Gassmann testing and metrology | Serie K – 20kN | 54085 |
| Válec INOVA AH 20 - 400 | AH20 400M064 | 20 08 685 |
| Posuvný snímač polohy Messotron | WGL 400 | 20 08 685 |



DZS-P-01-19

1. Cíl zkoušky

Cílem zkoušky je ověření dynamických únavových vlastností ocelových konzol. Konzoly byly vyrobeny s ohledem na únavovou životnost ve třech provedeních (viz. další kapitola). Po porušení všech konzol vlivem dynamického zatěžování jsou stanoveny únavové křivky. Hodnoty napětí byly stanoveny na základě přepočtu MKP v závislosti na působící síle.

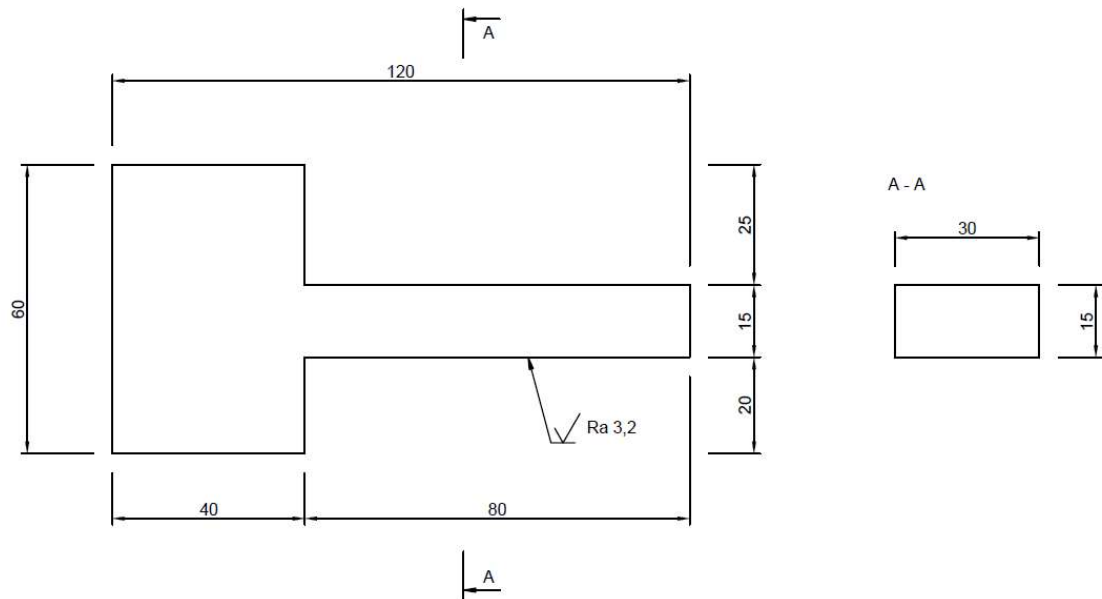


DZS-P-01-19

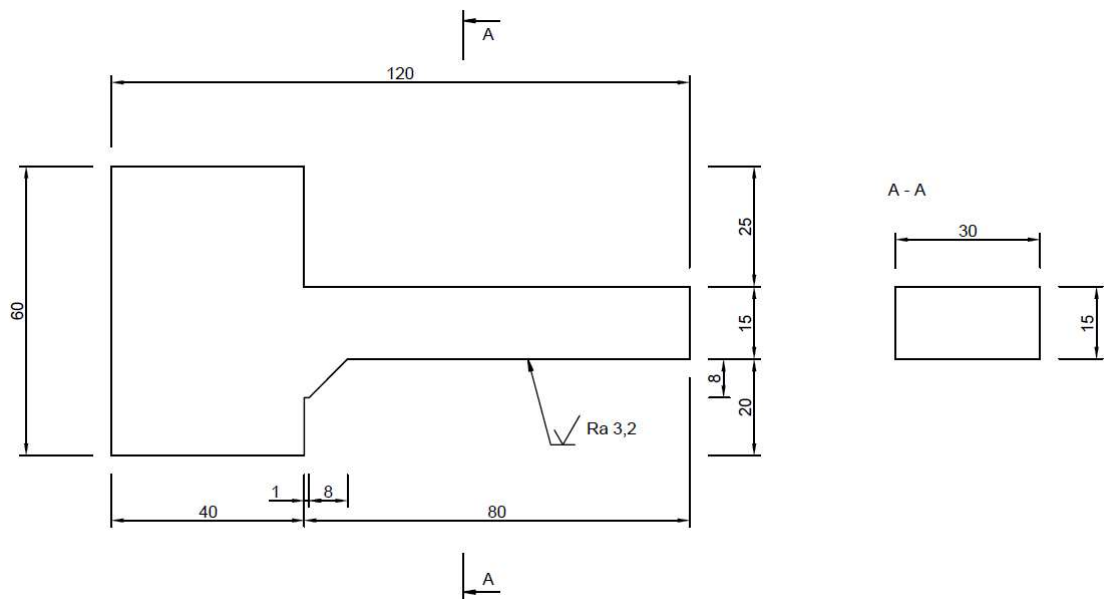
2. Předmět zkoušky

Předmětem zkoušky jsou ocelové konzole, zhotovené ve třech variantách konstrukčního uspořádání. Materiál konzol byla ocel S235JR.

Základní rozměry a tvar konzol:



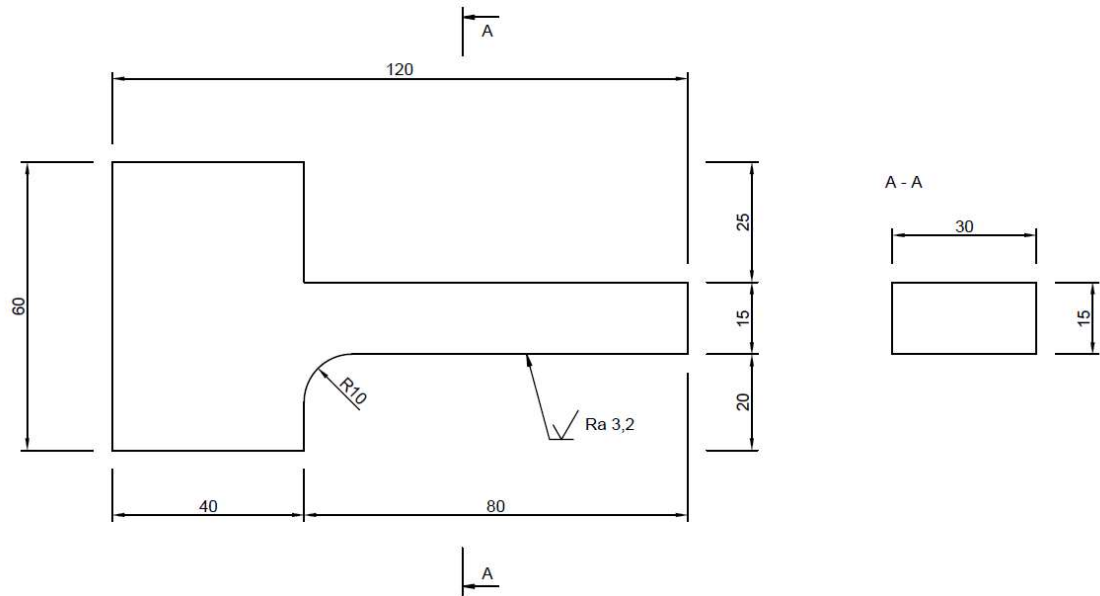
Obrázek 1: Konzola kolmá s hranou



Obrázek 2: Konzola s náběhem



DZS-P-01-19



Obrázek 3: Konzola zaoblená s plynulým přechodem

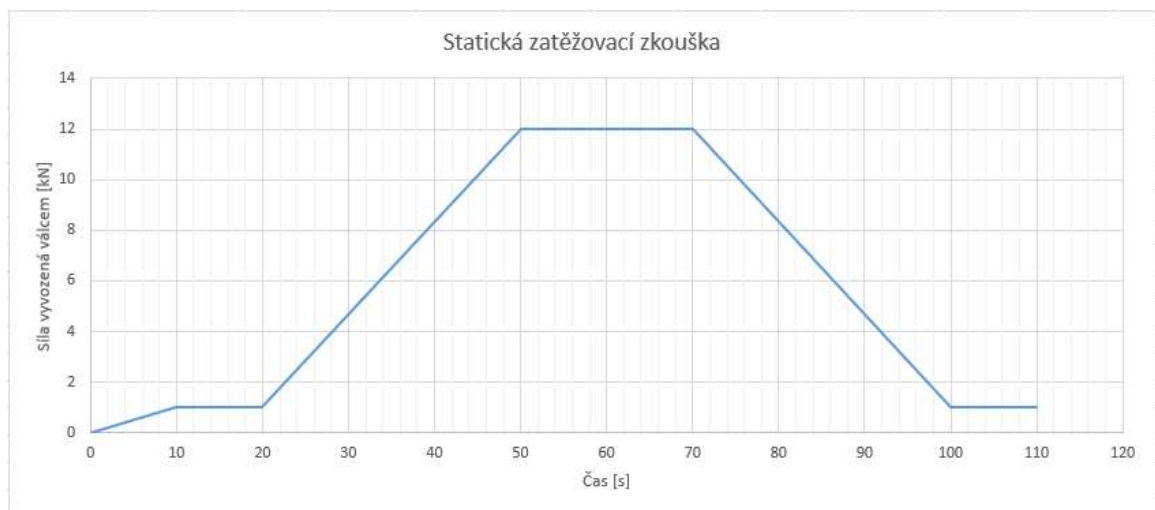


DZS-P-01-19

3. Zatěžování

Statická zkouška:

Před zahájením dynamické zkoušky byla provedena ještě statická zatěžovací zkouška. Válec postupně dosáhl síly 1 kN, kde 10 s setrval, poté během 30 s zvyšoval sílu na danou hodnotu stejnou i při dynamickém zatěžování, na které vydržel 20 s a následně během 30 s snížil sílu zpět na 1 kN, po dalších 10 s setrvání zkouška skončila.



Obrázek 4: Příklad průběhu síly v čase při statické zkoušce

Dynamická zkouška:

Zatěžování probíhalo na dynamickém stavu INOVA. Vzorky byly namáhány dynamicky tahovou silou vyvozenou při pohybu pístu válce odpovídající předchozímu statickému zatěžování. Hodnoty zatěžování jsou určeny následující tabulkou.

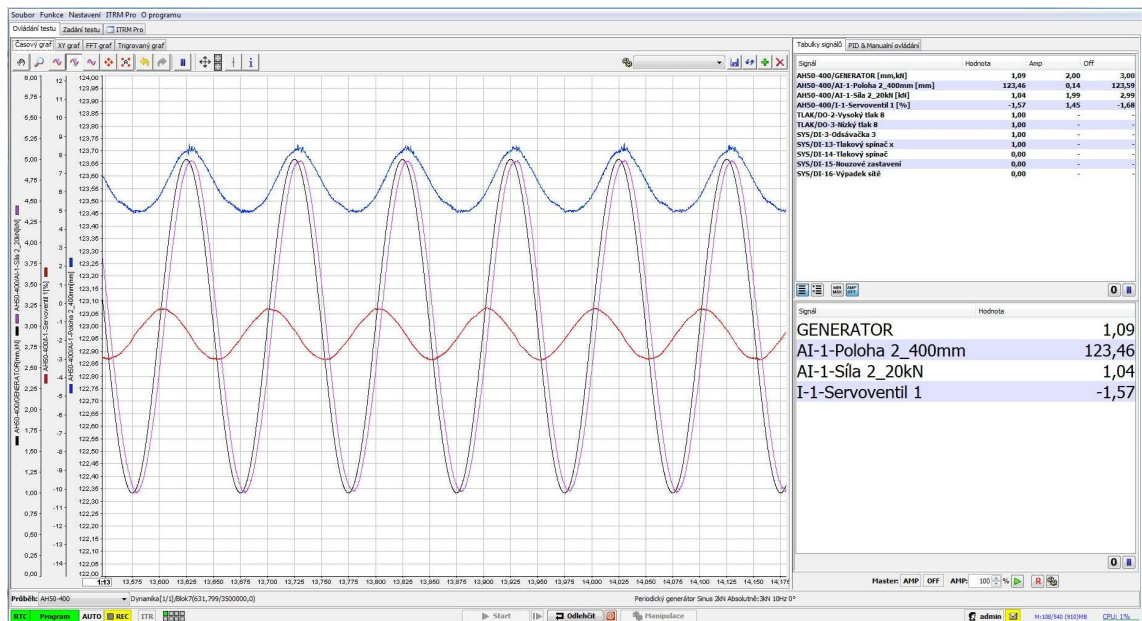
| Vzorek | max. síla válce při zatěžování [kN] | min. síla válce při zatěžování [kN] | Vzorek | max. síla válce při zatěžování [kN] | min. síla válce při zatěžování [kN] |
|--------|-------------------------------------|-------------------------------------|--------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| V01n | 15 | 1 | V13z | 12 | 1 |
| V02k | 15 | 1 | V14z | 11 | 1 |
| V03n | 12 | 1 | V15z | 14 | 1 |
| V04n | 9 | 1 | V16z | 13,5 | 1 |



DZS-P-01-19

| | | | | | |
|------|-----|---|------|------|---|
| V05n | 6 | 1 | V17z | 12,5 | 1 |
| V06n | 4 | 1 | V18z | 10,5 | 1 |
| V07n | 7 | 1 | V19k | 6 | 1 |
| V08n | 5,5 | 1 | V20k | 4 | 1 |
| V09n | 5 | 1 | V21k | 4,5 | 1 |
| V10z | 9 | 1 | V22k | 5,5 | 1 |
| V11z | 15 | 1 | V23k | 6,5 | 1 |
| V12z | 13 | 1 | V24k | 5 | 1 |

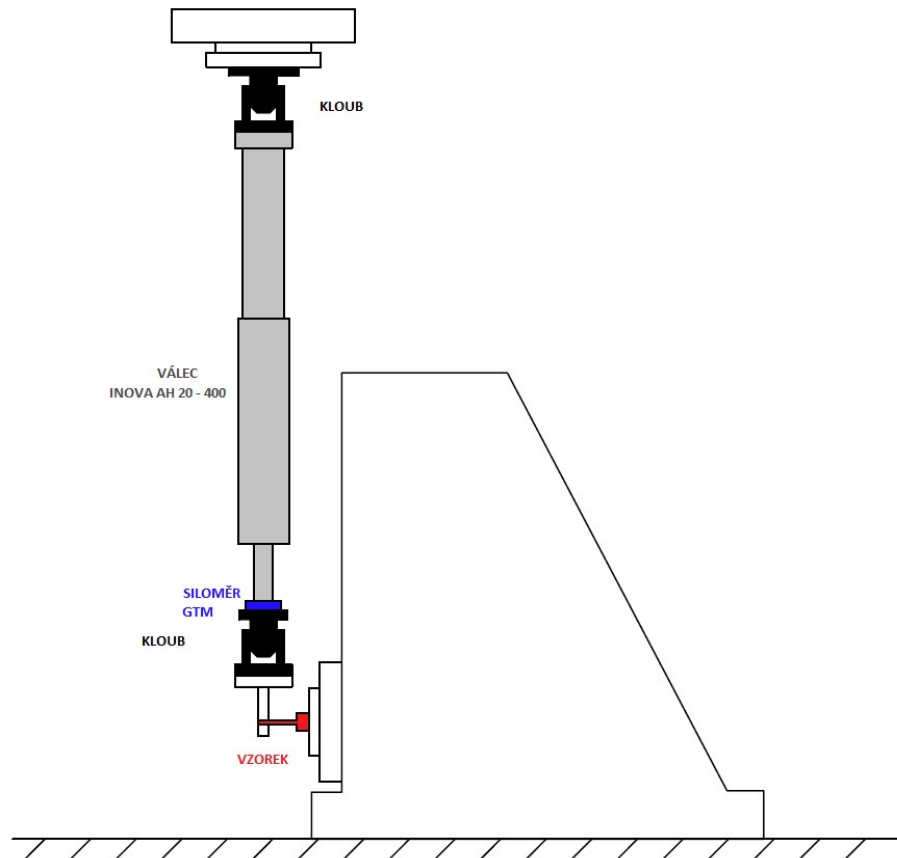
Na obrázku č. 5 je výstup z programu při průběhu dynamické zkoušky.



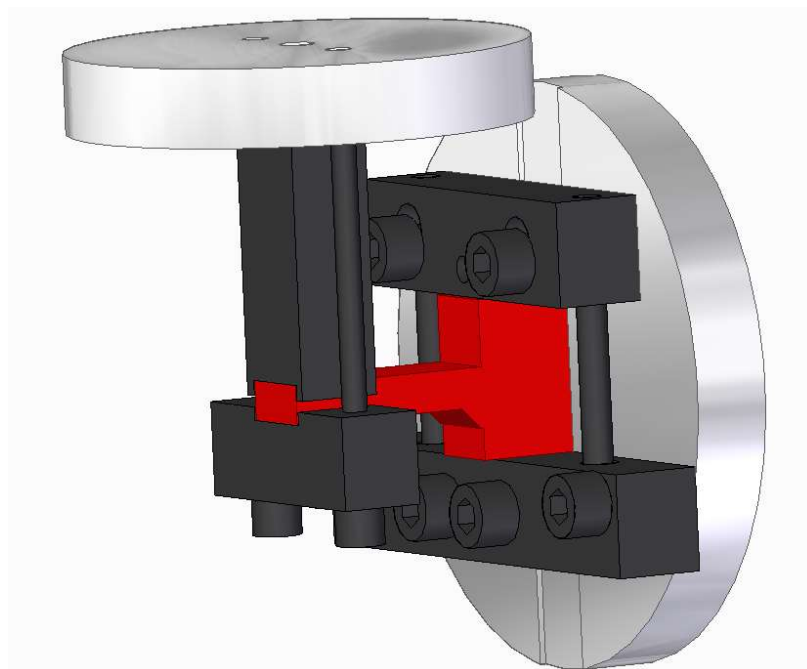
Obrázek 5: Příklad průběhu dynamické zkoušky



DZS-P-01-19



Obrázek 6: Schéma zatěžovací sestavy zkoušky



Obrázek 7: Zobrazení upevnění konzoly při testu



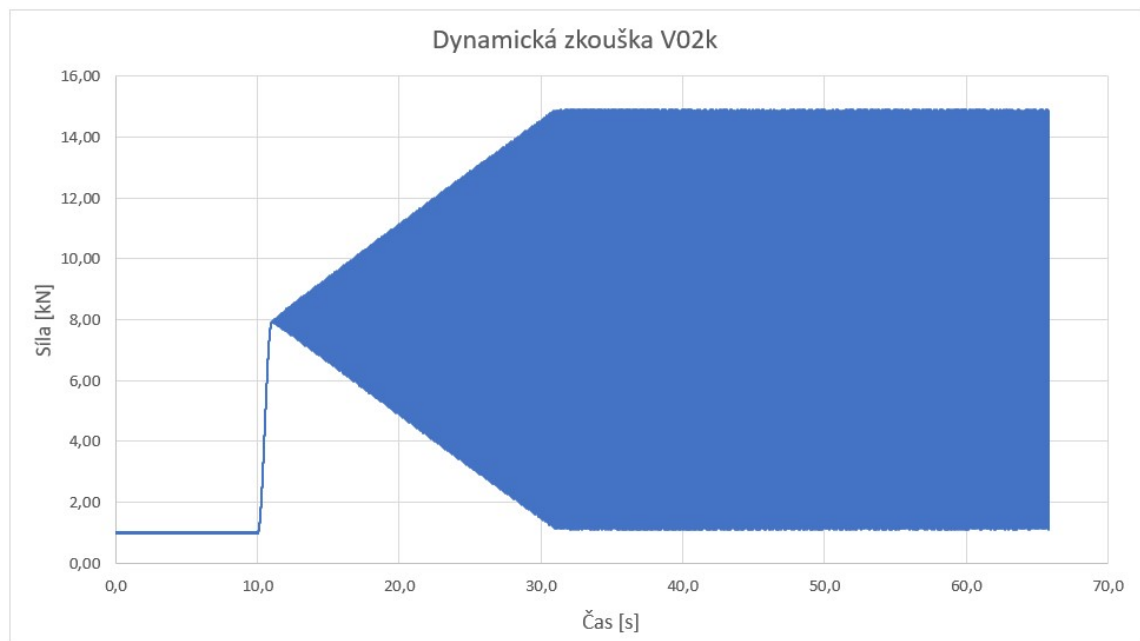
DZS-P-01-19

4. Měřené veličiny

Zatěžovací zkoušky byly realizované na dynamickém stavu INOVA. Použit byl zatěžovací válec AH 20 – 400 se snímačem polohy a síly.

