



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV VÝROBNÍCH STROJŮ, SYSTÉMŮ A ROBOTIKY

INSTITUTE OF PRODUCTION MACHINES, SYSTEMS AND ROBOTICS

**VYUŽITÍ NETRADIČNÍCH MATERIÁLŮ VE STAVBĚ
HORIZONTÁLNÍCH VYRTÁVACÍCH STROJŮ**

UTILISATION OF INNOVATIVE MATERIALS AT DESIGN OF BOHRING MACHINES

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Ondřej Tobolka

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. Jiří Marek, Dr.

BRNO 2018

Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky
Student:	Bc. Ondřej Tobolka
Studijní program:	Strojní inženýrství
Studijní obor:	Výrobní stroje, systémy a roboty
Vedoucí práce:	prof. Ing. Jiří Marek, Dr.
Akademický rok:	2017/18

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

Využití netradičních materiálů ve stavbě horizontálních vyrtávacích strojů

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Navrhněte možnosti využití netradičních materiálů ve stavbě horizontálních vyrtávacích strojů z produkce firmy Fermat. Jedná se zejména o použití částicových a vláknových kompozitů, keramických, plastových a hybridních materiálů.

Nahrazované prvky musí vykazovat lepší technicko ekonomické vlastnosti jako jejich současné litinové, nebo ocelové provedení, zejména pokud se týká dodací lhůty a ceny.

Cíle diplomové práce:

1. Rozbor současného stavu vědy a techniky využití netradičních materiálů v konstrukci obráběcích strojů
2. Systémový rozbor využití netradičních materiálů v konstrukci obráběcích strojů
3. Návrh variant konstrukce horizontálních vyrtávacích strojů s aplikací netradičních materiálů a zdůvodnění výběru optimální varianty řešení
4. Technické výpočty
5. Komentář k přiložené výkresové dokumentaci

Seznam doporučené literatury:

MAREK, Jiří. Konstrukce CNC obráběcích strojů III. Praha: MM publishing, s.r.o., 2014. MM speciál. ISBN 978-80-260-6780-1.

JANÍČEK, Přemysl a Jiří MAREK. Expertní inženýrství v systémovém pojetí. Praha: Grada, 2013. Expert (Grada). ISBN 978-80-247-4127-7.

BORSKÝ, Václav. Základy stavby obráběcích strojů. Brno: Vysoké učení technické, 1986.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2017/18

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Práce řeší problematiku využívání netradičních materiálů ve stavbě horizontálních obráběcích strojů. Zvolený problém je zde řešen postupně nejprve obecným výběrem vhodného materiálu nosných struktur. Tento materiál je dále aplikován na stroj WFT 13 CNC z produkce společnosti Fermat a je vytvořeno 9 koncepčních variant rámu stroje. K analýze těchto variant je využita metoda konečných prvků. Na základě dat z analýzy je pomocí vícekritériální metody PATTERN vybrána vhodná varianta ke konstrukci. Konstrukční část pak rozvádí návrh vybrané koncepční varianty a také doporučuje postupy, které je třeba při návrhu a výrobě sendvičových struktur dodržet. Práce přináší výsledek v podobě nové konstrukce nosné soustavy vybraného stroje a zejména pohled na vývoj a výrobu nových netradičních materiálů v konstrukci horizontálních obráběcích strojů.

ABSTRACT

This thesis solves an issue of application unconventional materials used in horizontal boring machine design. Chosen problem is solved step by step from general selection of suitable material for supporting structure. The selected material is applied on WFT 13 CNC machine design from production of Fermat and it is created 9 conceptual options of machine's frame. Finite element method is used for analysis of conceptual options. Based on data from analyses, the best option is selected for constructional part with use of multi-criteria PATTERN method. Constructional part of thesis elaborates on the design of selected conceptual option and gives recommendation for essential processes used in development and production of sandwich structures. The master's thesis comes with new construction solution for supporting structure of selected machine and especially insight in development and production of new unconventional materials in horizontal boring machines design.

KLÍČOVÁ SLOVA

Netradiční materiály, horizontální vyvrtávací stroj, PATTERN, Fermat, WFT 13 CNC, metoda konečných prvků, konstrukce sendvičových součástí, beton

KEYWORDS

Unconventional materials, horizontal boring machine, PATTERN, Fermat, WFT 13 CNC, finite element method, sandwich parts design, concrete

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

TOBOLKA, O. *Využití netradičních materiálů ve stavbě horizontálních vyrtávacích strojů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2018. 143 s. Vedoucí diplomové práce prof. Ing. Jiří Marek, Dr..

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu práce panu prof. Ing. Jiřímu Markovi Dr. za možnost zpracování zajímavého tématu, cenné odborné rady, trpělivost a čas.

Panu Ing. Milanovi Královi děkuji za ochotu při konzultaci a společnosti Fermat za poskytnutí interních podkladů.

Dále bych rád poděkoval panu Ing. Dominikovi Hermanskému za cenné rady a ochotu konzultovat vybrané problémy konstrukčního řešení a pevnostních výpočtů.

Poslední poděkování patří mé rodině a mé přítelkyni Karolíně, kteří mě po celou dobu studia podporovali a bez nichž by dokončení studia nebylo možné.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením prof. Ing. Jiřího Marka Dr. a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne **25.05.2018**

.....