Dynamické únavové zkoušky probíhaly až do vzniku trhliny ve vzorku, kdy došlo vlivem změny polohy válce k přerušení testu. Kolaps konstrukce (limitní trhlina) byl uvažován při dosažení nadlimitní hodnoty posunu válce (+ 1,5 mm). Frekvence zatěžování byla 10 Hz.

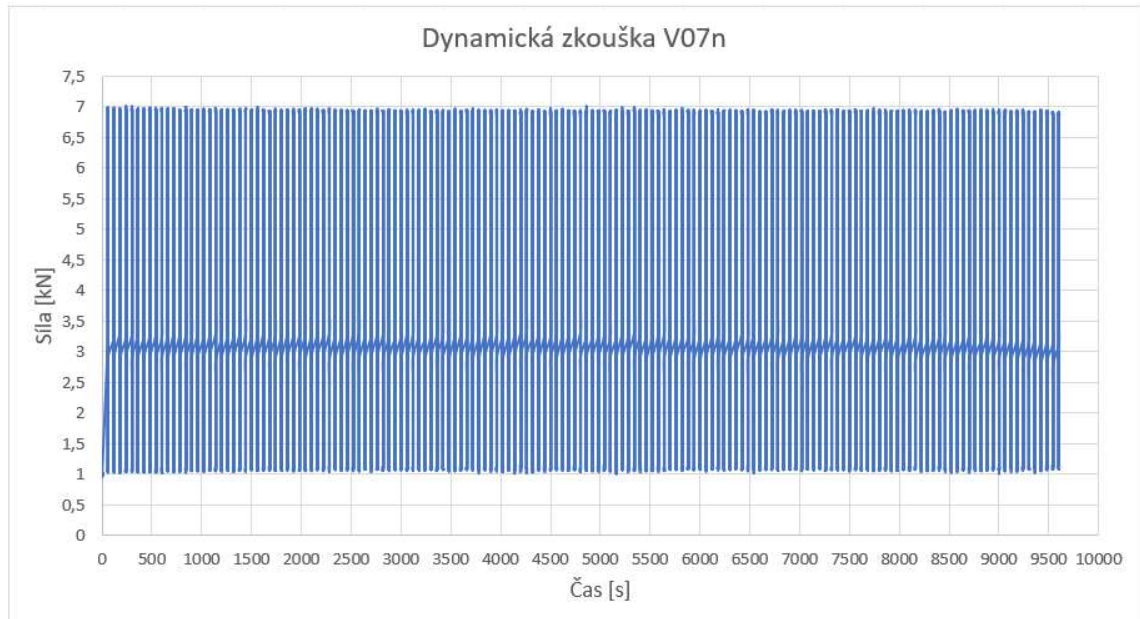
Průběh zatěžování na dynamickém zkušebním stavu INOVA byl vždy řízen silou, tzn. záznam síly po úvodním rozběhu byl vždy konstantní.



Obrázek 8: Rozběh síly na začátku dynamické zkoušky



DZS-P-01-19



Obrázek 9: Průběh síly během dynamické zkoušky

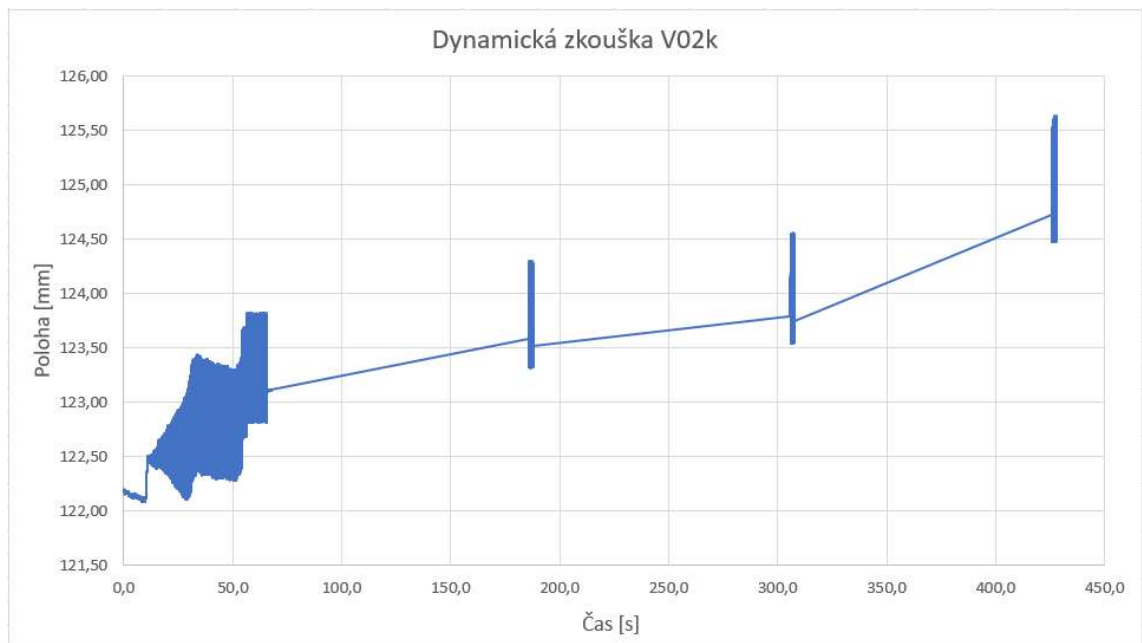
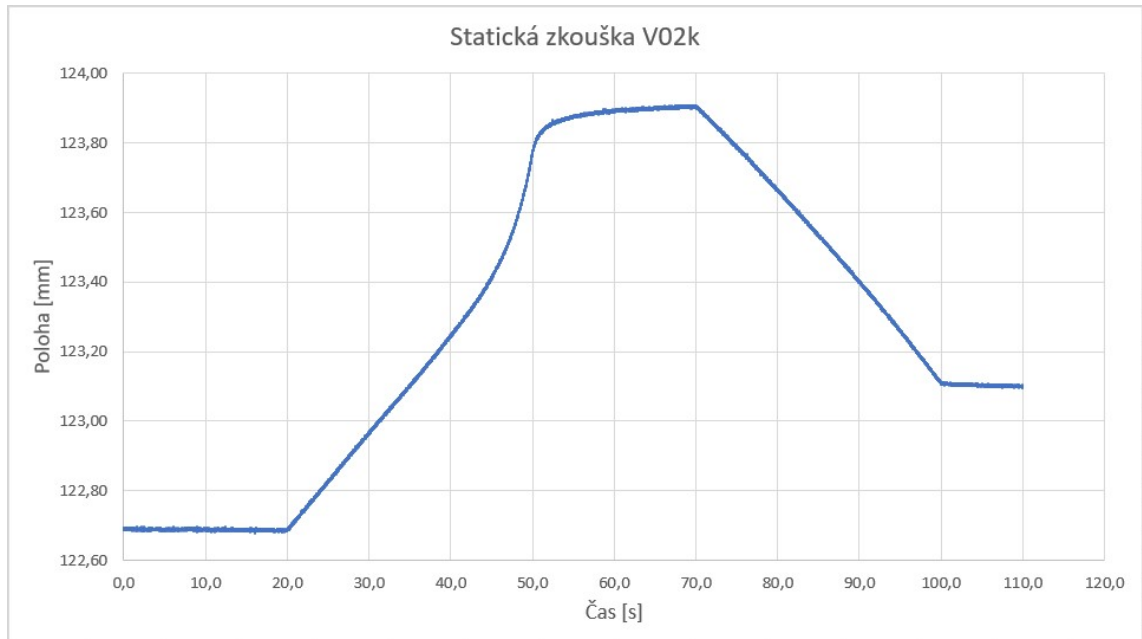


DZS-P-01-19

5. Naměřené údaje

V02k – 3597 cyklů

$F_{\max} = 15 \text{ kN}$, $F_{\min} = 1 \text{ kN}$, $\text{Ampl.} = 7 \text{ kN}$, $\text{Offset.} = 8 \text{ kN}$

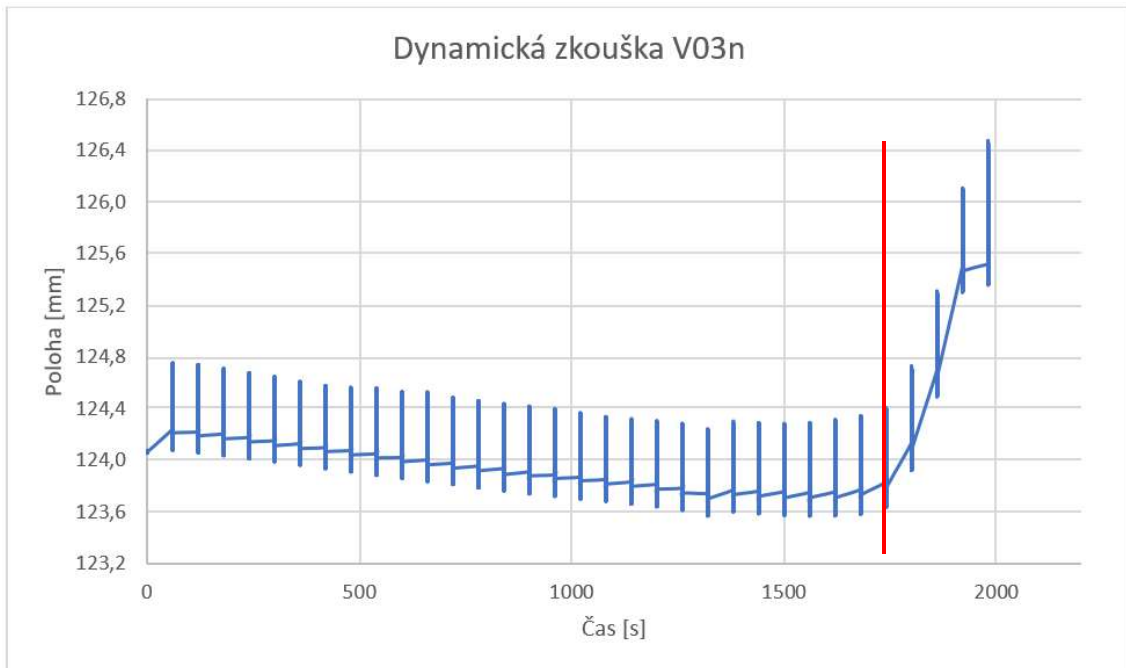
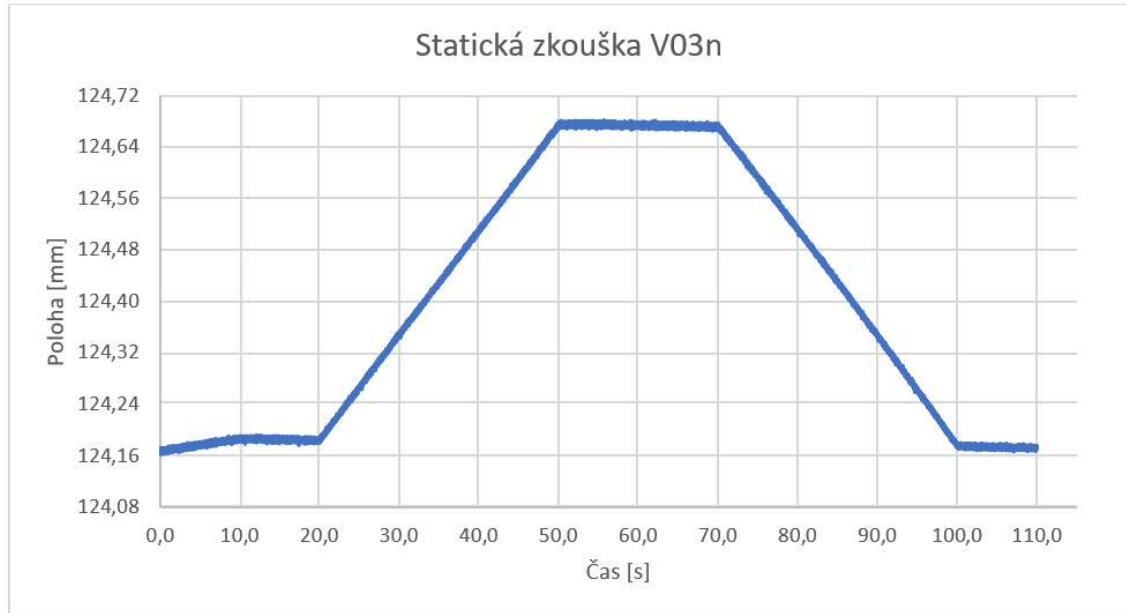




DZS-P-01-19

V03n – 17700 cyklů

$F_{max} = 12 \text{ kN}$, $F_{min} = 1 \text{ kN}$, $Ampl. = 5,5 \text{ kN}$, $Offset. = 6,5 \text{ kN}$

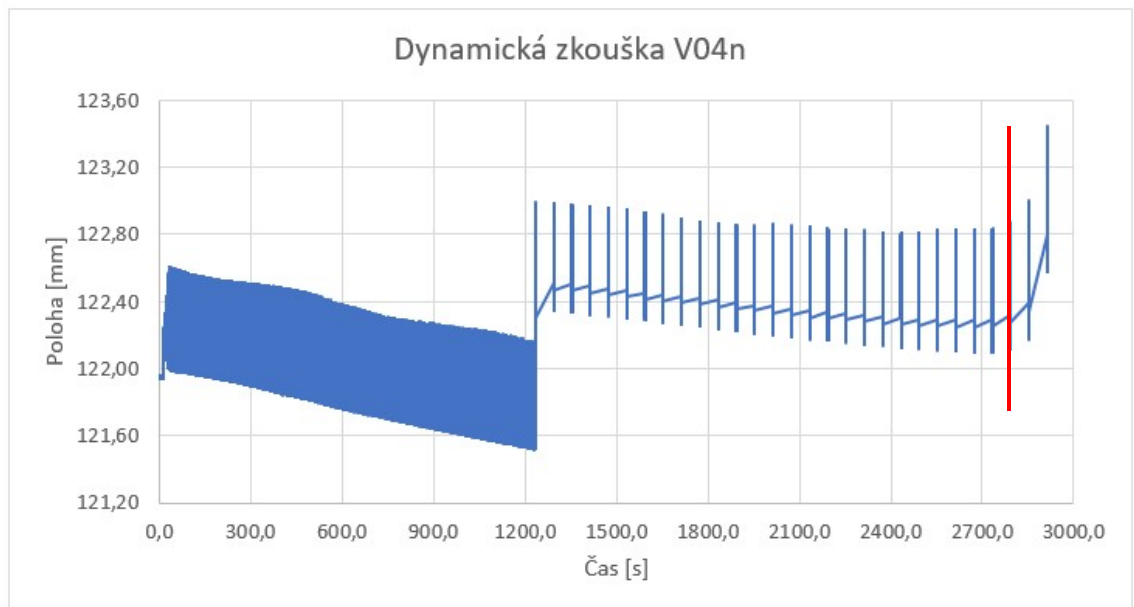
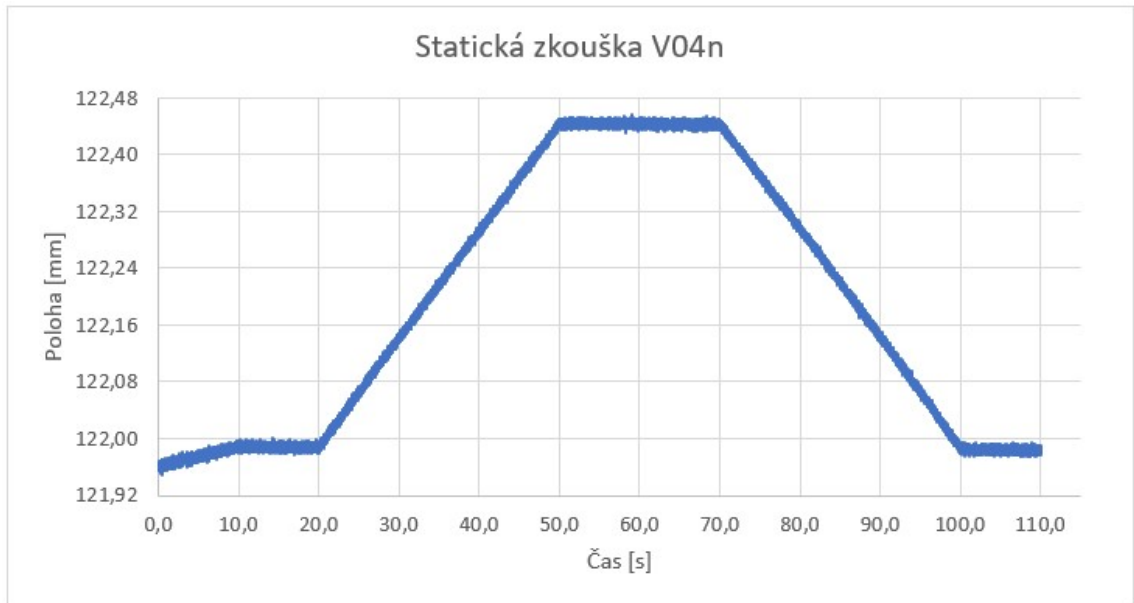




DZS-P-01-19

V04n – 28230 cyklů

$F_{\max} = 9 \text{ kN}$, $F_{\min} = 1 \text{ kN}$, $\text{Ampl.} = 4 \text{ kN}$, $\text{Offset.} = 5 \text{ kN}$

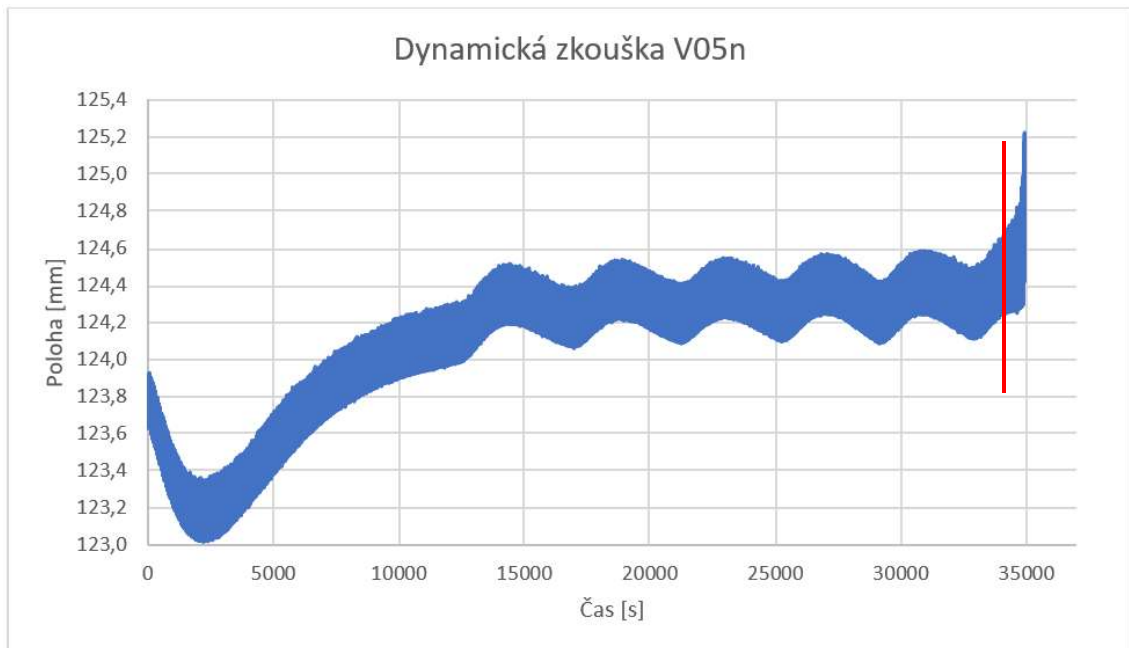
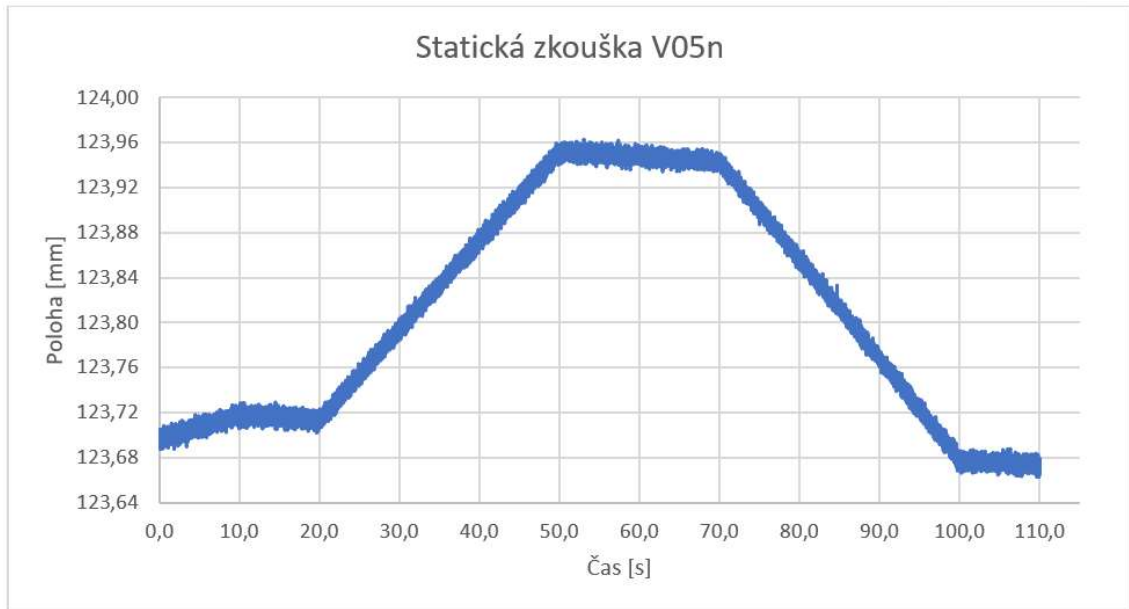