Bc. Ondřej Tobolka

OBSAH

1	ÚVOD	17
1.1	Motivace využití netradičních materiálů.....	17
1.2	Formulace zadání, postupu a cílů práce.....	18
2	PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ	21
2.1	Profil společnosti.....	21
2.1.1	Výrobní portfolio společnosti.....	22
3	HORIZONTÁLNÍ VYVRTÁVACÍ STROJE	25
3.1	Horizontální vyvrtávací stroje Fermat.....	26
3.1.1	Horizontální vyvrtávací stroje – stolové a křížové.....	26
3.1.2	Horizontální vyvrtávací stroje – deskové.....	27
3.2	Technické parametry vyvrtávacích strojů Fermat.....	28
4	NOSNÉ SOUSTAVY OBRÁBĚCÍCH STROJŮ	29
4.1	Požadavky, vlivy a trendy v oboru nosných soustav.....	29
4.1.1	Statická stabilita nosných soustav.....	30
4.1.2	Dynamická stabilita nosných soustav.....	31
4.1.3	Teplotní stabilita nosných soustav.....	34
4.2	Konstrukční prvky nosných soustav.....	35
4.2.1	Konstrukční provedení profilů, žebrování a spojení dílců.....	35
4.2.2	Konstrukční provedení uložení na základu a spojení dílců.....	37
4.3	Materiály nosných soustav.....	38
4.3.1	Požadavky na volený materiál nosných struktur.....	38
4.3.2	Ocelové svařence.....	39
4.3.3	Litiny a ocel na odlévání.....	41
4.3.4	Kompozitní materiály.....	43
4.3.5	Vláknové kompozity.....	43
4.3.6	Částicové kompozity.....	44
4.3.7	Betonové materiály.....	44
4.3.8	Cementový beton (hydrobeton).....	45
4.3.9	Polymerbetony.....	46
4.3.10	Vysokohodnotný beton (HPC).....	47
4.3.11	Přírodní žula (Granit).....	48
4.3.12	Hybridní materiály.....	48
4.3.13	Ocelové svařence/litinové odlitky s výplní z betonu („Sendvičové materiály“) ...	49
4.3.14	Ocelové svařence/litinové odlitky s výplní z písku.....	49
4.3.15	Sendvičová struktura ocel-hliníková pěna-ocel.....	50
4.4	Porovnání vlastností materiálů nosných soustav OS.....	50
4.5	Příklady kombinovaných materiálů a jejich realizací pro stroje.....	51
4.5.1	EPUFILL- RAMPF.....	51
4.5.2	Lože stroje FUT - TOS Kuřim.....	52
4.5.3	COMBItec – TOS Varnsdorf.....	52
4.5.4	Lože stroje BFR 2x - Reiden.....	53
4.5.5	DemTec - Demmeler.....	53
4.5.6	Durfill- Durcrete.....	53
4.6	Zanite Plus - BaseTek LLC.....	54
4.7	Porovnání vlastností strojů s rámy z kombinací litiny/oceli a betonů.....	54
4.8	Porovnání vlastností betonových materiálů využívaných pro vylévání.....	55

4.9	Součásti z polymerbetonu	55
4.10	Technologie výroby polymerbetonových/betonem kombinovaných součástí	55
4.10.1	Proces výroby.....	55
4.10.2	Typy forem.....	56
4.11	Typy insertů	57
5	SYSTÉMOVÝ ROZBOR VYUŽITÍ NETRADIČNÍCH MATERIÁLŮ	59
5.1	Problémová situace	59
5.2	Formulace problému	59
5.3	Systém podstatných veličin.....	59
5.3.1	Vnější vlivy	60
5.3.2	Vnitřní vlivy.....	60
5.4	Systém hodnocení podstatných veličin	61
5.5	Systémový výběr vhodného materiálu	62
5.6	Specifikace stroje	63
5.7	Analýza současného konstrukčního řešení stroje WFT 13 CNC	64
5.7.1	Podélné lože	65
5.7.2	Saně stolu	67
5.7.3	Příčné lože.....	68
5.7.4	Saně stojanu	69
5.7.5	Stojan	71
6	KONCEPČNÍ VARIANTY NOVÉ KONSTRUKCE	72
6.1	Návrh koncepčních variant	72
6.2	Struktura koncepčních variant.....	72
6.2.1	Úpravy základních modelů na koncepční varianty	74
6.2.2	Koncepční varianta I	74
6.2.3	Koncepční varianta II.....	75
6.2.4	Koncepční varianta III	76
6.2.5	Koncepční varianta IV	77
6.2.6	Koncepční varianta V.....	78
6.2.7	Koncepční varianta VI	79
6.2.8	Koncepční varianta VII.....	80
6.2.9	Koncepční varianta VIII.....	81
6.2.10	Koncepční varianta IX	82
6.2.11	Porovnání hmotností a nákladů na kg materiálu celkových sestav koncepčních variant a současného stroje	83
7	VÝPOČTOVÁ ČÁST	87
7.1	Analýza současného řešení	87
7.1.1	Model geometrie a materiálu	87
7.1.2	Model sítě prvků	87
7.1.3	Okrajové podmínky	88
7.1.4	Výsledky výpočtů současné konstrukce	91
7.2	Analýza koncepčních variant	93
7.3	Analýza koncepční varianty I.....	93
7.3.1	Modely geometrií a materiálů	93
7.3.2	Model sítě prvků	94
7.3.3	Okrajové podmínky	95
7.3.4	Výsledky výpočtů varianty I.....	95
7.4	Analýza koncepční varianty V	96
7.4.1	Modely geometrií a materiálů	96

7.4.2	Model sítě prvků	97
7.4.3	Okrajové podmínky	98
7.4.4	Výsledky výpočtů varianty V	100
7.5	Přehled výsledků analýz současné konstrukce a všech koncepčních variant	102
8	VÝBĚR OPTIMÁLNÍ KONSTRUKČNÍ VARIANTY.....	105
8.1	Výběr optimální varianty řešení	105
8.1.1	Výběr hodnotících kritérií	105
8.1.2	Párové porovnání hodnotících kritérií.....	105
8.1.3	Stanovení váhy významnosti hodnotících kritérií.....	106
8.1.4	Pořadí koncepčních variant.....	107
8.1.5	Vyhodnocení výběru optimální varianty.....	110
9	KONSTRUKČNÍ NÁVRH SOUČÁSTÍ.....	111
9.1	Konstrukční zásady sendvičových konstrukcí s ocelovým pláštěm	111
9.1.1	Vazba mezi ocelovým pláštěm a betonovou výplní	111
9.2	Konstrukční návrh součástí	112
9.2.1	Vnější ocelové pláště	113
9.2.2	Vazební a transportní prvky – stojan a lože	114
9.2.3	Vazební a transportní prvky - saně	114
9.2.4	Kryty výplně	115
9.2.5	Stavitelné podložky.....	116
9.2.6	Lineární vedení	117
9.2.7	Lineární vedení – podélná sestava	117
9.2.8	Lineární vedení – příčná sestava.....	118
9.2.9	Lineární vedení - montáž	120
9.2.10	Uložení kuličkových šroubů	120
9.2.11	Vedení elektroinstalace a pneumatických/hydraulických vedení	120
9.2.12	Umístění vibračních motorů.....	121
9.2.13	Krytování a odměřování	122
9.2.14	Celková navržená sestava	122
9.3	Výroba dílů.....	124
9.3.1	Výroba ocelových svařenců	124
9.3.2	Aplikace betonu	124
9.4	Komentář k výkresové dokumentaci.....	126
10	EKONOMICKO-TECHNICKÉ ZHODNOCENÍ.....	127
10.1	Shrnutí ekonomicko-technického zhodnocení	128
11	DISKUZE	129
12	ZÁVĚR.....	131
13	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	133
14	SEZNAM ZKRATEK, SYMBOLŮ, OBRÁZKŮ A TABULEK.....	137
14.1	Seznam zkratk a symbolů.....	137
14.2	Seznam obrázků	138
14.3	Seznam tabulek	141
15	SEZNAM PŘÍLOH	143

1 ÚVOD

1.1 Motivace využití netradičních materiálů

Pojem „Využití netradičních materiálů“ často evokuje pocity boření starých zvyků, zažitých stereotypů, využívání drahých a nedostupných materiálů pro výrobu strojů. Nemusí tomu tak vždy být. Důkazem budiž nedávný start rakety Falcon Heavy americké společnosti SpaceX. Tato raketa dokáže vynést na nízkou oběžnou dráhu zátěž až 64 000 kg. Pokud tuto hodnotu porovnáme s raketou Saturn V, která odstartovala již v roce 1973 a dokázala vynést na nízkou oběžnou dráhu 140 000 kg. Dvojnásobná hodnota před více než 40-ti lety. Jejich porovnání je vyobrazeno na obrázku 1. Zajímavým faktem je však cena startu na kg hmotnosti, zde již exceluje Falcon Heavy s hodnotou přibližně 1 400 dolarů za kilogram. Cena startu rakety Saturn V převyšuje hodnotu 8 200 dolarů za kilogram. Zde je jasně patrný inovativní přístup v aplikaci, o které lze říci, že je již v celku tradiční, ale její pojetí společností SpaceX je netradiční zejména co se týče způsobu ušetření nákladové stránky na hmotu nákladu. Nejinak je tomu i u jiných odvětví techniky a také obráběcích strojů. Nosné soustavy těchto strojů neprocházely v průběhu let radikálnějšími změnami a tak již po dlouhá léta dominují tomuto oboru žebrované odlitky z šedé litiny a také ocelové svařence. Proč se však nad těmito součástmi nezamyslet, tak jako to udělala společnost SpaceX? Každý den využíváme pro dopravu mosty a silnice, využíváme přístřeší budov, všechny tyto druhy staveb používají jeden esenciální materiál, a sice beton. Je velmi levný a dostupný a zároveň má zajímavé technické a mechanické vlastnosti. Proč tedy nevyužít tohoto tradičního materiálu, jehož moderní verze je známá již od 19. století, netradičně pro výrobu nosných součástí obráběcího stroje. Zvyšování výkonnosti obráběcích strojů při současném nezvyšování nákladů je dnes prioritní požadavek zákazníků [1] [2] [3].



Obr. 1) Velikosti jednotlivých raket: Falcon Heavy vlevo, Saturn V třetí zleva [2]

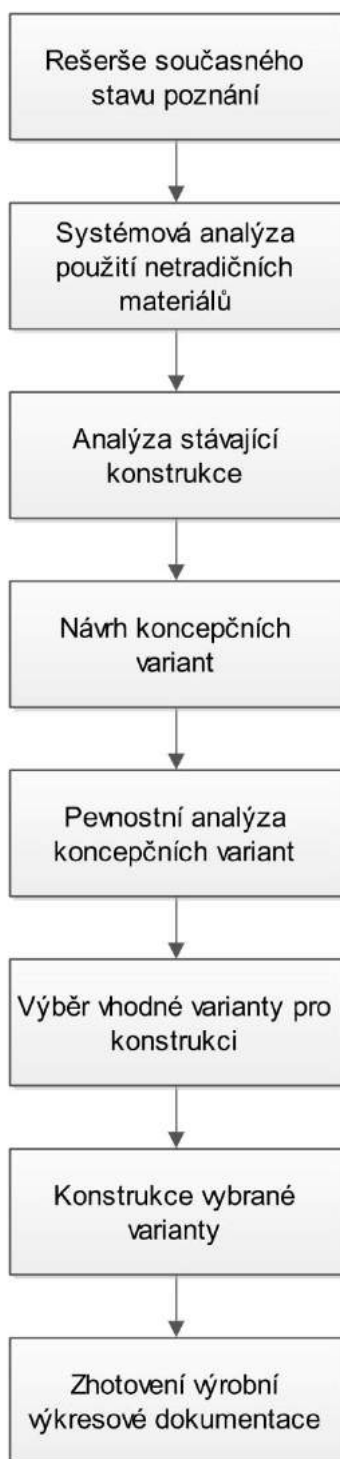
1.2 Formulace zadání, postupu a cílů práce