DZS-P-01-19

V05n – 346800 cyklů

$F_{\max} = 6 \text{ kN}$, $F_{\min} = 1 \text{ kN}$, $\text{Ampl.} = 2,5 \text{ kN}$, $\text{Offset.} = 3,5 \text{ kN}$

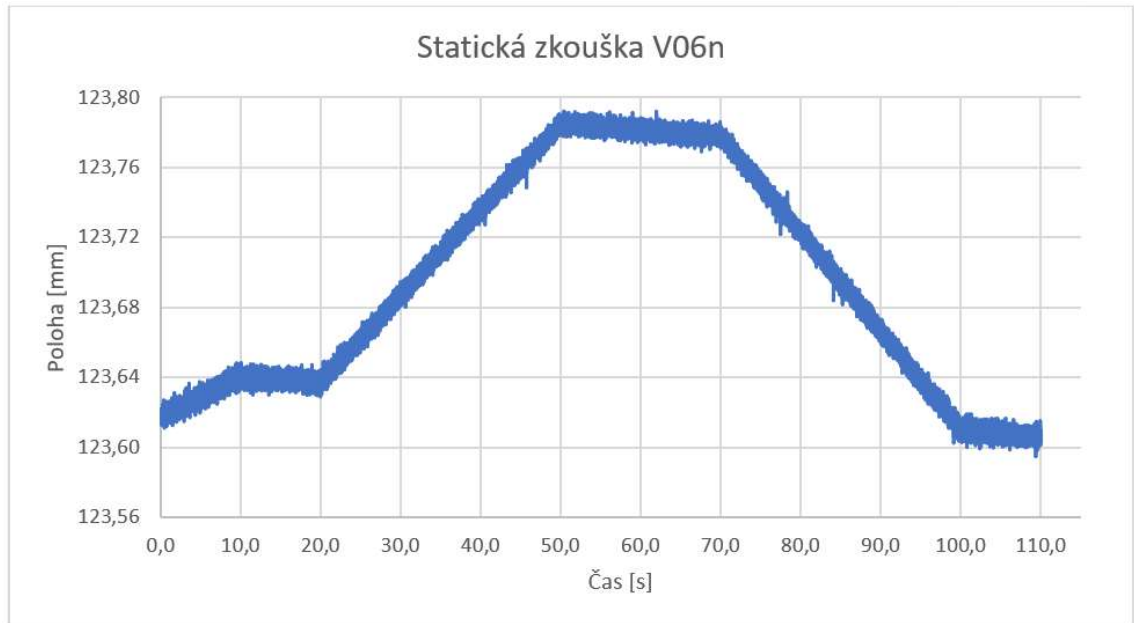




DZS-P-01-19

V06n – 3376100 + cyklů

$F_{\max} = 4 \text{ kN}$, $F_{\min} = 1 \text{ kN}$, $\text{Ampl.} = 1,5 \text{ kN}$, $\text{Offset.} = 2,5 \text{ kN}$

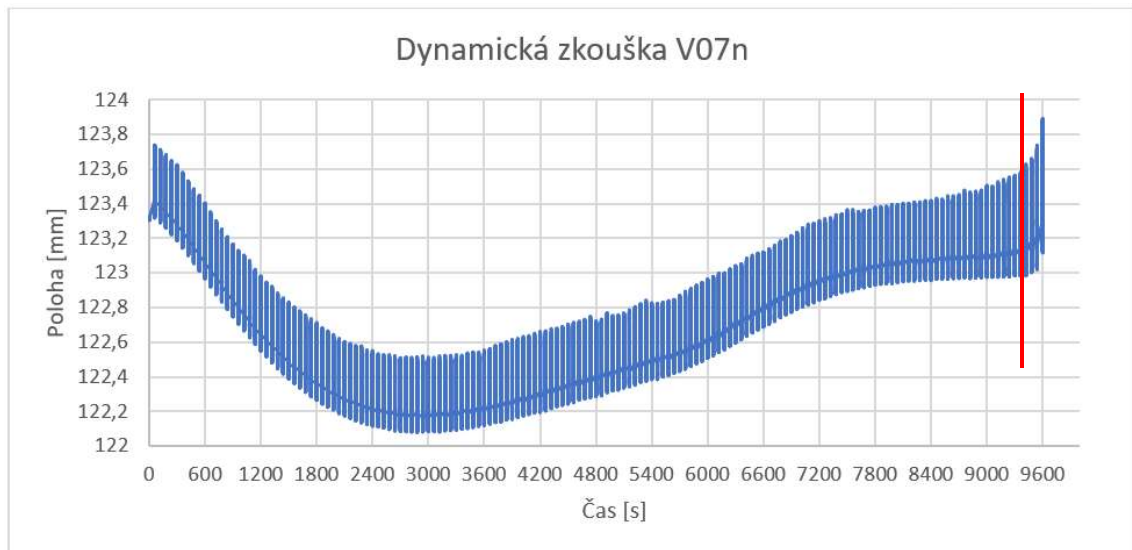
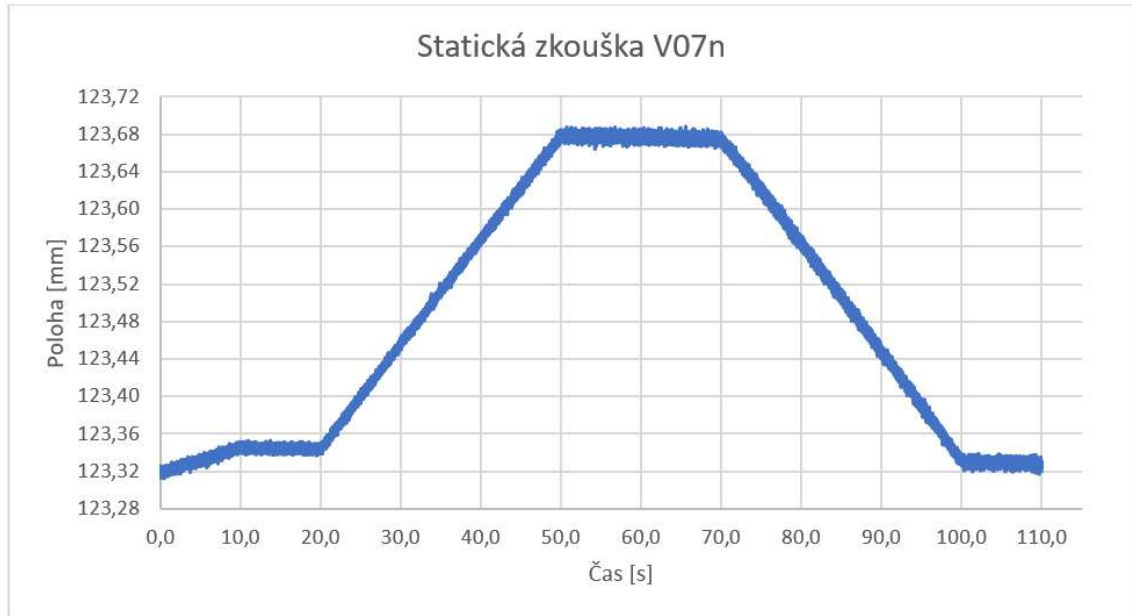




DZS-P-01-19

V07n – 94200 cyklů

$F_{\max} = 7 \text{ kN}$, $F_{\min} = 1 \text{ kN}$, $\text{Ampl.} = 3 \text{ kN}$, $\text{Offset.} = 4 \text{ kN}$

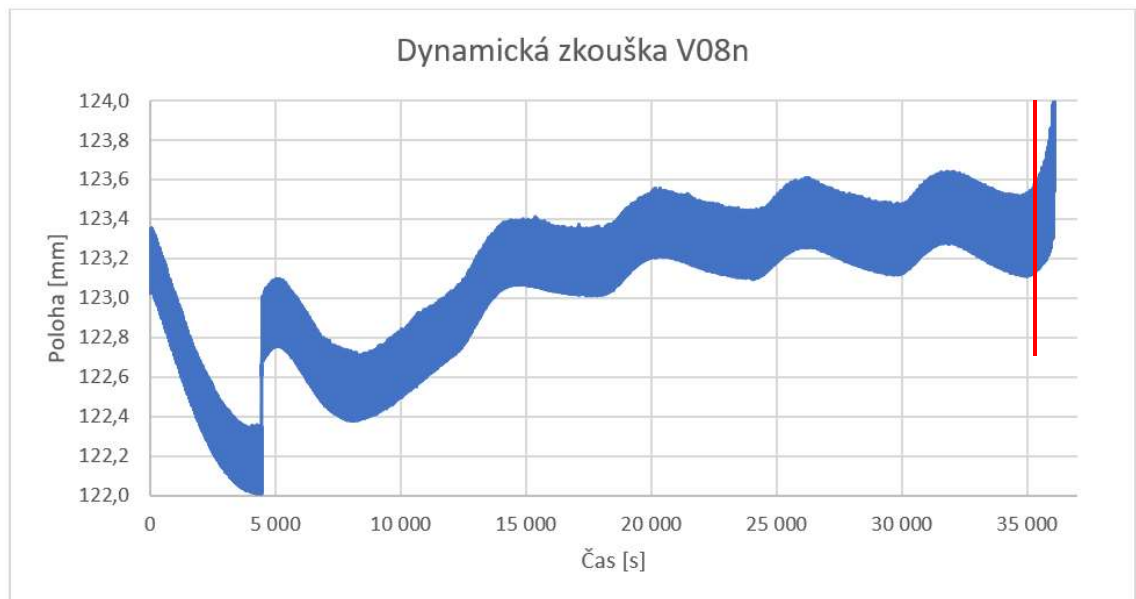
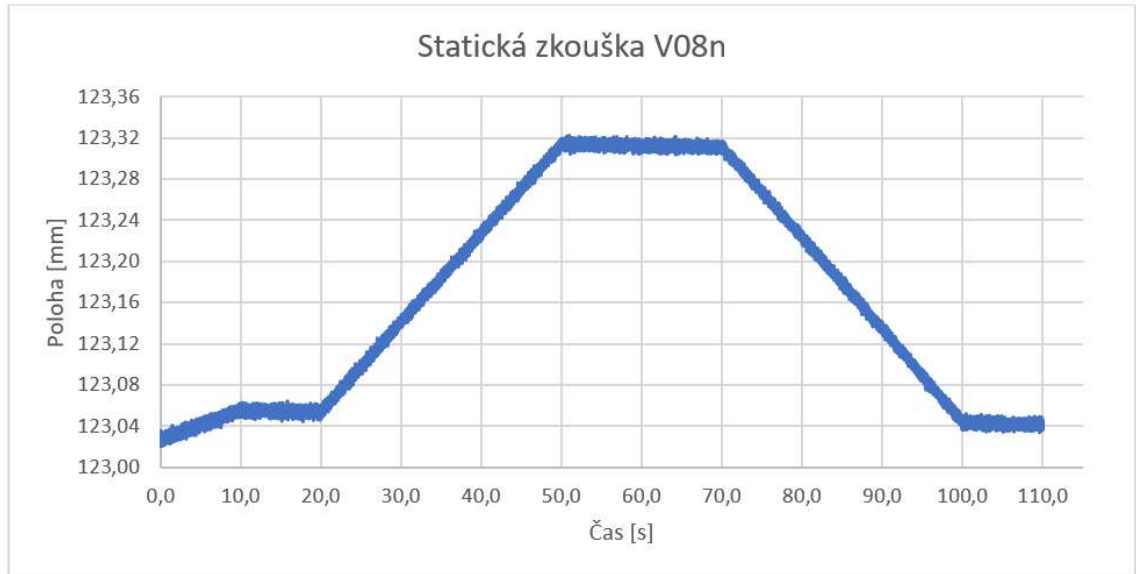




DZS-P-01-19

V08n – 358270 cyklů

$F_{\max} = 5,5 \text{ kN}$, $F_{\min} = 1 \text{ kN}$, $\text{Ampl.} = 2,25 \text{ kN}$, $\text{Offset.} = 3,25 \text{ kN}$

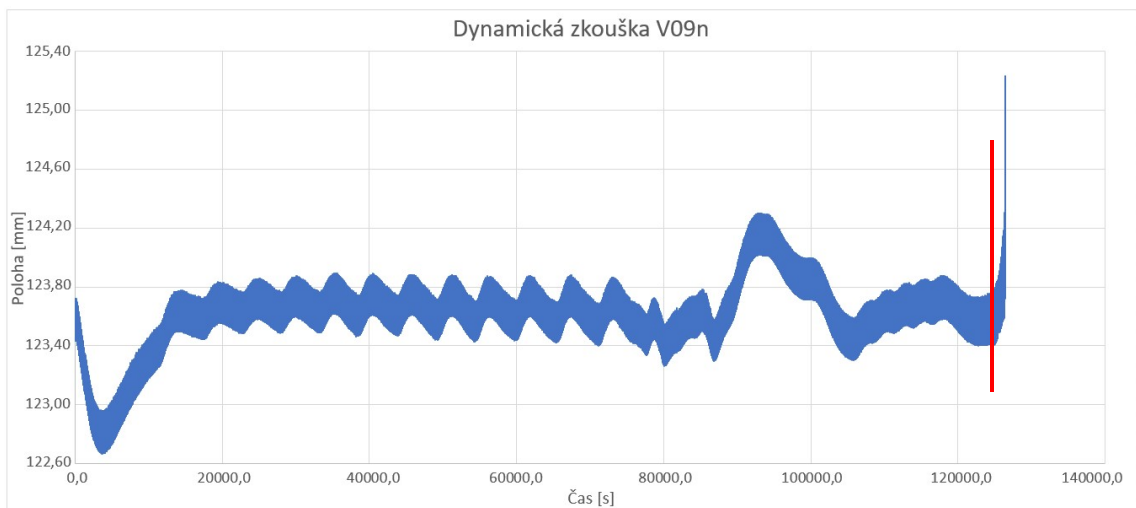
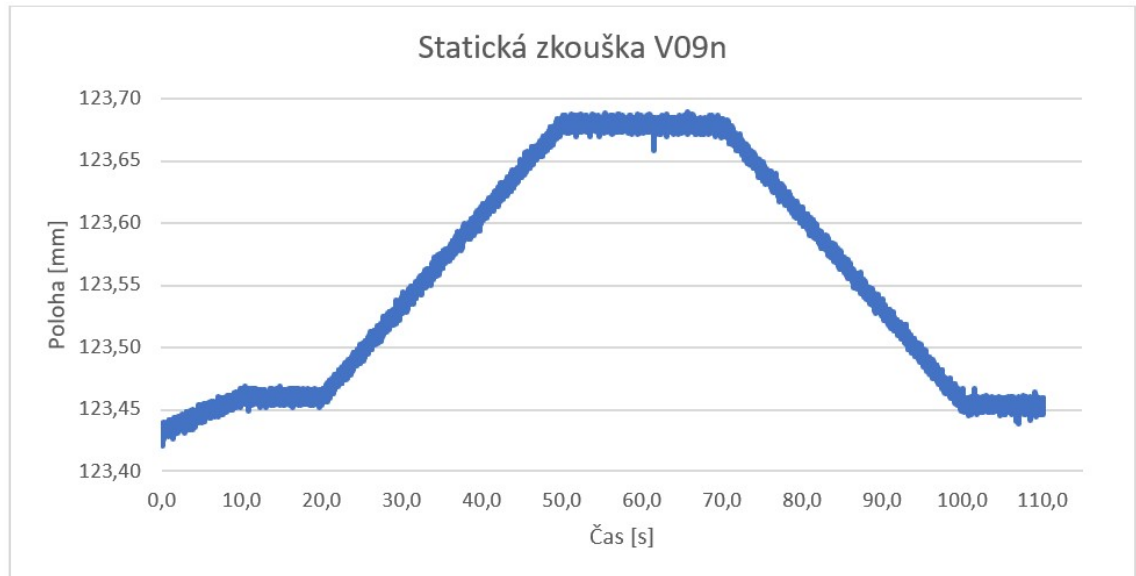




DZS-P-01-19

V09n – 1259400 cyklů

$F_{max} = 5 \text{ kN}$, $F_{min} = 1 \text{ kN}$, $Ampl. = 2 \text{ kN}$, $Offset. = 3 \text{ kN}$

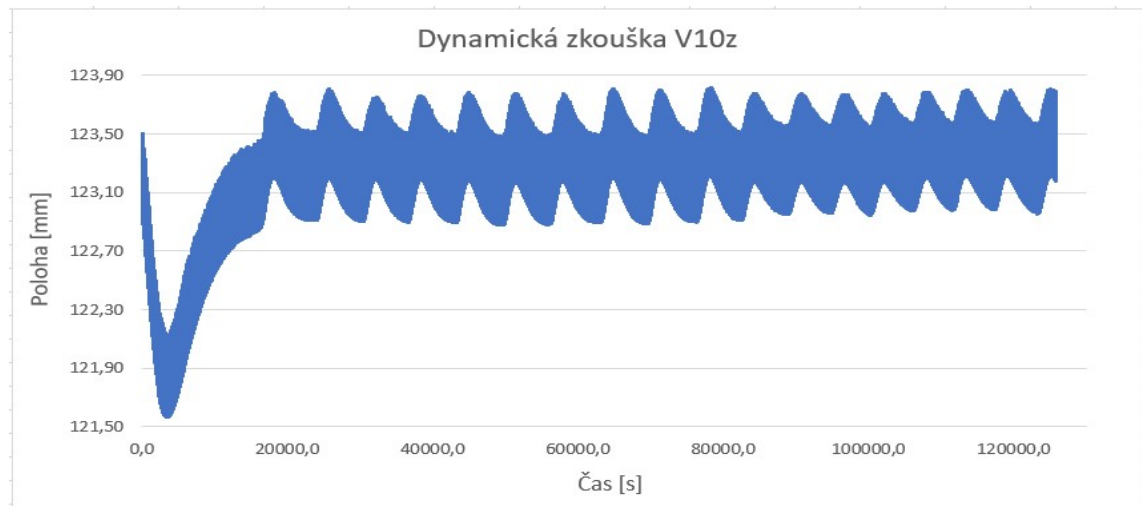
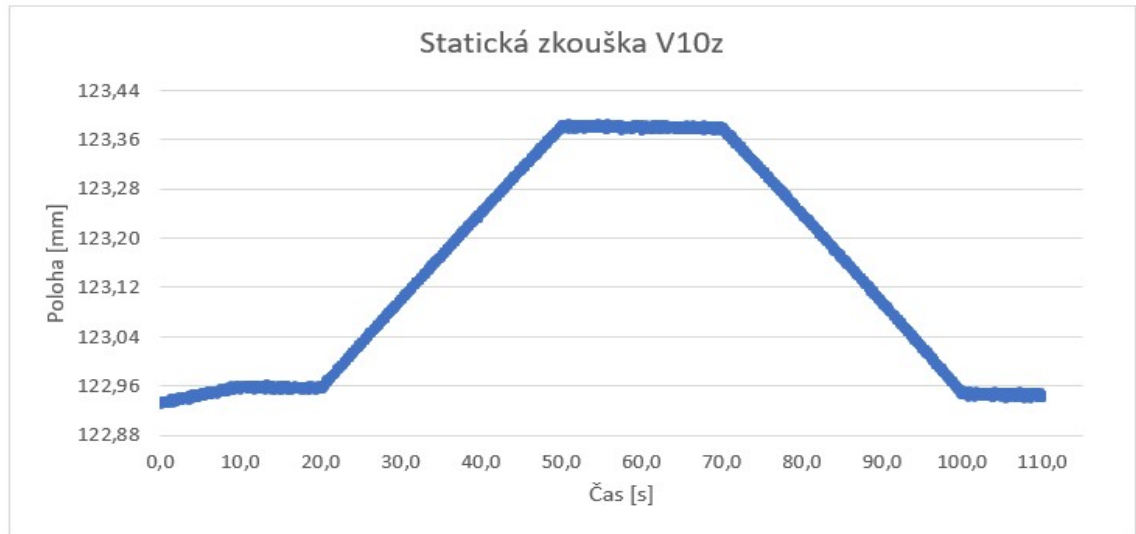