Téma této diplomové práce se zaměřuje na netradiční materiály a jejich využití ve stavbě obráběcích strojů. Hlavním cílem bude vytvoření popisu problematiky návrhu součástí využívajících netradiční materiály, od analýzy až po finální výkresovou dokumentaci. Popis bude soustředěn zejména na oblast sendvičových struktur. Tuto studii bude následně možné použít pro další detailnější výzkumnou činnost. Popis tematiky bude aplikován na horizontálním vyvrtávacím stroji WFT 13 CNC z produkce společnosti Fermat.

Jednotlivé cíle, které si tato diplomová práce klade, jsou následující:

- provést rozbor současného stavu poznání využití netradičních materiálů ve stavbě obráběcích strojů s důrazem na materiály využívané pro stavbu rámu těchto strojů;
- popsat systémový rozbor při aplikaci netradičních materiálů;
- aplikovat systémový přístup při analýze současné konstrukce stroje a návrhu variant koncepcí nové konstrukce;
- provést hrubé výpočty jednotlivých koncepcí;
- vybrat vhodnou variantu pro konstrukci;
- navrhnout a okomentovat konstrukci vybraného konceptu konstrukce;
- navrženou variantu konstrukce podložit výrobní výkresovou dokumentací.

V práci bude uplatněn postup patrný z obrázku 2. Nejprve bude formou rešerše proveden sběr informací a rozbor stavu aktuálního poznání se zaměřením na konstrukci nosných struktur a jejich materiálů. Dále bude provedena systémová analýza využití netradičních materiálů ve stavbě obráběcích strojů s důrazem na koncepční návrh několika variant možné konstrukce součástí rámu daného stroje. Po této analýze bude následovat výpočtová část, v níž budou jednotlivé varianty podrobeny matematickým výpočtům, na jejichž základě bude v další části vybrána vhodná varianta ke konstrukci. Závěr práce se již bude soustředit na samotnou konstrukci vybrané varianty, její popis a tvorbu výkresové dokumentace.



Obr. 2) Postup v práci

2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

2.1 Profil společnosti

Společnost Fermat je profesionálním výrobcem vysoce kvalitních obráběcích strojů se sídlem v České republice. První historická zmínka o nejstarším členu skupiny Fermat pochází z roku 1902, kdy byla v Lipníku panem Františkem Wawerkou založena továrna na výrobu soustruhů a vyvrtávacích strojů (obrázek 3). Samotná společnost Fermat je však vcelku mladá - byla založena až v roce 1990 panem Jiřím Ferencem [6].



Obr. 3) Továrna na výrobu obráběcích strojů v Lipníku nad Bečvou [6]

Na samotném počátku se společnost Fermat věnovala pouze obchodu s použitými stroji. V roce 2000 se podnikání společnosti Fermat rozrostlo o pobočku v Brně a společnost se tak postupně začala zabývat i generálními opravami použitých obráběcích strojů. Vlastní vývoj a výroba obráběcích strojů (zejména horizontálních vyvrtávacích strojů) započali v roce 2006. Od té doby Fermat kontinuálně roste a své stroje nedodává již jen na tuzemský trh, ale expanduje do celého světa. Skupina Fermat se v průběhu následujících let také rozrostla o další podniky – Strojtos Lipník, Pressl Rokycany, HMB Liberec a v roce 2015 také o americkou společnost Lucas Precision, se kterou společnost Fermat dlouhodobě spolupracovala v rámci prodeje a servisu strojů Fermat pro trh v USA. V tomtéž roce společnost vygenerovala rekordní obrát 2,1 mld. Kč. Samostatná výrobní divize Fermat Machine Tool vznikla odkoupením strojírenské společnosti ZeVo Praha Ltd Co. [6].

V současnosti má společnost Fermat 8 poboček v České republice a dále vlastní zahraniční pobočky na Slovensku, v Maďarsku, v Číně a v Indii. Hlavními výrobními závody jsou provozy v Brně (obrázek 4), Praze a Lipníku nad Bečvou. Ročně společnost vyprodukuje přes 100 horizontálních vyvrtávacích strojů. Většina roční produkce končí v zahraničí, český trh se na tržbách Fermatu podílí zhruba pětinou. Ze světových trhů lze zmínit především Kanadu, USA, Rusko, Indii, Čínu nebo Jižní Ameriku. Jako hodně perspektivní vidí pan Ferenc trhy v Asii, kde by chtěl v budoucnu vytvářet až třetinu obrátu. Šanci vidí i na Blízkém

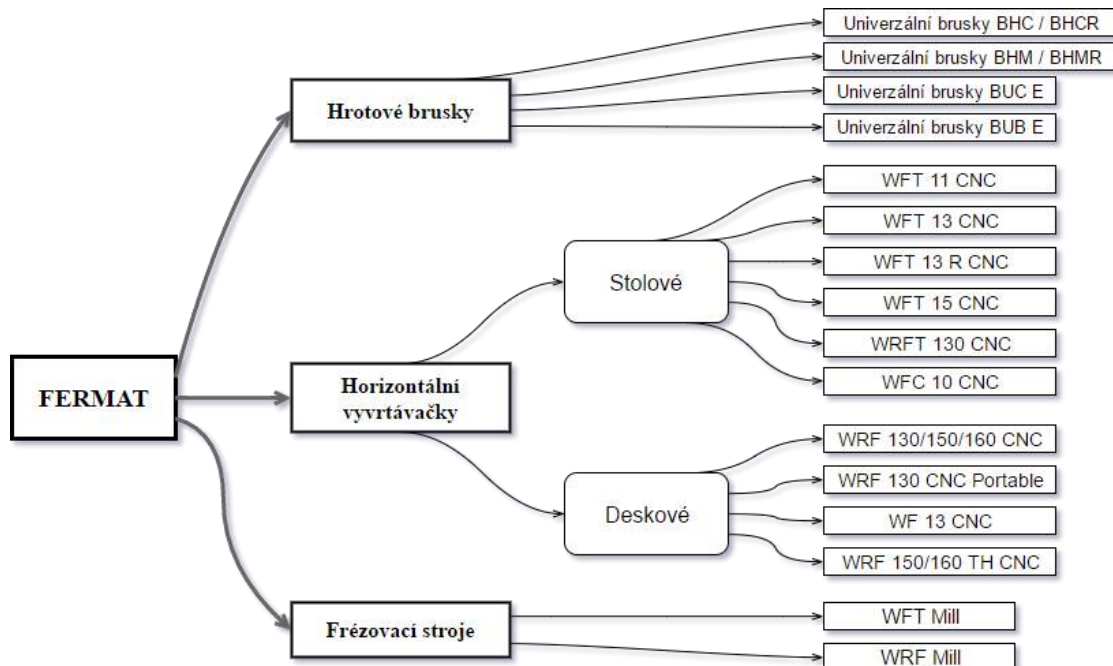
východě – v loňském roce společnost prodala dva stroje do Saúdské Arábie. Svým zaměřením naleznou stroje uplatnění zejména v těžkém strojírenství, energetice, strojařském, leteckém i železničním průmyslu, ve výrobě těžkých stavebních strojů a důlní techniky [4] [5] [6] [7].



Obr. 4) Výrobní hala společnosti FERMAT v Brně [8]

2.1.1 Výrobní portfolio společnosti

Produktové portfolio společnosti v současné době obsahuje 16 modelů (obrázek 5). Základním pilířem výrobního programu jsou horizontální vyvrtávací obráběcí stroje, které v menším měřítku doplňují univerzální hrotové brusky vyráběné pražskou pobočkou firmy a také frézovací obráběcí centra. V závislosti na aplikaci mohou stroje dosahovat výšky až 7 metrů a s možností maximálního zatížení až 80 tunovým obrobkem.



Obr. 5) Diagram portfolio společnosti FERMAT

Při vývoji nových typů strojů se ve společnosti Fermat klade důraz na následující body:

- modulární koncepce strojů a široká nabídka doplňkových součástí;
- zkušené konstrukční oddělení a technici;
- kvalitní dodávané komponenty od renomovaných výrobců;
- rychlý a dostupný oblastní servis [6].



Obr. 6) Horizontální vyvrtávací centrum modulární koncepce[8]

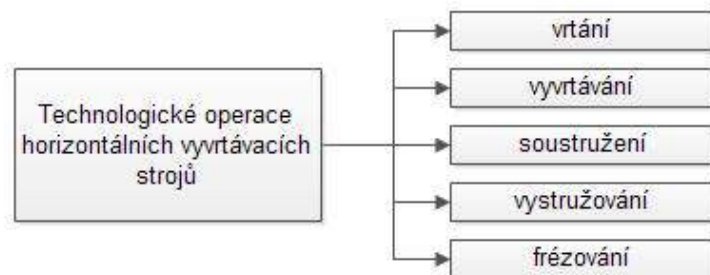
V dnešní době je zákazníky čím dál tím více poptáván stroj, který dokáže obrobit celou řadu mnohdy velmi komplikovaných obrobků. Z toho důvodu společnost Fermat zavádí do svých strojů modulární systémy, které umožní stroj přizpůsobit dané aplikaci (obrázek 6). Kromě celých strojních celků dodává podnik také samostatné součásti strojů, zejména frézovací hlavy a lícni desky (obrázek 7). Široký výběr tohoto sortimentu zohledňuje různé varianty konstrukce – nabízí jednoosé i dvouosé hlavy, manuální nebo automatické indexování, různé velikosti a výkony, různé typy upínacích kuželů.



Obr. 7) Frézovací hlavy konstrukce Fermat [8]

3 HORIZONTÁLNÍ VYVRTÁVACÍ STROJE

Horizontální vyvrtávací stroje tvoří významnou skupinu obráběcích strojů, používanou pro obrábění širokého spektra obrobků. Vzhledem k této specifikaci umožňují obrábět řadou technologických operací (obrázek 8):



Obr. 8) Technologické operace horizontálních vyvrtávacích strojů [5]

Základním poznávacím znakem vyvrtávacích strojů je výsuvné vřeteno s výsuvnou pinolou, které umožňuje obrábění s velkým vyložením nástroje. Dále lze stroje rozdělit do tří základních skupin – stolové, deskové a křížové (obrázek 9).



Obr. 9) Typy horizontálních vyvrtávacích strojů – zleva stolové, křížové a deskové [9]

Stavba stolového vyvrtávacího stroje obsahuje křížový stůl, který se může pohybovat ve vzájemně kolmých osách. Křížové vyvrtávací stroje mají pohyb obrobku vyřešený pomocí stolu v příčném směru z předního pohledu. Nástroj je následně upnutý na stojanu pohybujícím se v kolmém směru k podélnému loži. Deskové vyvrtávací stroje mají obrobek nepohybující se. Smýkadlo s vřeteníkem a nástrojem se posouvá po stojanu a ten následně po loži ve směru kolmém k ose vřetena [5].