DZS-P-01-19

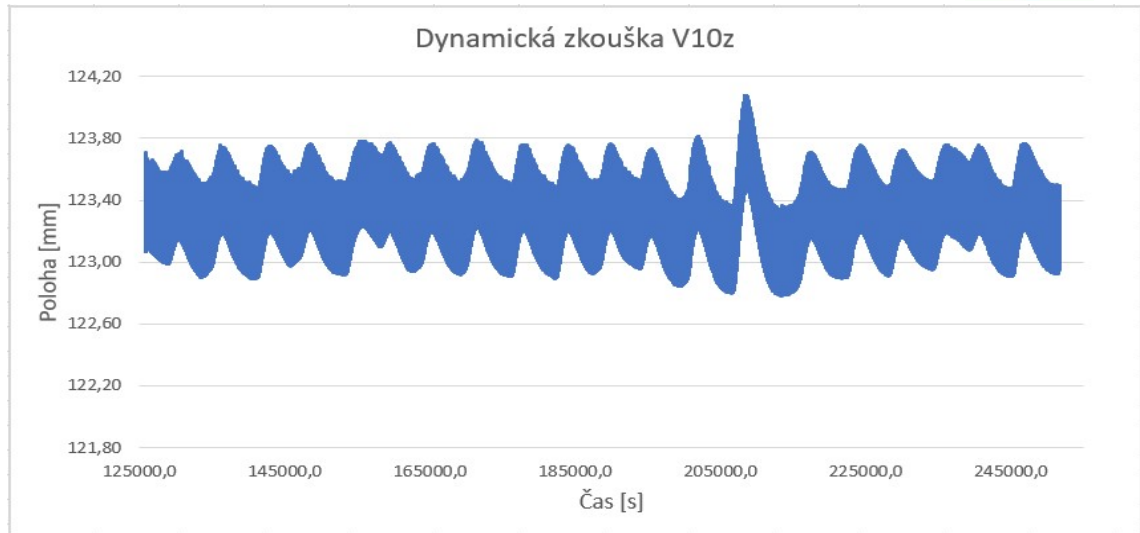
V10z – 5891000 + cyklů

$F_{\max} = 9 \text{ kN}$, $F_{\min} = 1 \text{ kN}$, $\text{Ampl.} = 4 \text{ kN}$, $\text{Offset.} = 5 \text{ kN}$





DZS-P-01-19

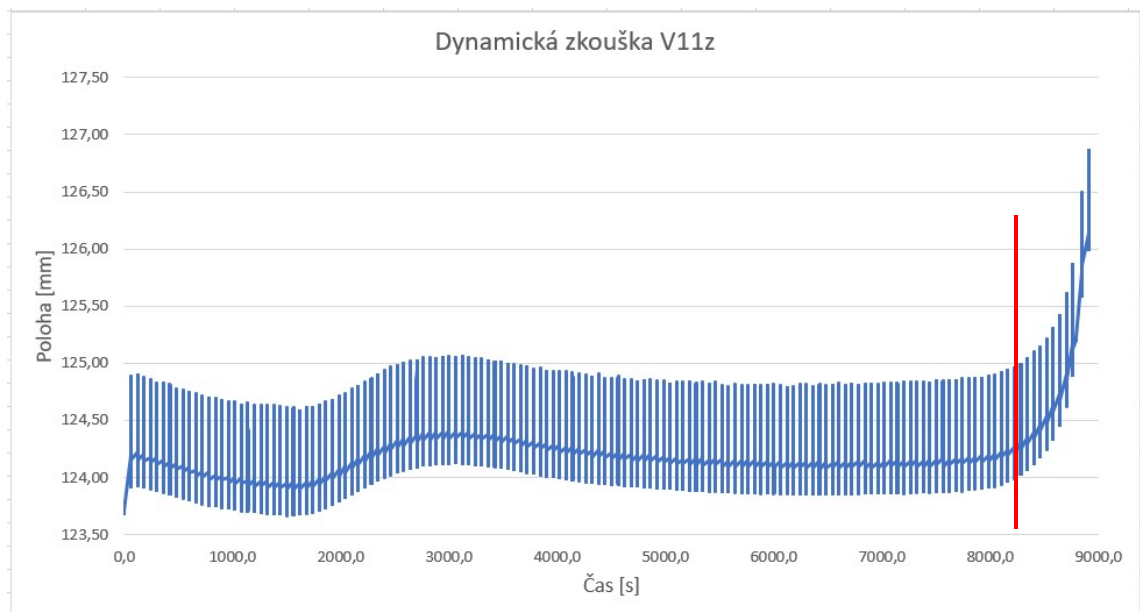
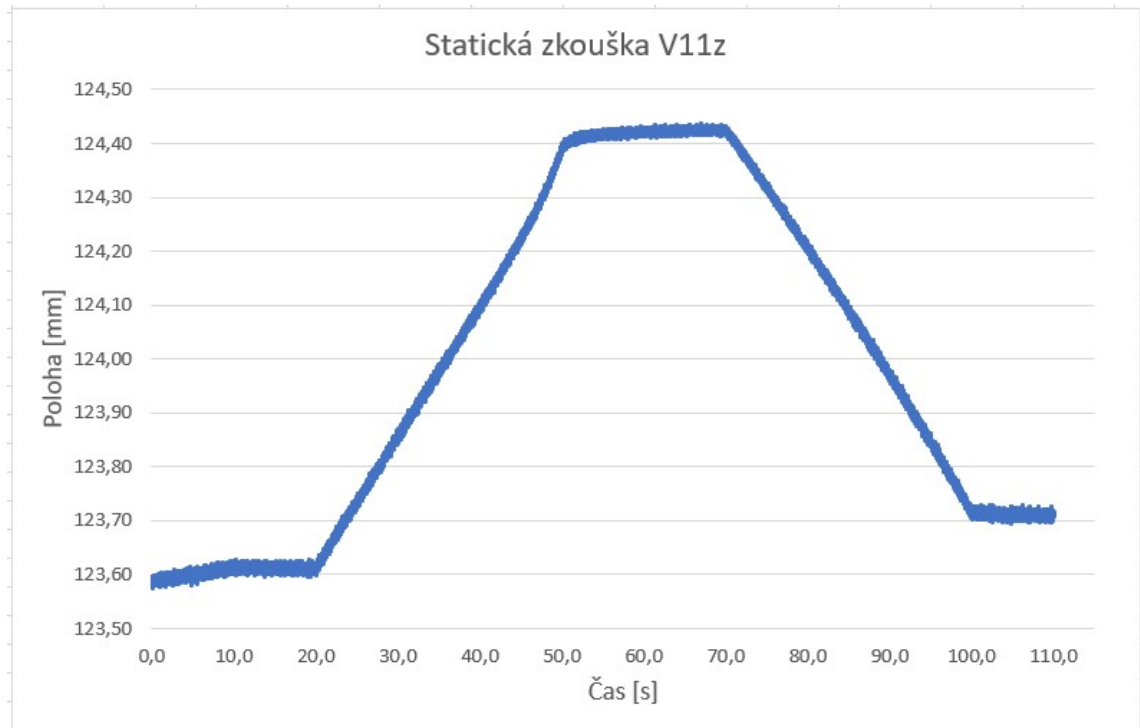




DZS-P-01-19

V11z – 82800 cyklů

$F_{\max} = 15 \text{ kN}$, $F_{\min} = 1 \text{ kN}$, $\text{Ampl.} = 7 \text{ kN}$, $\text{Offset.} = 8 \text{ kN}$

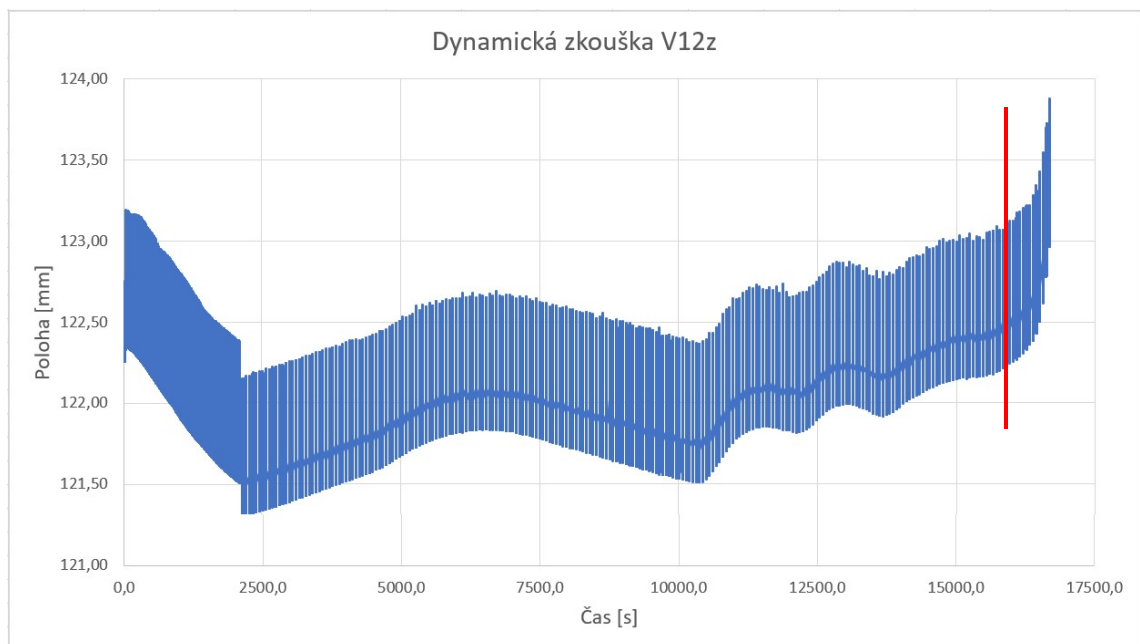
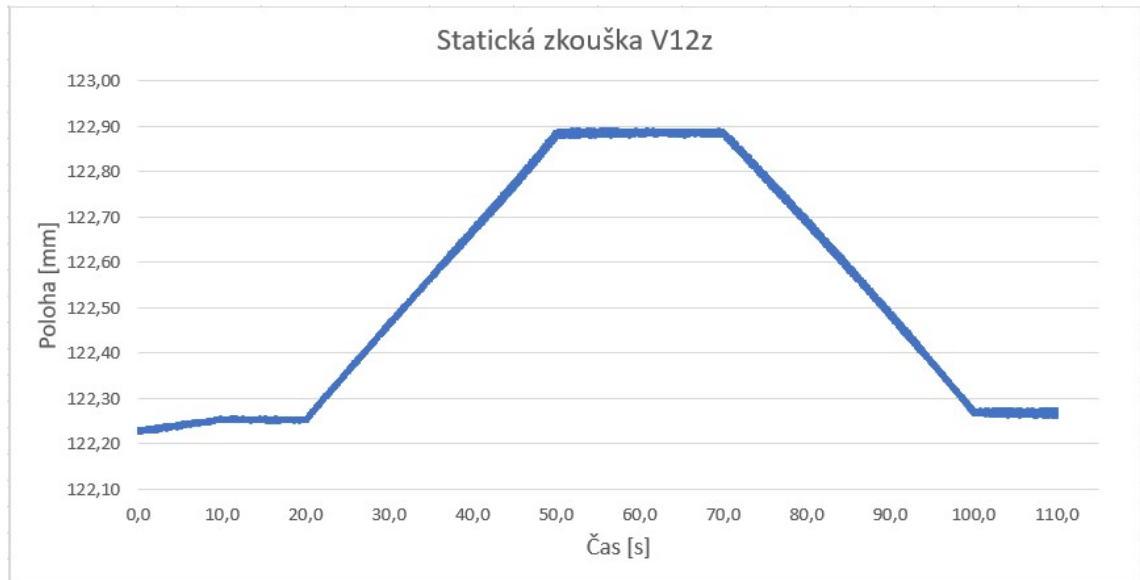




DZS-P-01-19

V12z – 163770 cyklů

$F_{\max} = 13 \text{ kN}$, $F_{\min} = 1 \text{ kN}$, $\text{Ampl.} = 6 \text{ kN}$, $\text{Offset.} = 7 \text{ kN}$

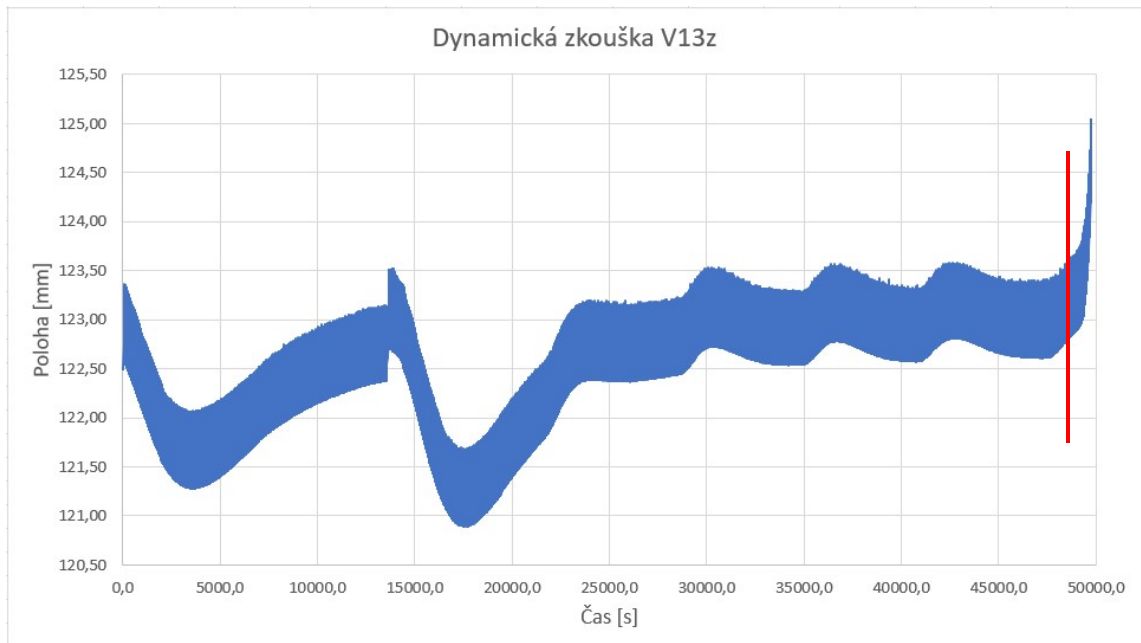
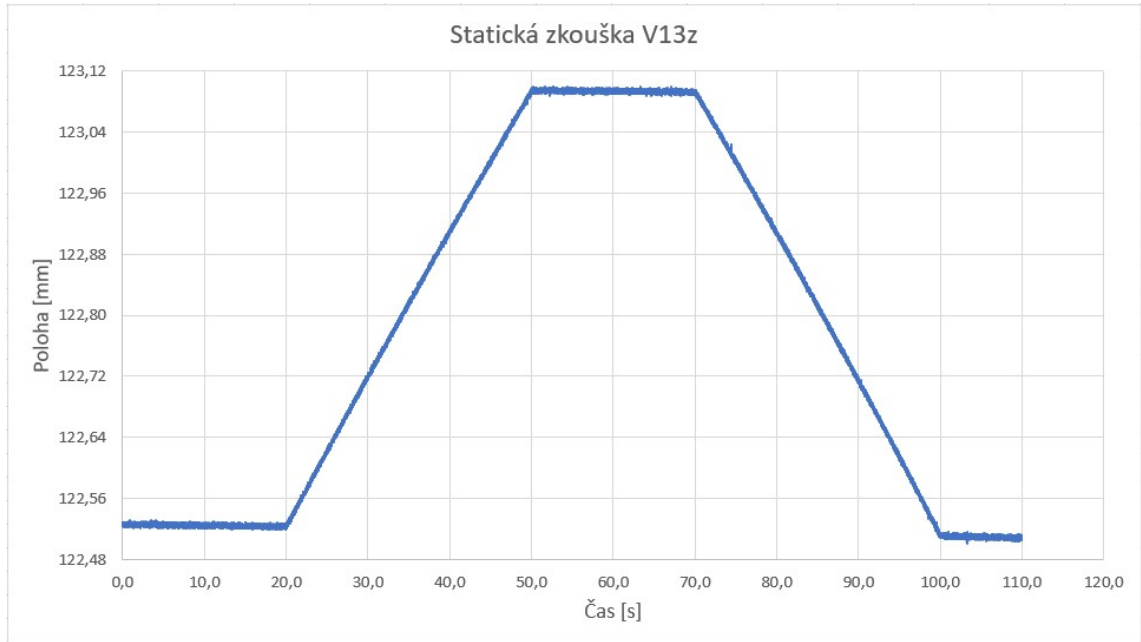




DZS-P-01-19

V13z – 492900 cyklů

$F_{\max} = 12 \text{ kN}$, $F_{\min} = 1 \text{ kN}$, $\text{Ampl.} = 5,5 \text{ kN}$, $\text{Offset.} = 6,5 \text{ kN}$

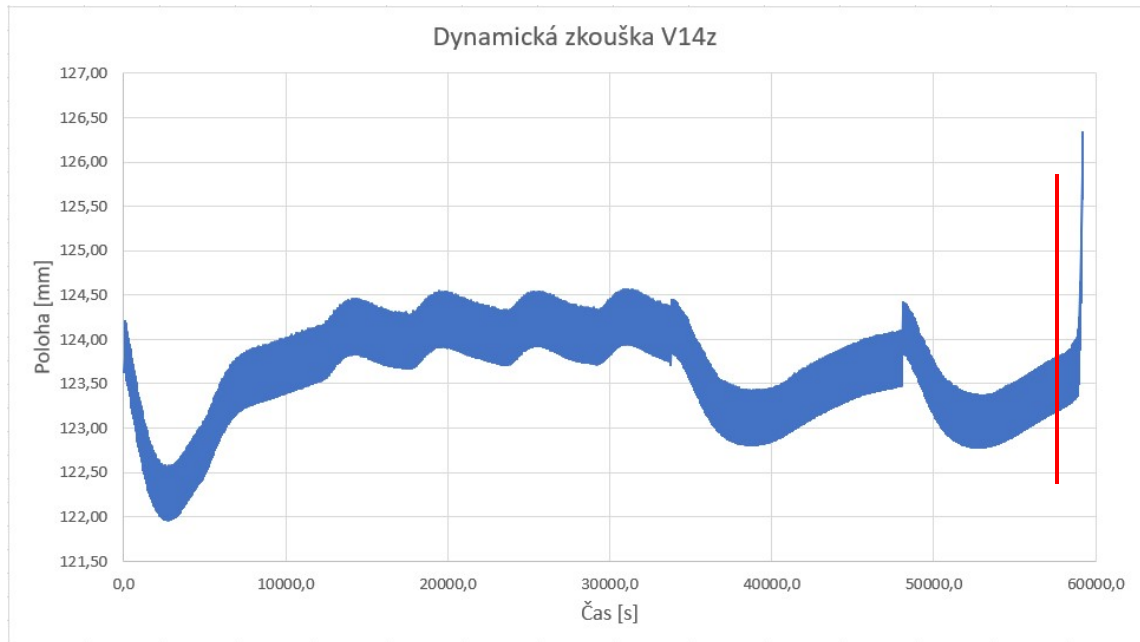




DZS-P-01-19

V14z – 589810 cyklů

$F_{\max} = 11 \text{ kN}$, $F_{\min} = 1 \text{ kN}$, $\text{Ampl.} = 5 \text{ kN}$, $\text{Offset.} = 6 \text{ kN}$

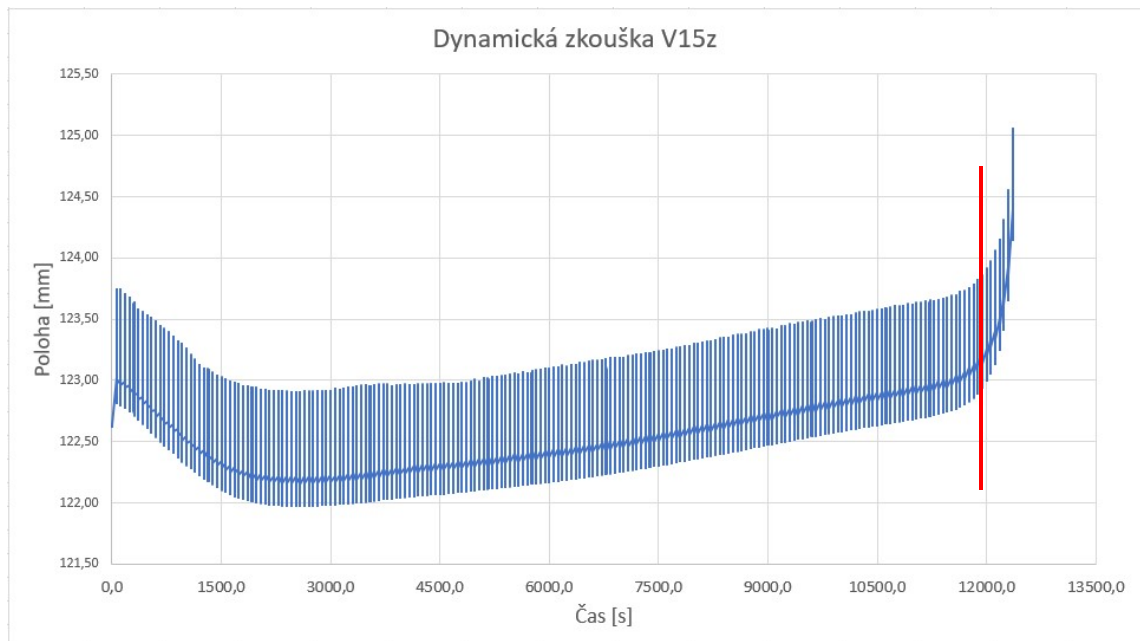
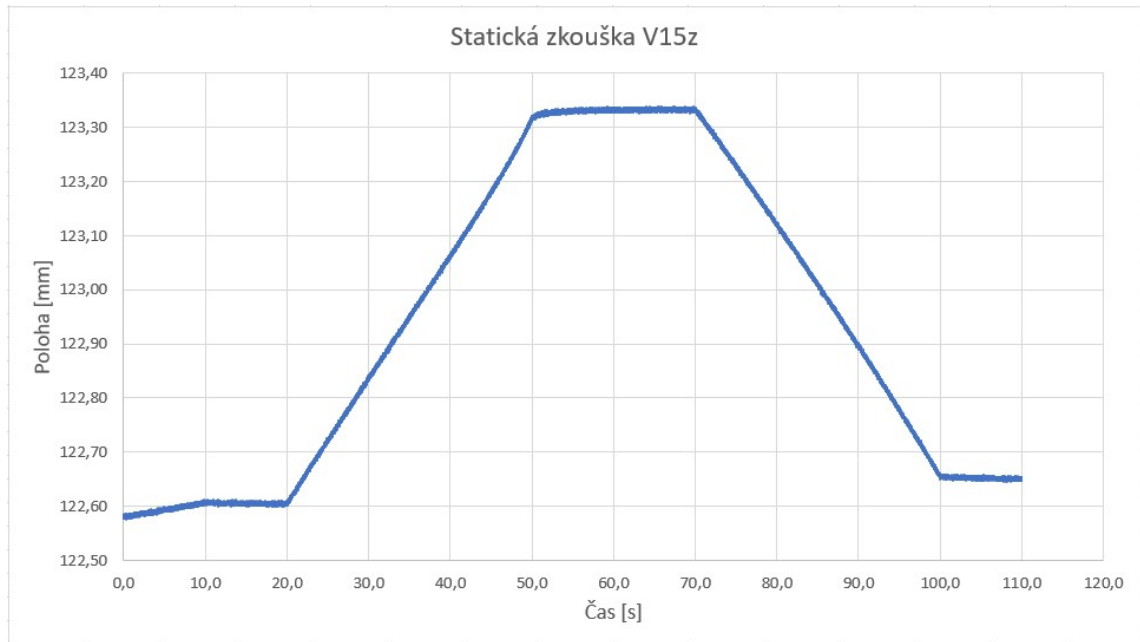




DZS-P-01-19

V15z – 120000 cyklů

$F_{\max} = 14 \text{ kN}$, $F_{\min} = 1 \text{ kN}$, $\text{Ampl.} = 6,5 \text{ kN}$, $\text{Offset.} = 7,5 \text{ kN}$

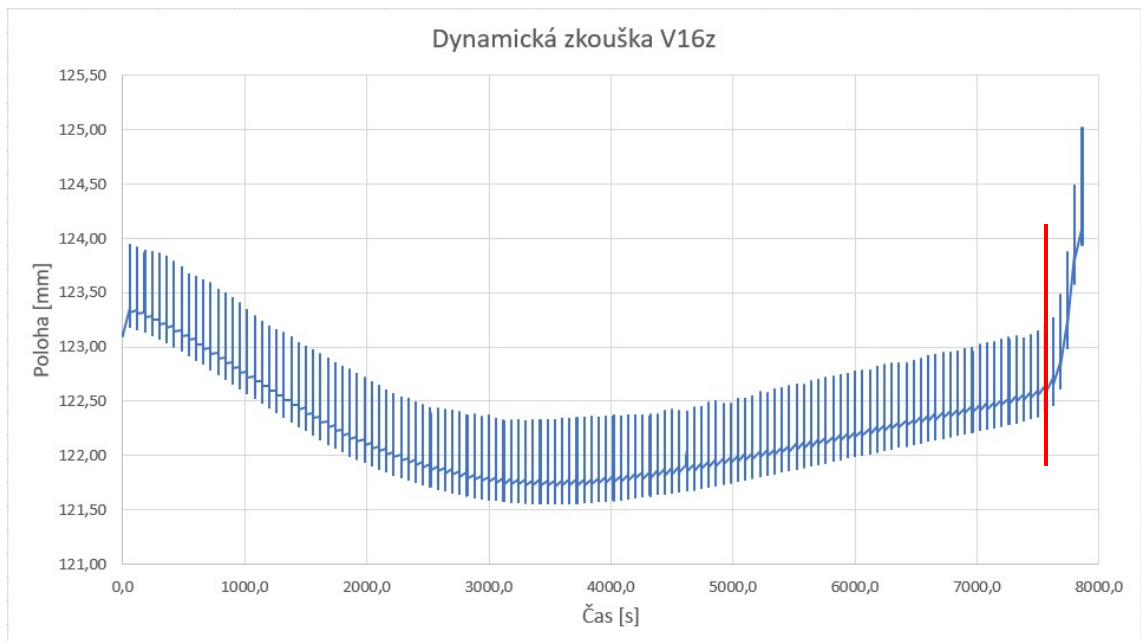
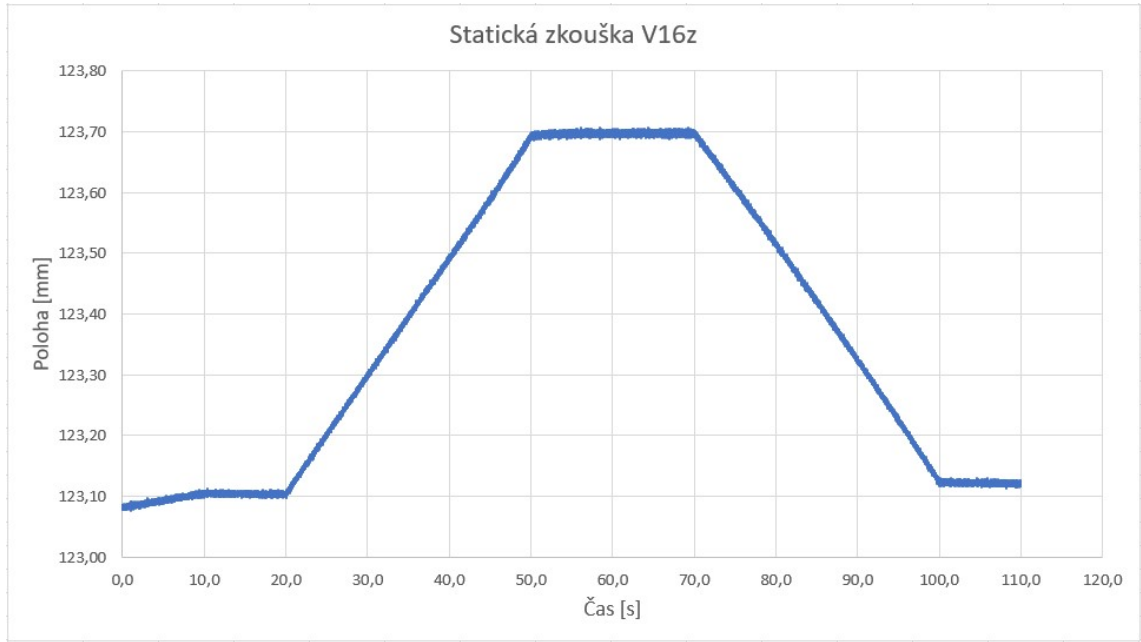




DZS-P-01-19

V16z – 76200 cyklů

$F_{\max} = 13,5 \text{ kN}$, $F_{\min} = 1 \text{ kN}$, $\text{Ampl.} = 6,25 \text{ kN}$, $\text{Offset.} = 7,25 \text{ kN}$

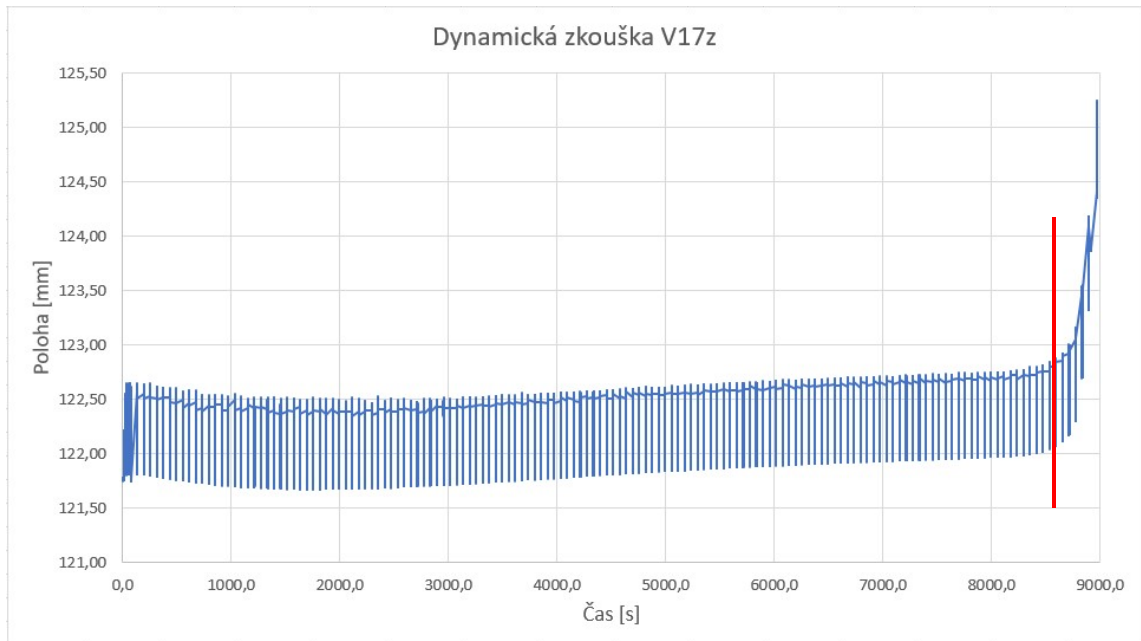
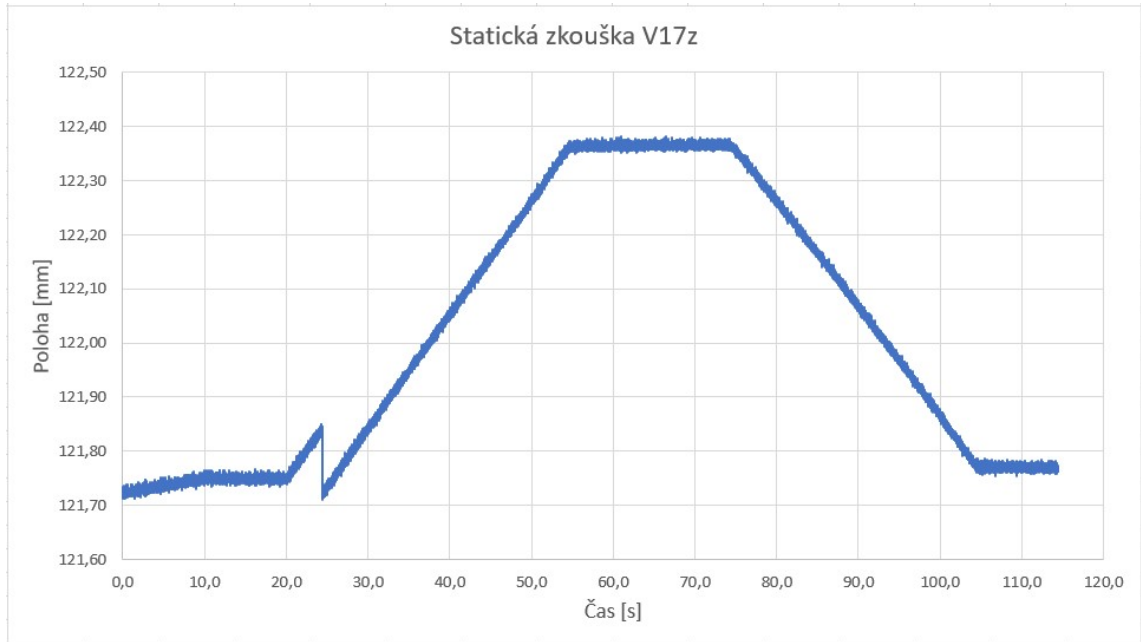




DZS-P-01-19

V17z – 87120 cyklů

$F_{\max} = 12,5 \text{ kN}$, $F_{\min} = 1 \text{ kN}$, $\text{Ampl.} = 5,75 \text{ kN}$, $\text{Offset.} = 6,75 \text{ kN}$

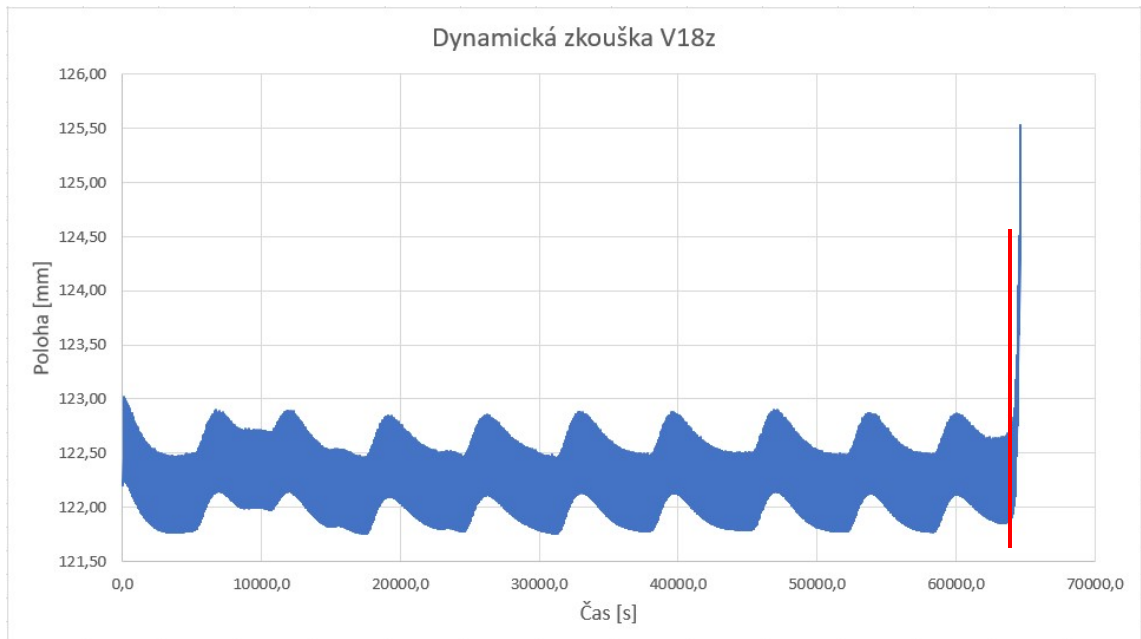
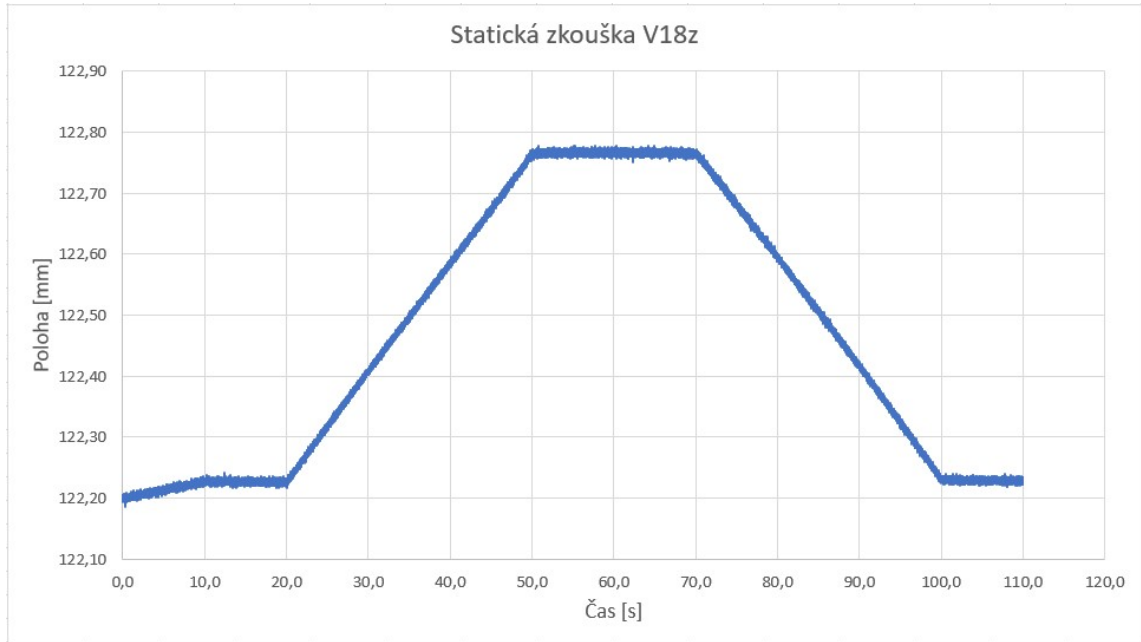




DZS-P-01-19

V18z – 643200 cyklů

$F_{\max} = 10,5 \text{ kN}$, $F_{\min} = 1 \text{ kN}$, $\text{Ampl.} = 4,75 \text{ kN}$, $\text{Offset.} = 5,75 \text{ kN}$