Ze zařízení horizontálních vyvrtávacích strojů, která jsou v kontaktu s nosnou soustavou, patří zejména smýkadlo s vřeteníkem, které působí značnou jednostrannou zátěž na rám. Z toho důvodu bývají stroje opatřeny vyvažovacím zařízením. Toto zařízení je buď samostatná hmotnost na kladce (využívá gravitace) nebo hydraulický válec. Posuv smýkadla je řešen pomocí kuličkového šroubu, na jehož konci musí být umístěna brzda proti samovolnému klesnutí. Vzhledem k vysoké technologické variabilitě bývají stroje

dodávány s automatickou výměnou nástroje a případně také automatickou výměnou obrobku. Zařízení pro výměnu nástroje je ve většině případů připevněno ke stojanu z opačné strany, než je smýkadlo s vřeteníkem. U vysokých variant strojů bývají na stojanu zavěšeny také kabiny pro obsluhu. Hydraulický agregát je součástí samostatné jednotky umístěné mimo prostor vyvrtávacího stroje [5].

Na trhu v tomto segmentu působí řada firem, například TOS Varnsdorf, Škoda machine tool, TOS Kuřim, RETOS Varnsdorf, Union, Zayer, Pama, SMTCL, Lazzati, SHW, FPT.

3.1 Horizontální vyvrtávací stroje Ferlat

Produkce horizontálních vyvrtávacích strojů společnosti Ferlat je soustředěna na dva typy - stolové a deskové. Tyto stroje tvoří základ všech nabízených strojů společnosti Ferlat. Zaměřením se jedná o stroje malé až střední velikosti.

3.1.1 Horizontální vyvrtávací stroje – stolové a křížové

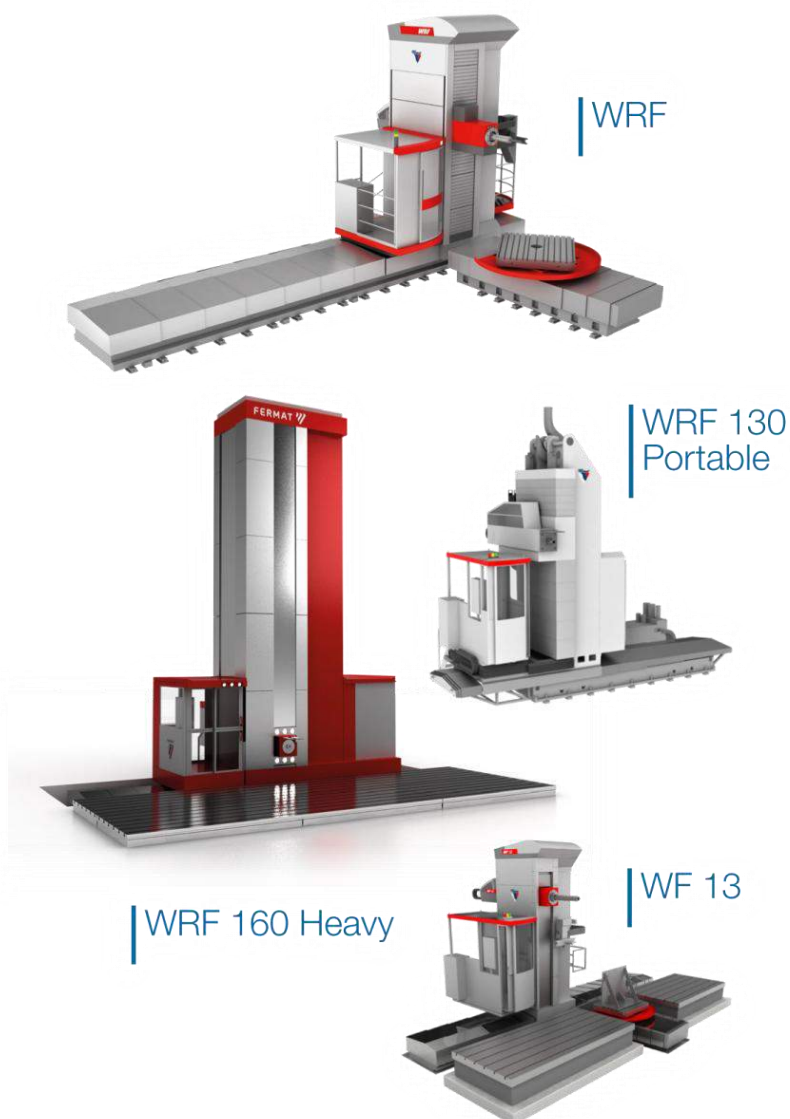
Vodorovné vyvrtávací stroje stolové a křížové reprezentují modely WFC 10 CNC, WFT 11 CNC, WFT 13 CNC a WRFT 130/150/160 CNC (obrázek 10). Typy WFC 10 CNC a WFT 11 CNC jsou již v základní výbavě vybaveny výsuvnými vřeteny a lze s nimi obrábět 4 lineárními osami (X, Y, Z, W) a 2 rotačními osami (B, C). Pokročilejší typy WFT 13 CNC a WRFT 130/150/160 CNC mají navíc ještě přidanou další lineární osu V. Všechny modelové řady jsou připravené k montáži dodatečného příslušenství v podobě řízených frézovacích hlav nebo lícnic desek, což umožní stroji dále zvyšovat počet řízených os. U řad WFT se obrobek pohybuje v osách X a B. Nástroj v osách Y, Z, W (V) a C. U řad WFC je obrobek polohován v osách X, Z, B a nástroj v osách Y a C [6].