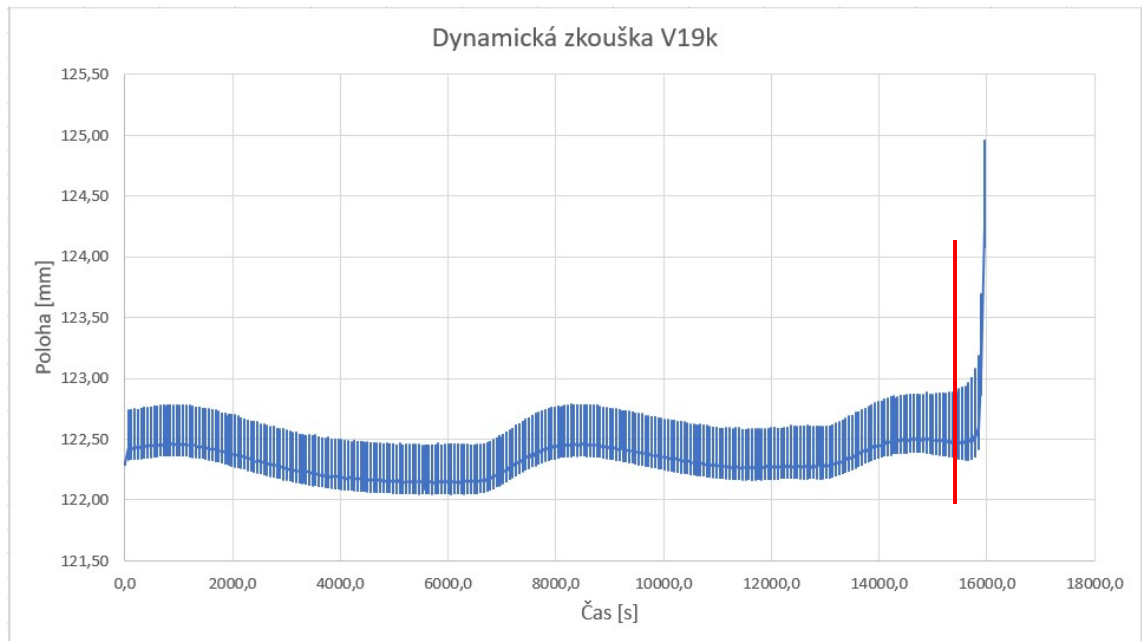
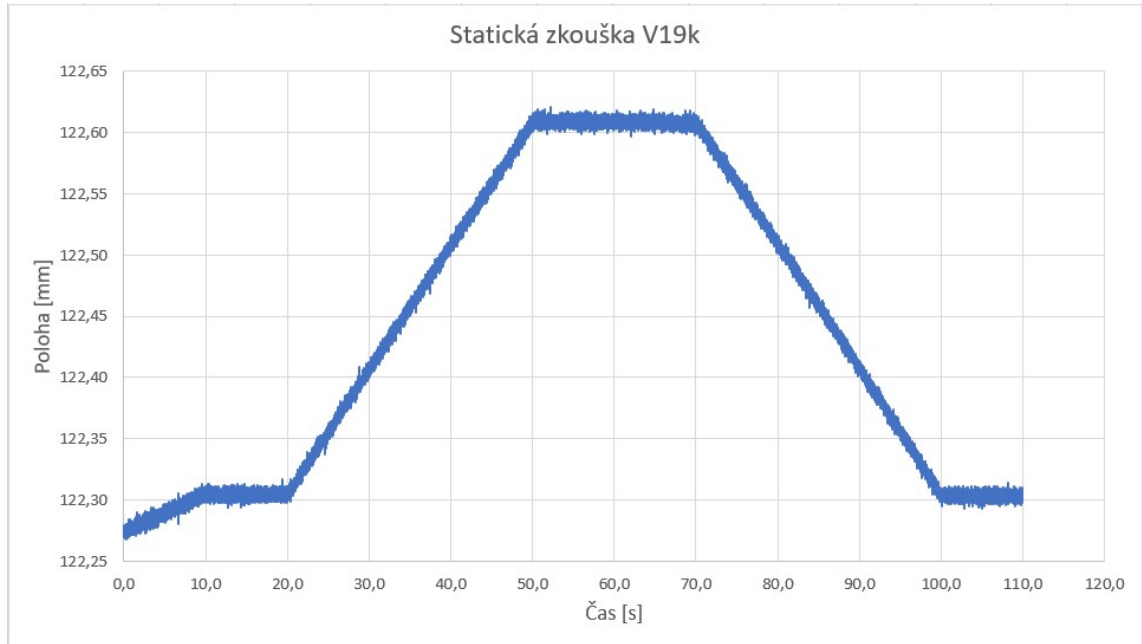




DZS-P-01-19

V19k – 156000 cyklů

$F_{\max} = 6 \text{ kN}$, $F_{\min} = 1 \text{ kN}$, $\text{Ampl.} = 2,5 \text{ kN}$, $\text{Offset.} = 3,5 \text{ kN}$

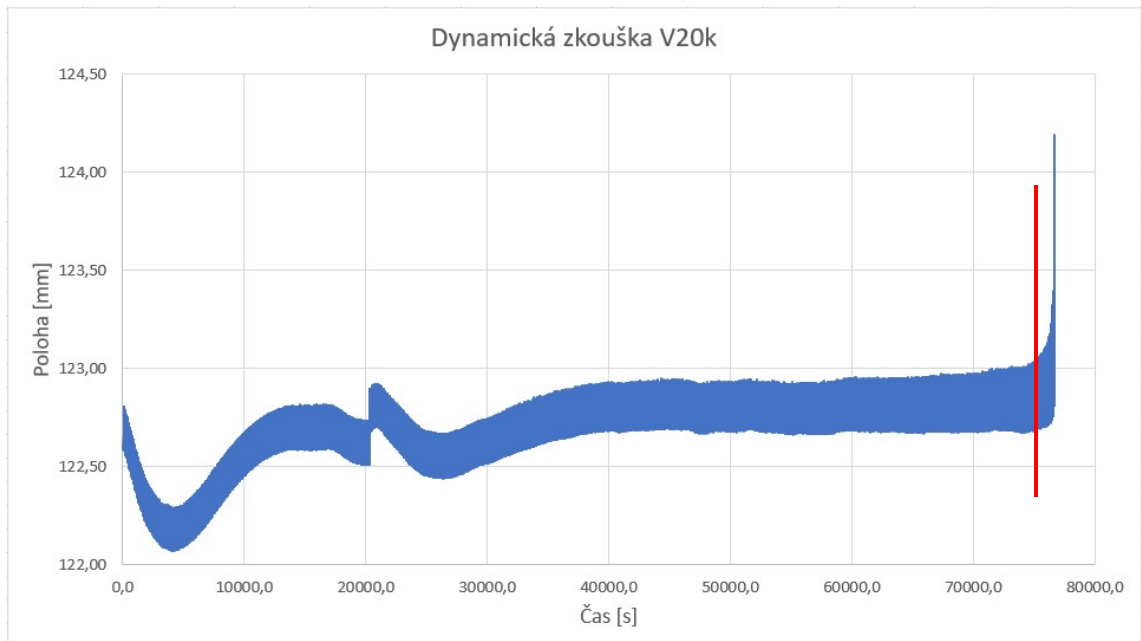
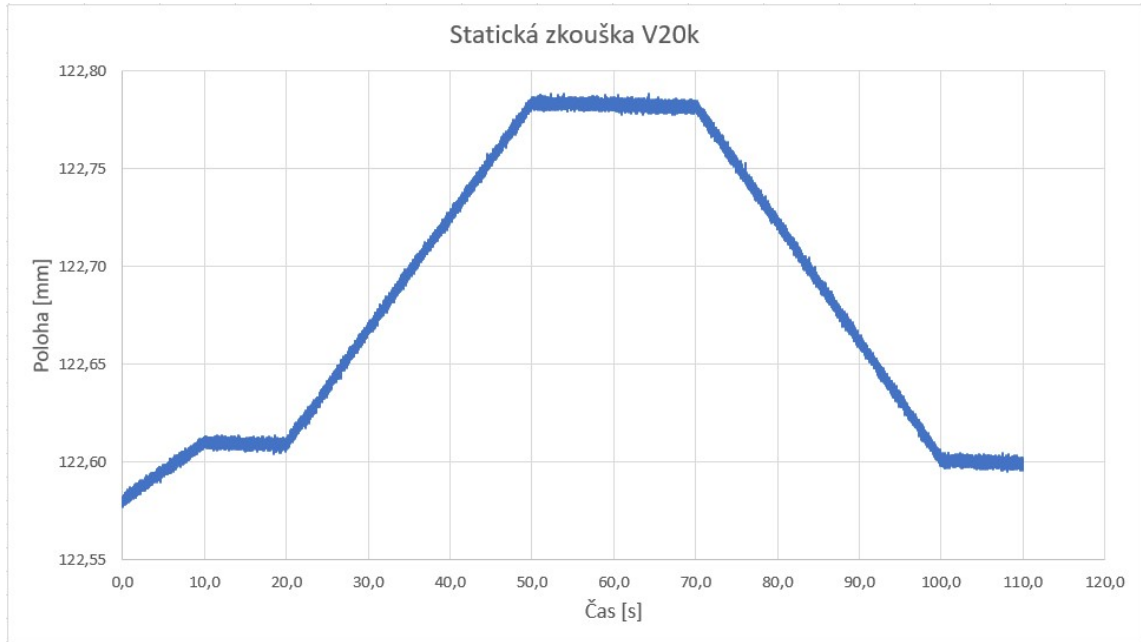




DZS-P-01-19

V20k – 755640 cyklů

$F_{\max} = 4 \text{ kN}$, $F_{\min} = 1 \text{ kN}$, $\text{Ampl.} = 1,5 \text{ kN}$, $\text{Offset.} = 2,5 \text{ kN}$

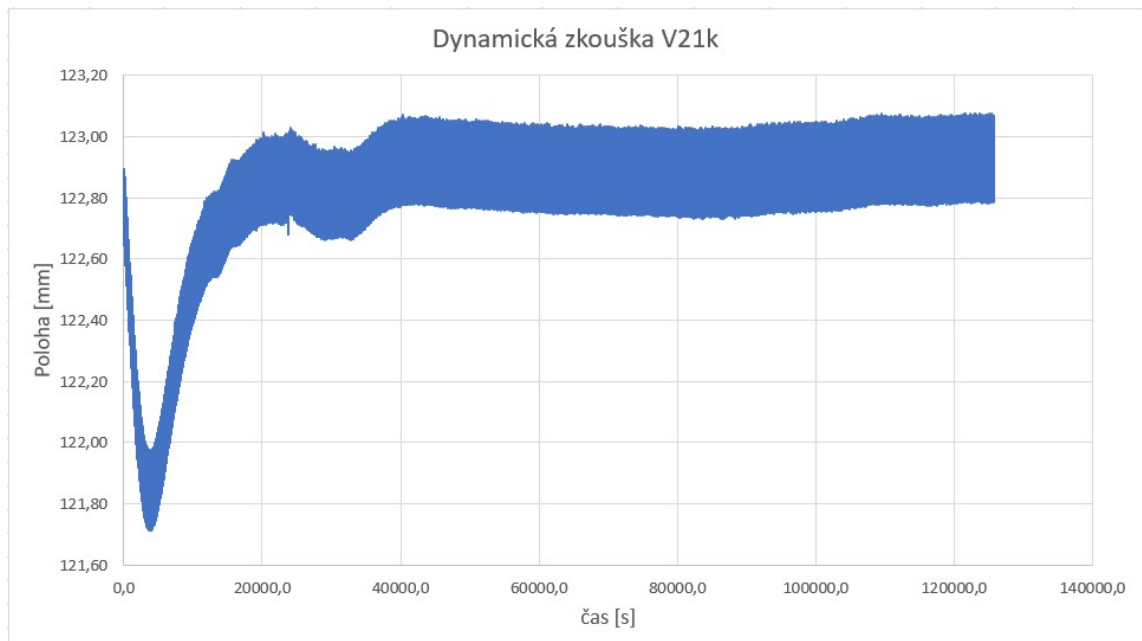
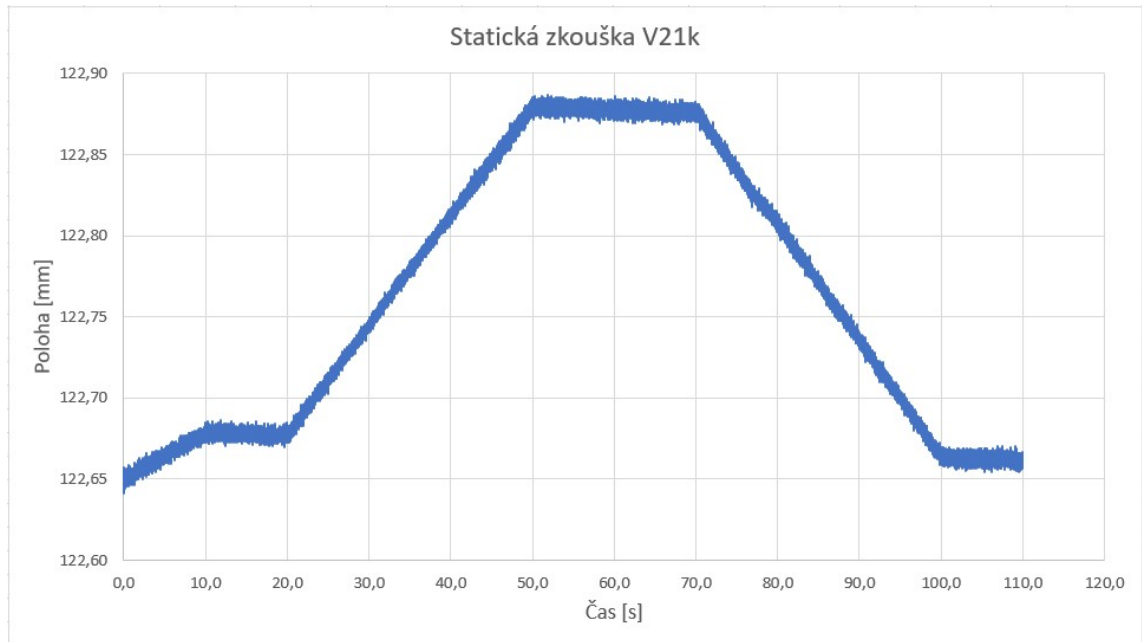




DZS-P-01-19

V21k – 2076000 + cyklů

$F_{max} = 4,5 \text{ kN}$, $F_{min} = 1 \text{ kN}$, $Ampl. = 1,75 \text{ kN}$, $Offset. = 2,75 \text{ kN}$

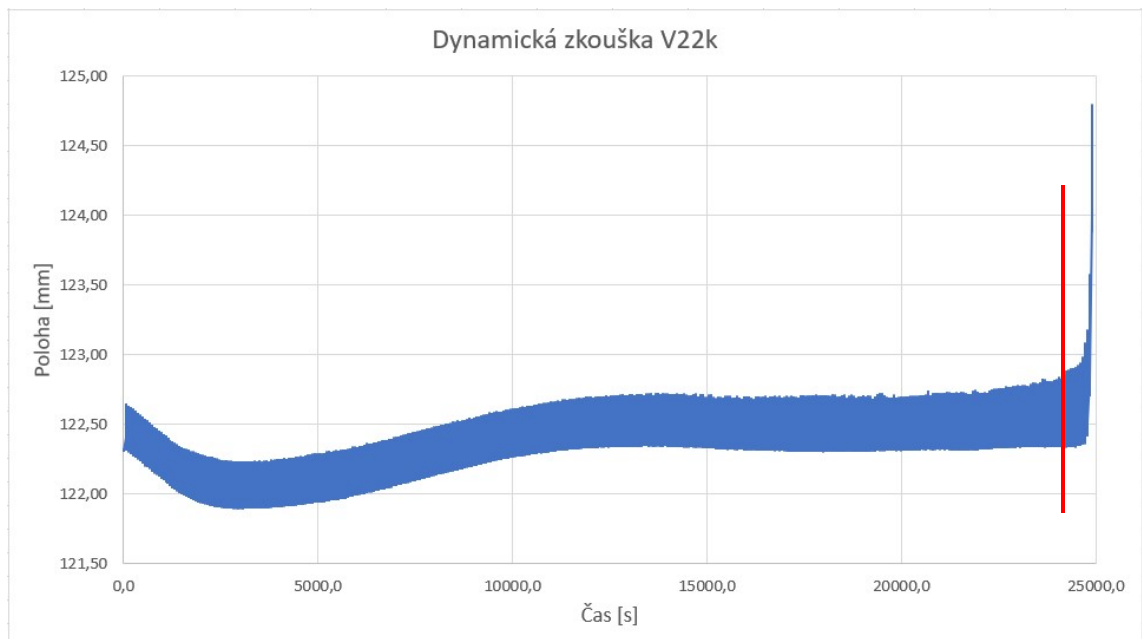
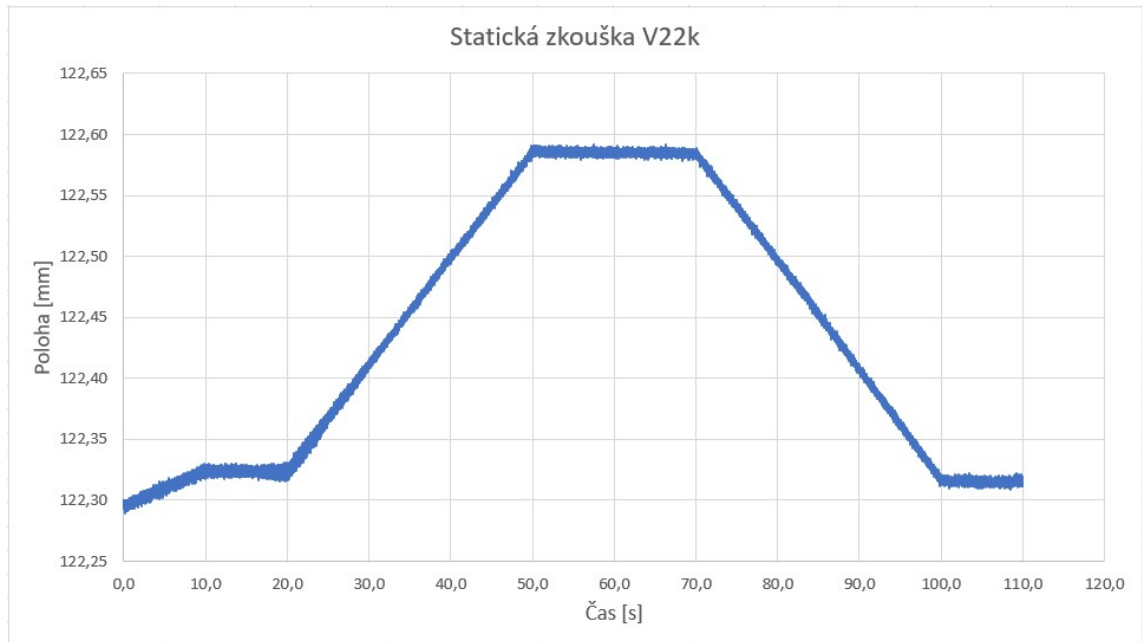




DZS-P-01-19

V22k – 242400 cyklů

$F_{\max} = 5,5 \text{ kN}$, $F_{\min} = 1 \text{ kN}$, $\text{Ampl.} = 2,25 \text{ kN}$, $\text{Offset.} = 3,25 \text{ kN}$

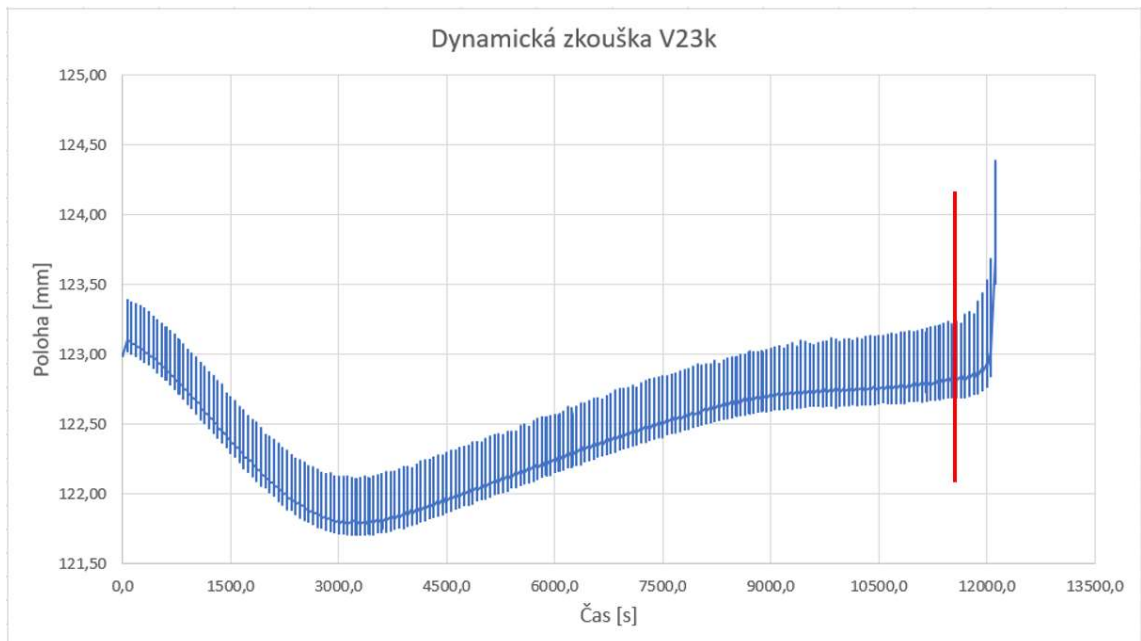
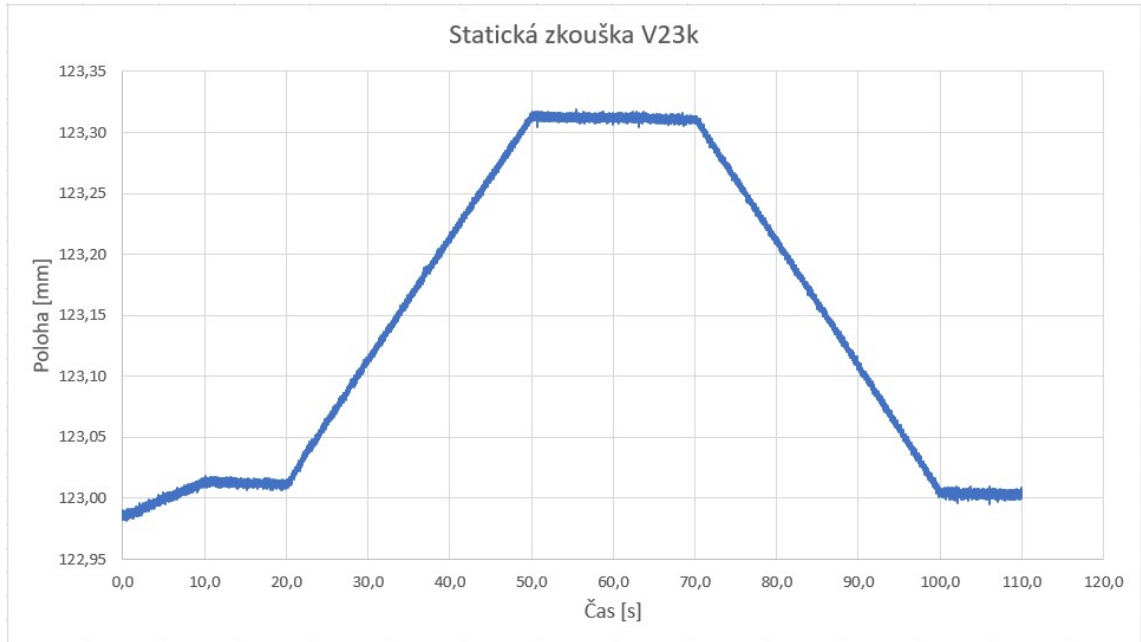