Obr. 10) Horizontální vyvrtávací stroje Ferlat – stolové [8]

3.1.2 Horizontální vyvrtávací stroje – deskové

Horizontální vyvrtávací stroje deskové reprezentují v nabídce společnosti Fermat stroje s označením WRF 130/150/160 CNC, WRF 130 CNC Portable, WF 13 CNC, WRF 150/160 TH CNC, WRF 160 Heavy CNC (obrázek 11). Jejich společnými rysy jsou vysoká tuhost a velký odběr třísky při obrábění (i v případě, že vřeteník je v horní úvrati osy Y). Deskové vyvrtávací stroje mají v základním provedení řízené 3 nebo 4 lineární osy (X, Y, Z a W). Pokud je stroj vybaven přídatným otočným stolem, jsou řízené i osy B a V. Pracoviště je možné díky modulárnímu systému stavby stroje rozšířit jednou nebo více upínacími deskami. Takové rozložení umožňuje stroji pracovat v efektivním pracovním cyklu při minimalizaci vedlejších časů. Velkou výhodou deskových horizontálních vyvrtávacích strojů je kombinace stacionárního deskového pole a otočného stolu, která poskytuje potřebnou flexibilitu při obrábění těžkých obrobků různých rozměrů. Tak jako u stolových vyvrtávacích strojů i zde jsou všechny modelové řady připravené k instalaci řízených frézovacích hlav a lícnic desek [6].



Obr. 11) Horizontální vyvrtávací Fermat - deskové [8]

3.2 Technické parametry vyvrtávacích strojů Fermat

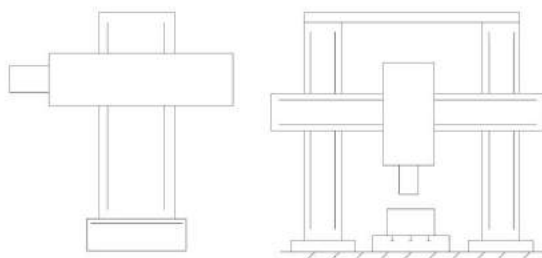
V tabulce 1 je uvedený přehled technických parametrů vyvrtávacích strojů Fermat.

Tab 1) Přehled technických parametrů vyvrtávacích strojů Fermat [6]

Typ stroje	Maximální posuv osa X (m)	Maximální posuv osa Y (m)	Maximální posuv osa Z (m)	Maximální posuv osa W (m)	Maximální zatížení stolu (t)	Maximální posuvové rychlosti ($\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$)
WFC 10 CNC	až 2	až 2	až 1,25	0,73	až 30	30
WFT 11 CNC	až 3	až 2	až 1,7	0,73	až 30	30
WFT 13 CNC	až 5	až 3,5	až 3	0,8	až 20	20
WRFT 130 CNC	až 9,5	až 5	až 3,9	0,73	až 80	15
WRF CNC	až 27,5	až 6	až 1,55	1	až 80	20
WRF 160 Heavy CNC	až 28,1	až 10	až 1,6	1	až 80	20
WF 13 CNC	až 22	až 3,5	0,7	0,8	až 40	20

4 NOSNÉ SOUSTAVY OBRÁBĚCÍCH STROJŮ

Nosná soustava tvoří základ obráběcího stroje, ke kterému jsou připojeny všechny funkční uzly, jako např. vřeteno, saně, stoly, pohony, řízení apod. Cílem nosné soustavy je spojit jednotlivé uzly v jeden celek a zajistit průchod energie od nástroje k obrobku s potřebnou přesností, bezpečností a ekonomičností. Dle kinematiky lze rozlišit dva základní typy nosných soustav – otevřené a uzavřené (obrázek 12). Tyto typy lze dále rozdělit na dvě podskupiny – nesoucí obrobek a nesoucí nástroj. Obě podskupiny mohou být pohyblivé nebo nepohyblivé, z čehož vyplývají jednotlivé součásti tvořící nosnou strukturu [5] [10].



Obr. 12) Otevřená (vlevo) a uzavřená (vpravo) nosná soustava [5]

4.1 Požadavky, vlivy a trendy v oboru nosných soustav

Tradičně nejdůležitějšími požadavky kladenými na nosné soustavy jsou:

- maximální statická tuhost;
- dynamická stabilita;
- teplotní stabilita;
- snadná výroba/montáž;
- snadná manipulovatelnost;
- nízká cena;
- malá hmotnost (souvisí se snadnou montáží, manipulovatelností a náklady na ně);
- dobré uložení na základ [5].

Těmito požadavky lze charakterizovat i trendy poslední doby, kdy je kladen velký důraz na zvyšování konkurenceschopnosti výrobních strojů. Vývoj je tedy směřován ke zlepšení užitečných vlastností stroje a jejich technologie:

- snížením výrobní ceny a času výroby;
- zlepšením tvarové a rozměrové přesnosti nosné struktury stroje;
- zvýšením statické a dynamické tuhosti stroje;
- snížením hmotnosti pohyblivých struktur [11].

Snížování ceny stroje a jeho součástí a zkracování doby dodání stroje poskytuje výraznou výhodu oproti konkurenci. Je to komplexní otázka, která souvisí jak s volbou materiálu, tak topologií celého rámu, která ovlivňuje potřebný objem použitého materiálu. Snížení hmotnosti jednotlivých komponent v současnosti ovlivňuje rozvoj optimalizačních metod, díky kterému lze navrhovat stroje s nižší hmotností při zachování nebo vylepšení

statické tuhosti. Snižováním hmotnosti také klesají náklady na množství použitého materiálu. Další možností odlehčení je volba jiných materiálů [11].