DZS-P-01-19

V23k – 116400 cyklů

$F_{\max} = 6,5 \text{ kN}$, $F_{\min} = 1 \text{ kN}$, $\text{Ampl.} = 2,75 \text{ kN}$, $\text{Offset.} = 3,75 \text{ kN}$

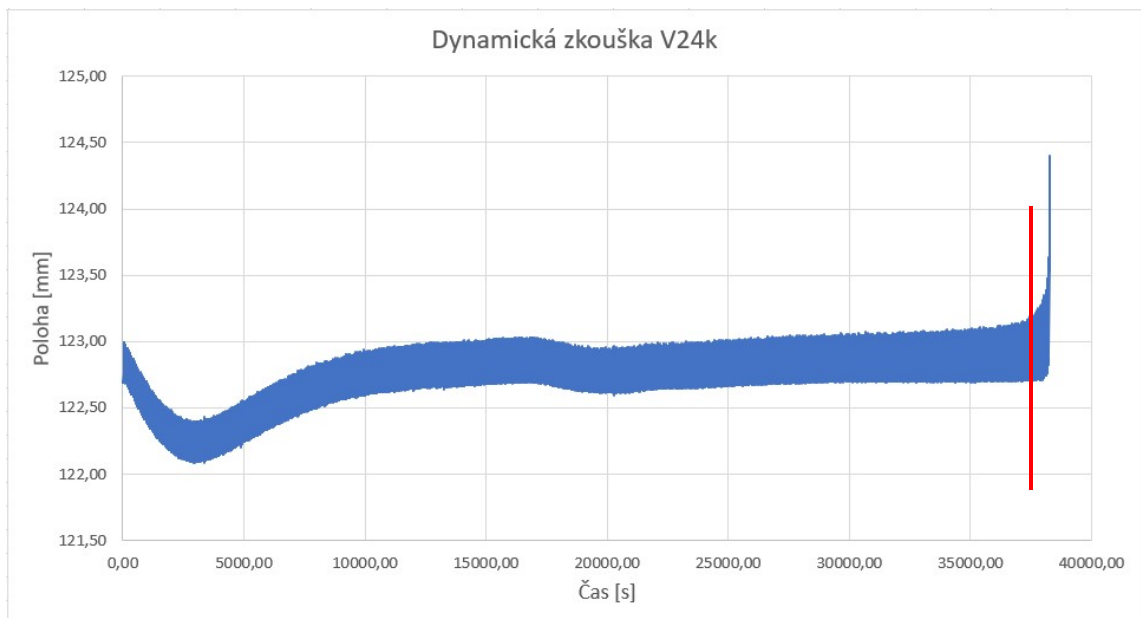
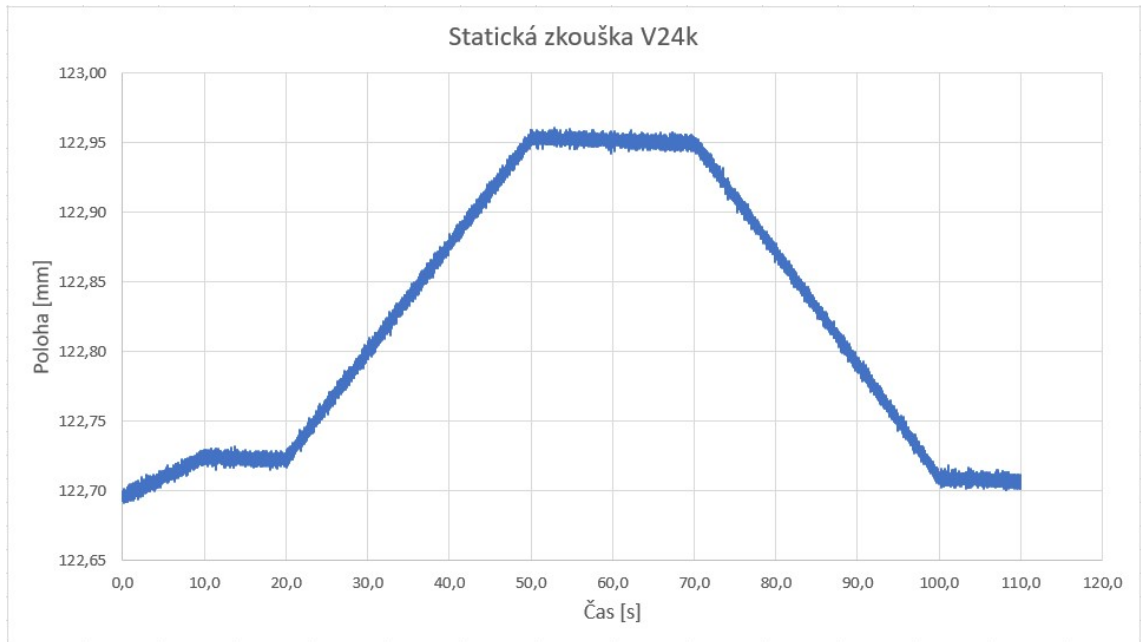




DZS-P-01-19

V24k – 374400 cyklů

$F_{\max} = 5 \text{ kN}$, $F_{\min} = 1 \text{ kN}$, $\text{Ampl.} = 2 \text{ kN}$, $\text{Offset.} = 3 \text{ kN}$





DZS-P-01-19

6. Vyhodnocení

Zatížení jednotlivých vzorků bylo během zkoušek měněno dle dosaženého počtu cyklů u předchozích vzorků.

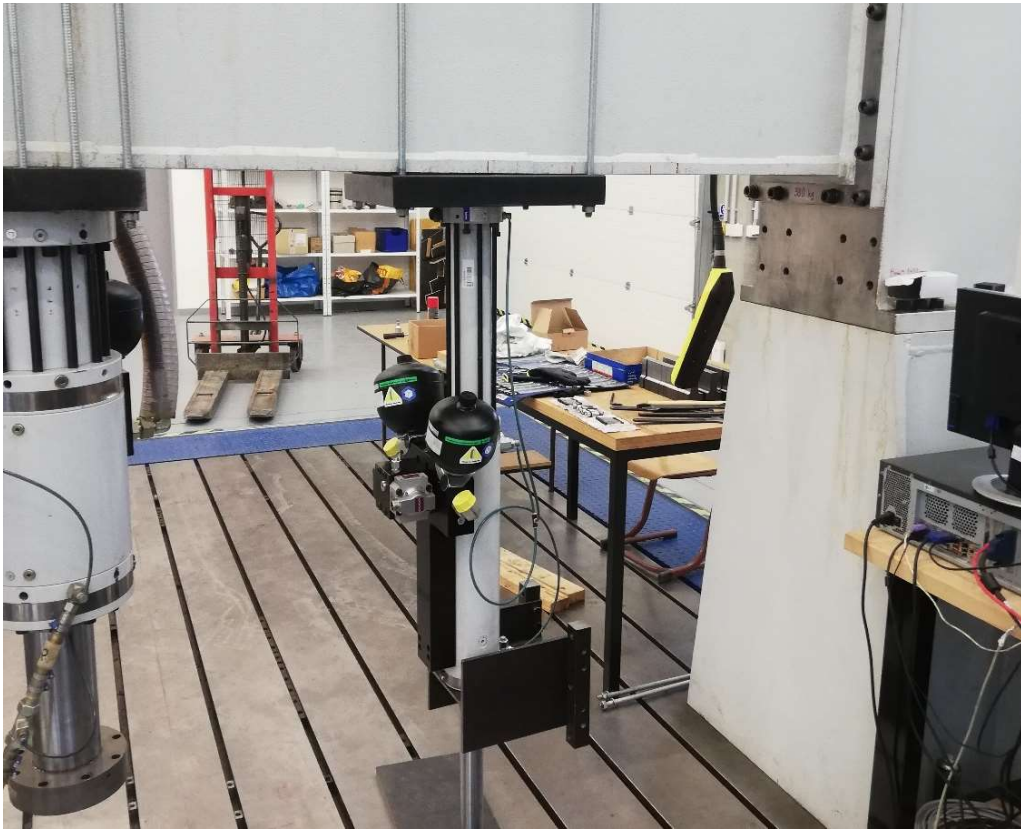
| Vzorek | max. síla válce při zatěžování [kN] | min. síla válce při zatěžování [kN] | N cyklů | Vzorek | max. síla válce při zatěžování [kN] | min. síla válce při zatěžování [kN] | N cyklů |
|--------|--|--|----------|--------|--|--|----------|
| V01n | 15 | 1 | 3800000+ | V13z | 12 | 1 | 492900 |
| V02k | 15 | 1 | 3597 | V14z | 11 | 1 | 589810 |
| V03n | 12 | 1 | 17700 | V15z | 14 | 1 | 120000 |
| V04n | 9 | 1 | 28230 | V16z | 13,5 | 1 | 76200 |
| V05n | 6 | 1 | 346800 | V17z | 12,5 | 1 | 87120 |
| V06n | 4 | 1 | 3376100+ | V18z | 10,5 | 1 | 643200 |
| V07n | 7 | 1 | 94200 | V19k | 6 | 1 | 156000 |
| V08n | 5,5 | 1 | 358270 | V20k | 4 | 1 | 755640 |
| V09n | 5 | 1 | 1259400 | V21k | 4,5 | 1 | 2076000+ |
| V10z | 9 | 1 | 5891000+ | V22k | 5,5 | 1 | 242400 |
| V11z | 15 | 1 | 82800 | V23k | 6,5 | 1 | 116400 |
| V12z | 13 | 1 | 163770 | V24k | 5 | 1 | 374400 |

Průběh zatěžování byl cyklického charakteru. Síla pulzovala v tahu.

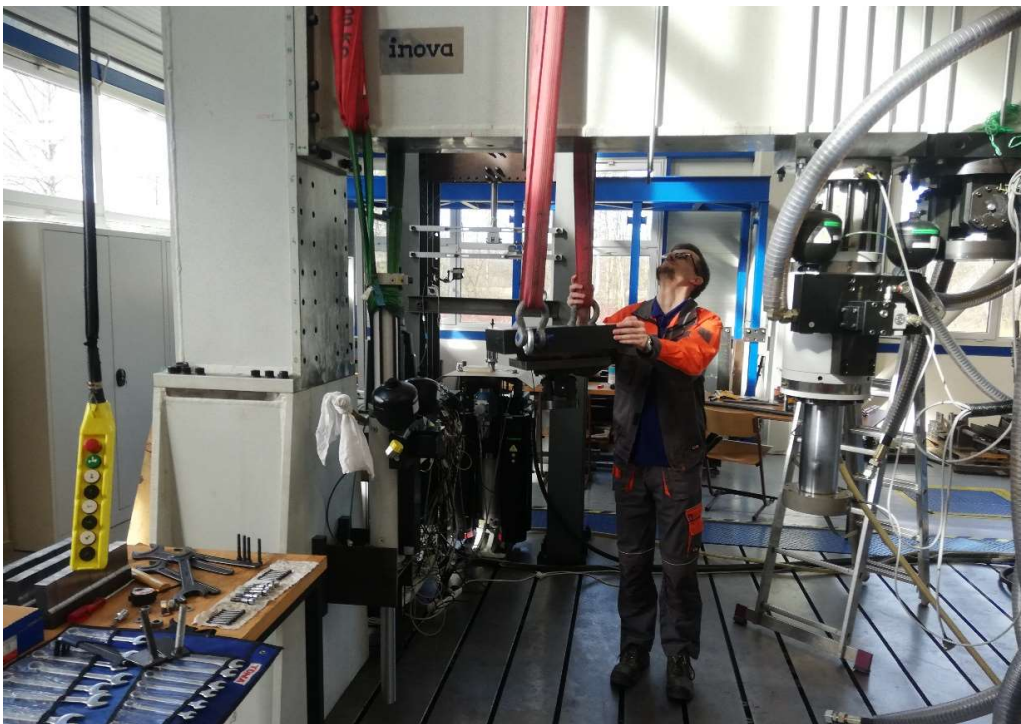
Hodnoty PID při zkoušce byly následující. Při manipulaci $P = 0,2$; $I = 0,0$; $D = 0,0$. Při testu $P = 0,5$; $I = 0,5$; $D = 0,0$.

Příloha C

Fotodokumentace



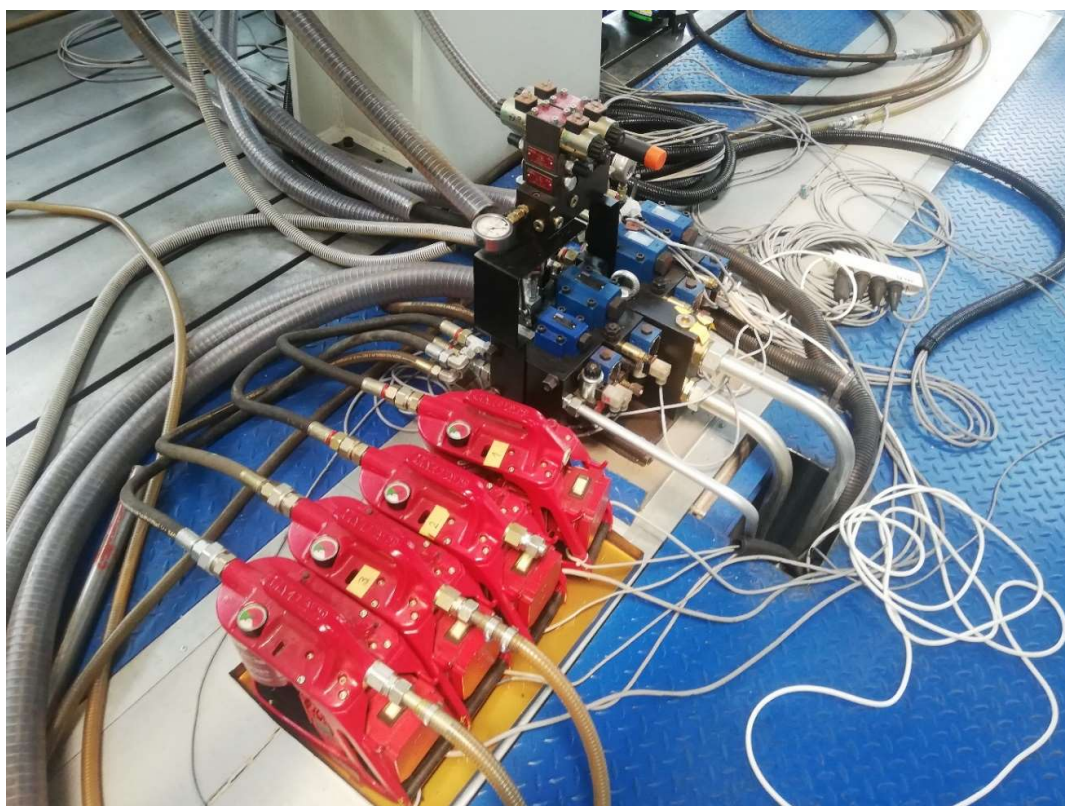
1: Válec AH 20 - 400 při montáži



2: Montáž podložky s kloubem ke stavu INOVA



3: Dynamický stav INOVA



4: Pohled na rozvod oleje a odsávací čerpadla



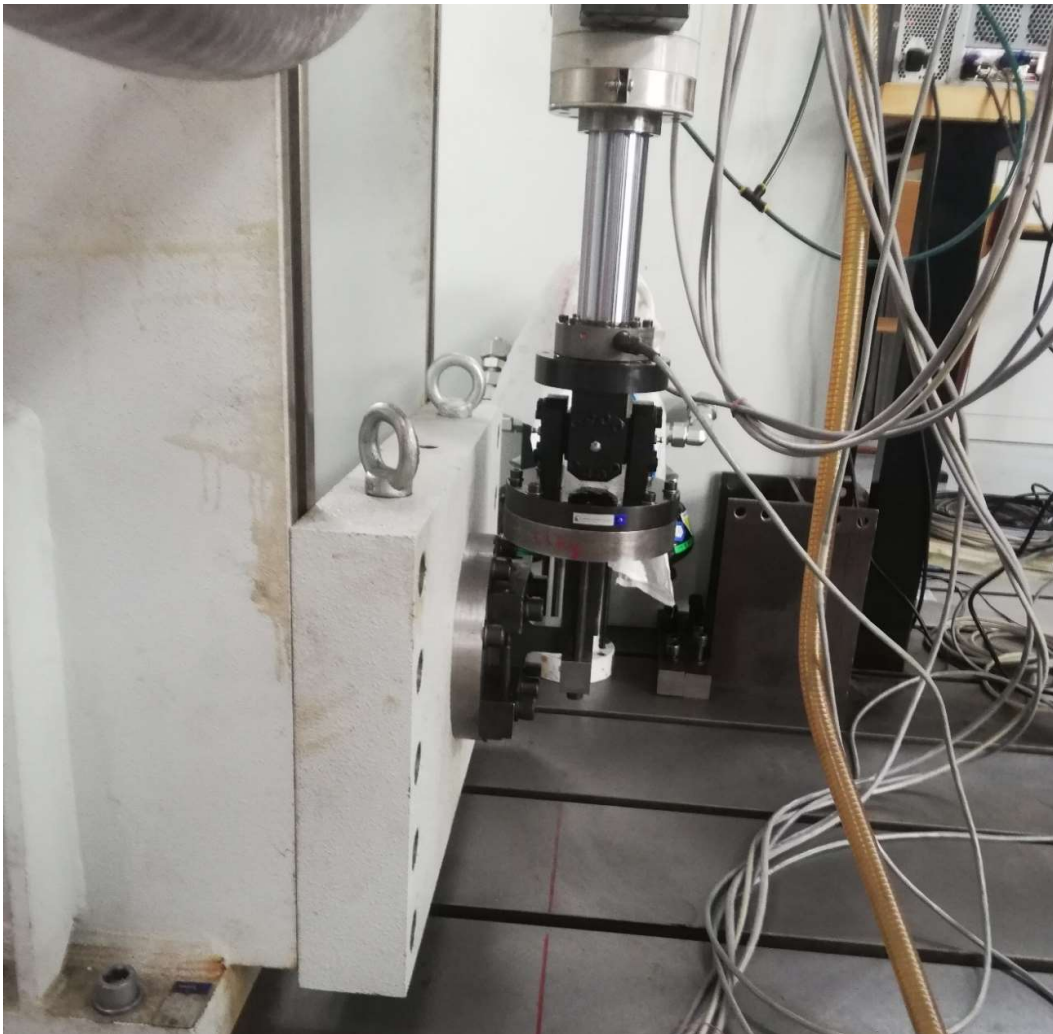
5: SCA deska na válci se servoventily Moog a přívodní hadicí



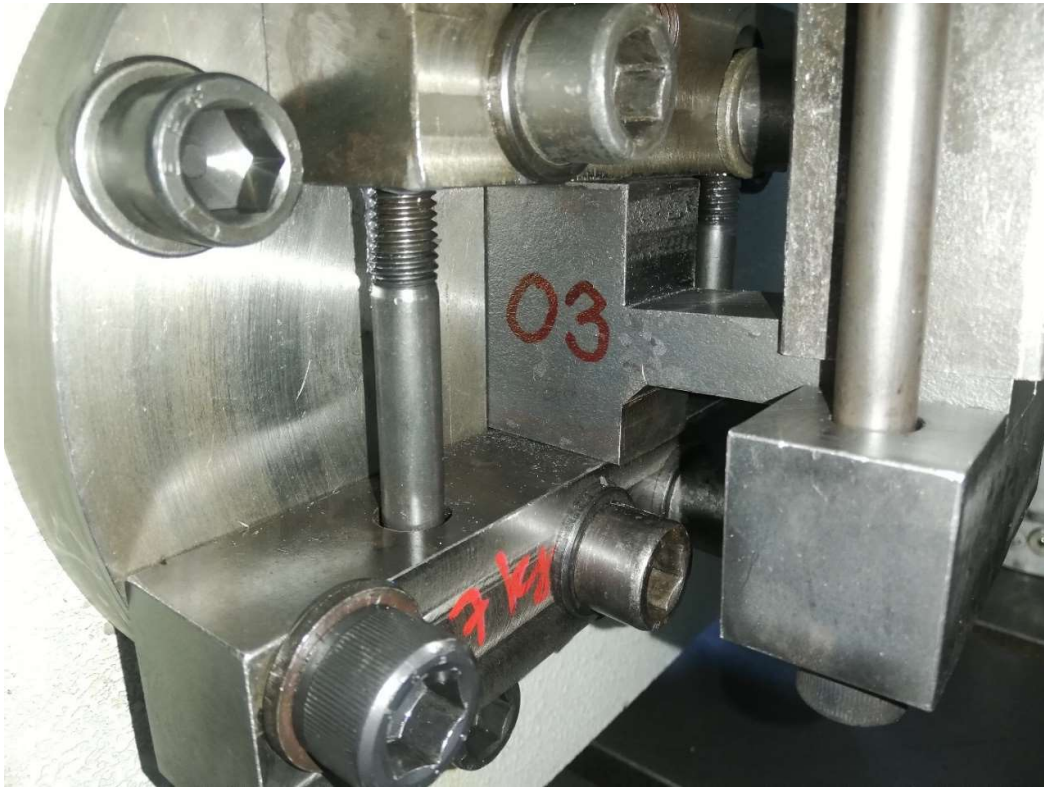
6: Hydroagregáty



7: Upevnění s první variantou vzorku



8: Pohled na upevnění se vzorkem při testu



9: Vzorek v upevnění s viditelnou únavovou trhlinou



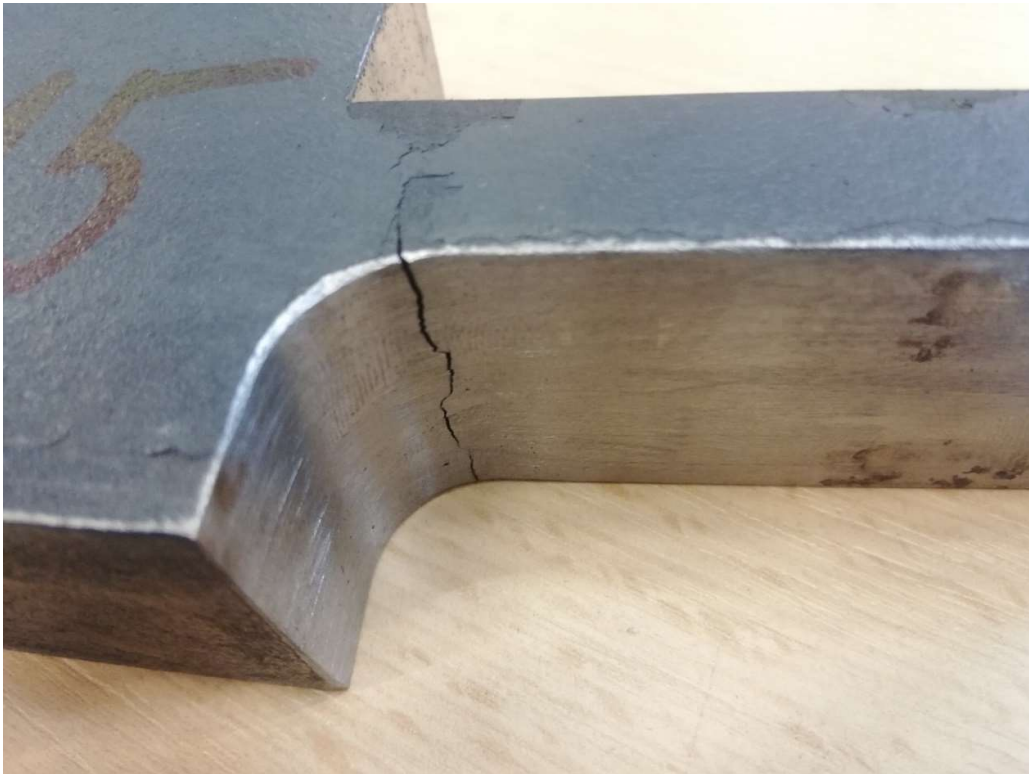
10: Poškozený vzorek s náběhem



11: Přetržený vzorek č. 8



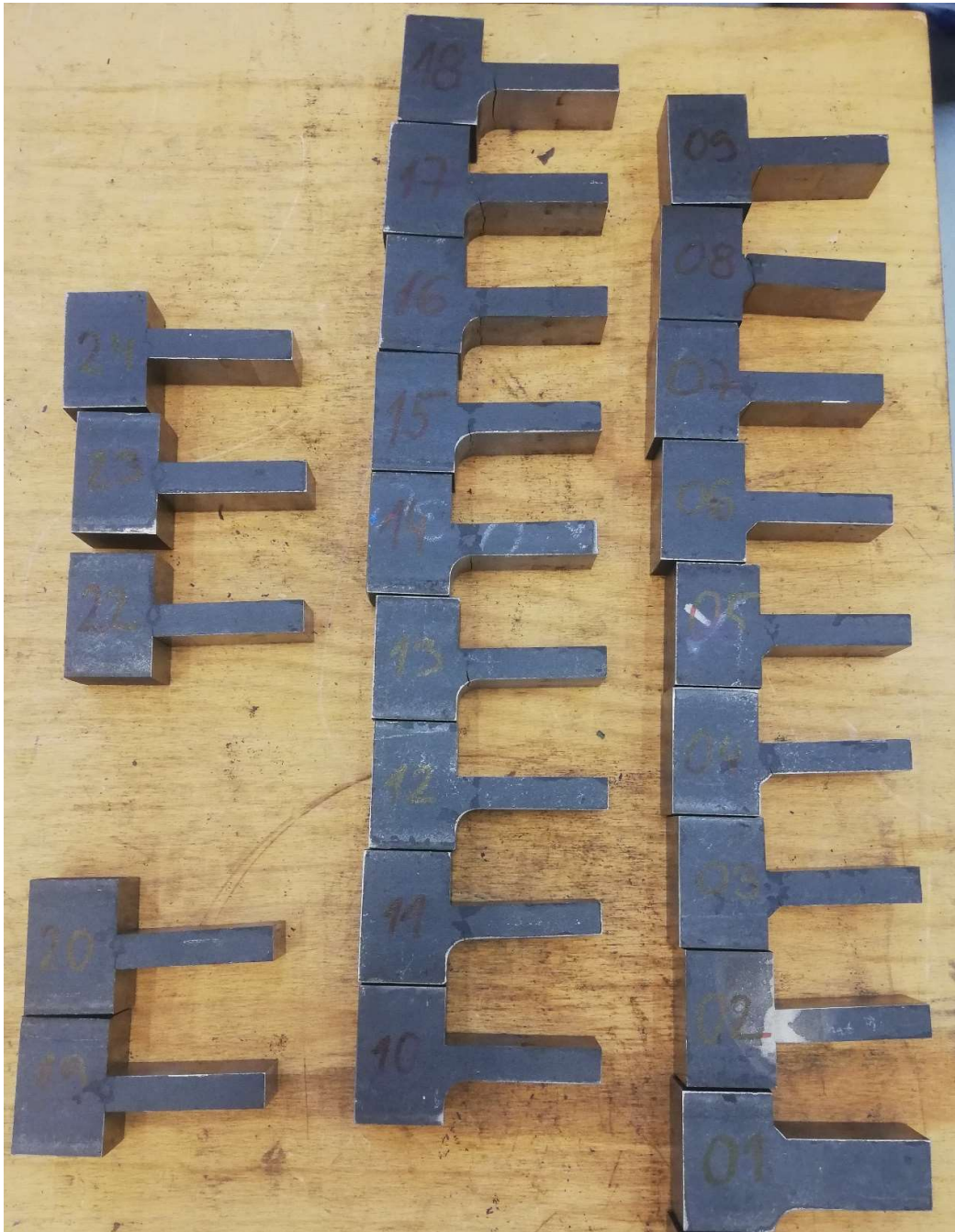
12: Lomová plocha vzorku č. 8



13: Poškozený vzorek se zaoblením



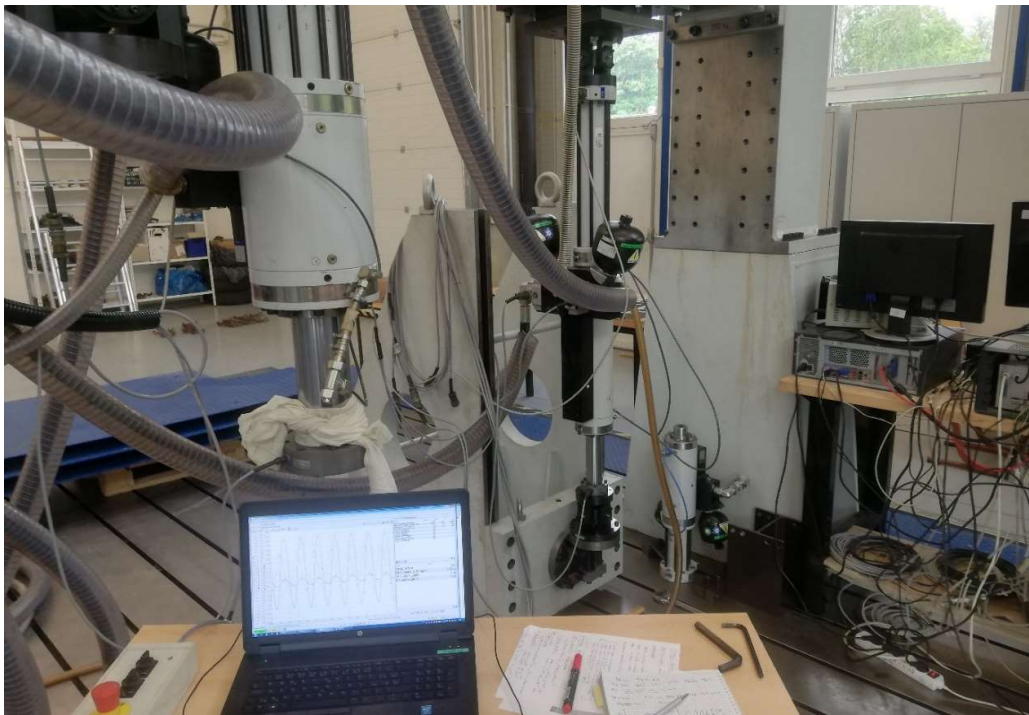
14: Poškozený kolmý vzorek



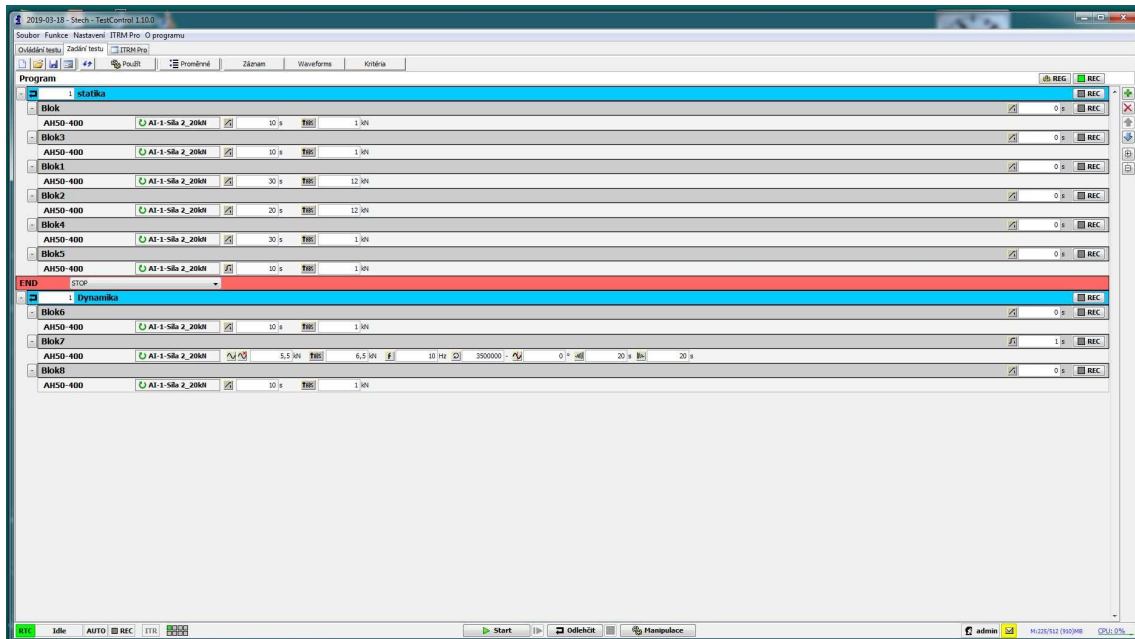
15: Testované vzorky



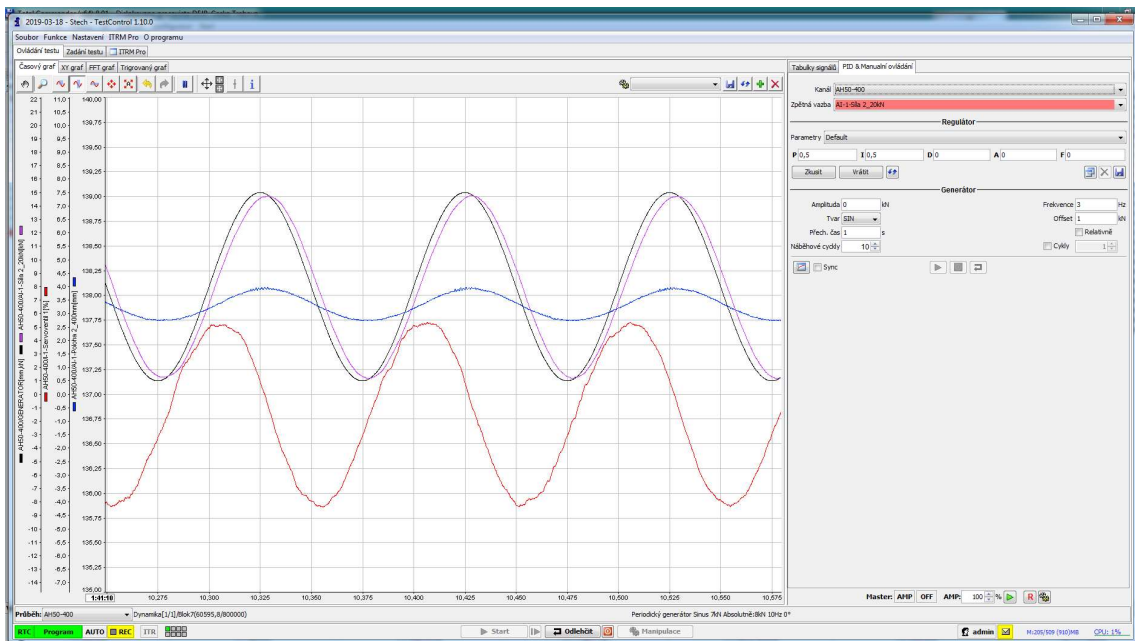
16: Poškozené vzorky se zaoblením



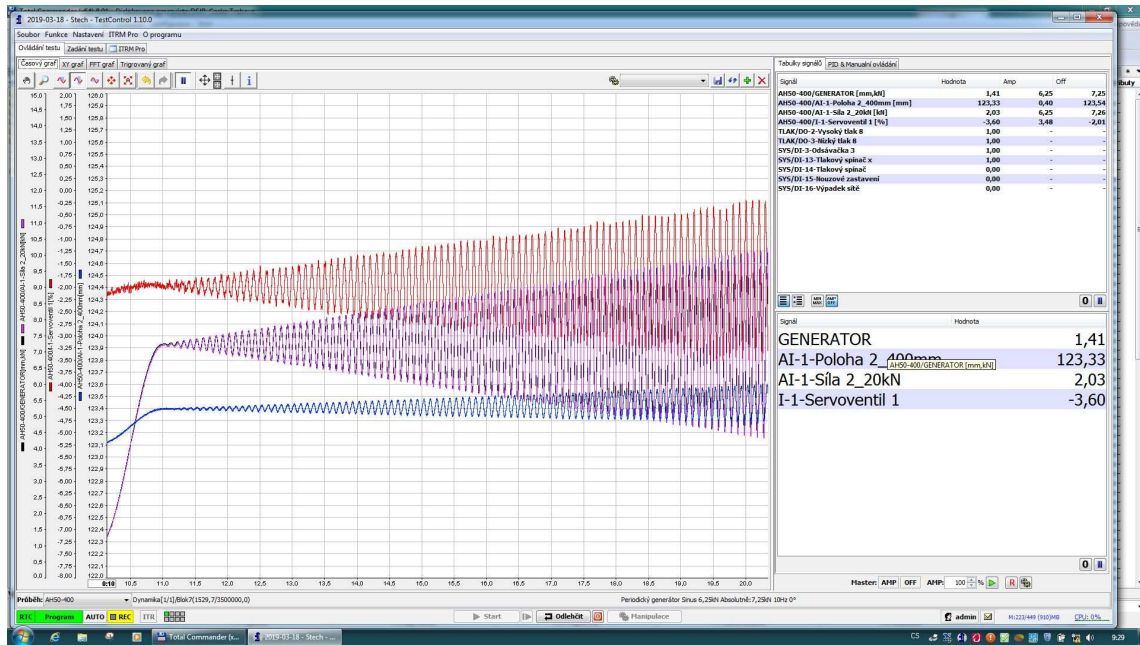
17: Pohled na zkoušku včetně počítače pro ovládání zkoušky



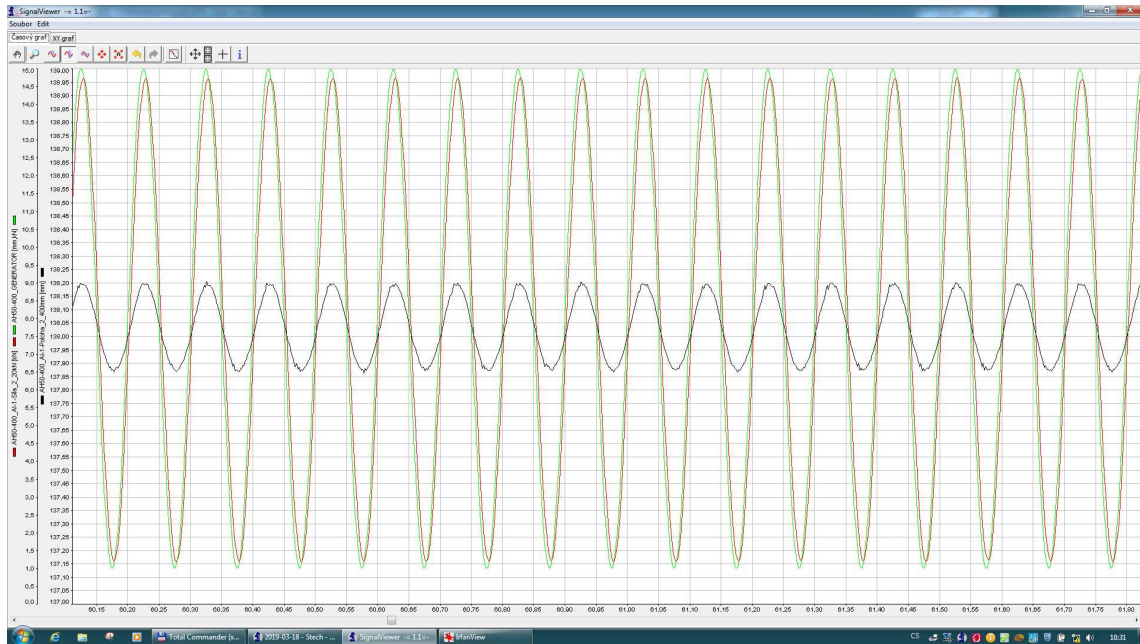
18: Nastavení testu v počítači



19: Hodnoty PID při zkoušce



20: Náběh dynamické zkoušky



21: Záznam dynamické zkoušky