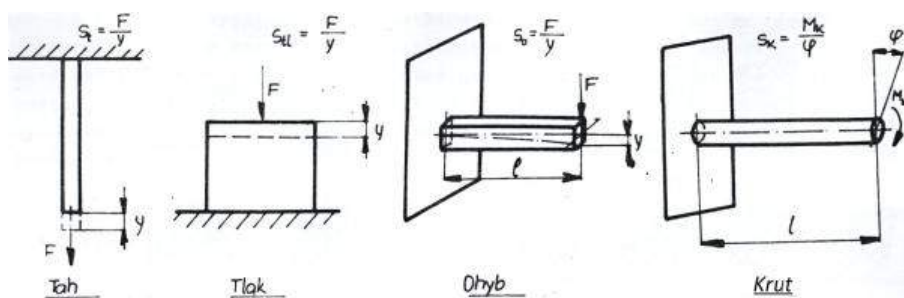
4.1.1 Statická stabilita nosných soustav

Ze statického hlediska jsou při návrhu nosných struktur obráběcích strojů určujícími hledisky velikost deformace, pevnost a tuhost. Statické deformace jsou vyvolávány statickými (v čase konstantními) vnějšími silami a momenty. Vnější síly a momenty představují hlavně řezné síly od obráběcího procesu, vlastní hmotnost obrobků a dílů stroje, třecí odpor (kluzný, valivý) a zrychlující síly. Obrázek 13 ukazuje definici statické deformace [5] [10] [12].

$$\text{Statická deformace} = \frac{\text{statické zatížení}}{\text{statická tuhost}}$$

Obr. 13) Definice statické deformace [12]

Dle působících sil a momentů se vyskytují nejčastěji 4 druhy zatížení a jim odpovídající statické tuhosti (obrázek 14):



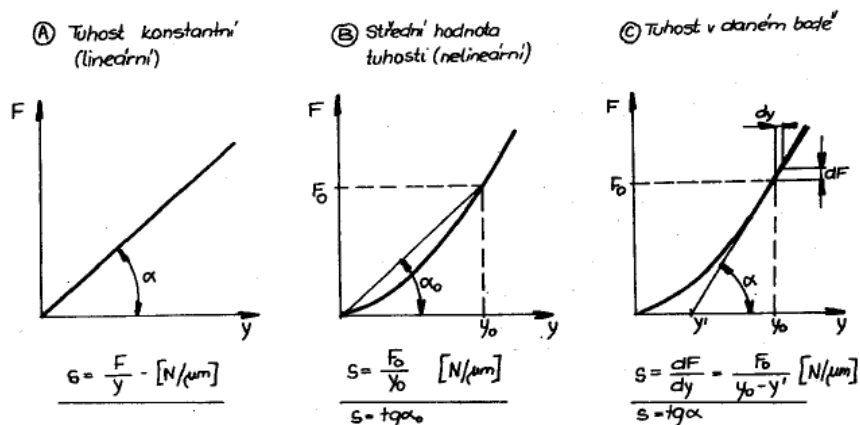
Obr. 14) 4 druhy zatížení a statických tuhostí [10]

Statickou tuhost lze vyšetřovat:

- samostatně pro každou součást – zvaná dílčí tuhost;
- pro celou soustavu součástí navzájem spojených – zvaná tuhost celková [10].

Dílčí tuhost vyšetřujeme v případě kontroly vhodnosti rozměrů, tvaru a materiálu uvažované součásti. Celková se pak vyšetřuje v případě ověření celkové tuhosti celé soustavy [5].

Dle konkrétních podmínek pak pro určení statické tuhosti využíváme vztahy z obrázku 15.

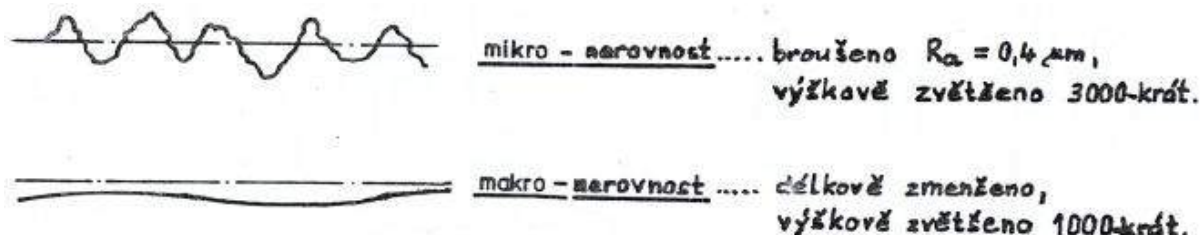


Obr. 15) Konkrétní situace a vztahy jejich statické tuhosti [10]

V souvislosti s tuhostí ještě možné vyjádřit deformaci, kterou vyvolá jednotkové zatížení. Toto je nazýváno jako poddajnost a jedná se o převrácenou hodnotu tuhosti [5]. Poddajnost je vyjádřena vzorcem:

$$c = \frac{1}{k} = \frac{\delta}{F} (\mu\text{m} \cdot \text{N}^{-1}) \quad (1)$$

Na základě měření bylo zjištěno, že nejvýznamnější deformace se tvoří na styku jednotlivých součástí. Tyto deformace vznikají od výstupků povrchových nerovností a také od deformací makro-nerovností styčných ploch (obrázek 16) [5].



Obr. 16) Typy povrchový nerovností pro vznik stykové deformace [10]

Styková tuhost je pak vyjádřena jako poměr mezi jmenovitým měřným tlakem p mezi styčnými plochami a deformací δ povrchových vrstev v místě styku dvou těles v normálním směru [5].

Lze ji vyjádřit následujícím vztahem:

$$k_{\text{STYK}} = \frac{p}{\delta} (\text{N} \cdot \text{mm}^{-3}) \quad (2)$$

Hodnota stykové tuhosti tak závisí na způsobu opracování stykových ploch:

- hoblované plochy $k_{\text{STYK}} = 1000 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-3}$;
- zaškrabávané plochy $k_{\text{STYK}} = 3100 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-3}$;
- broušené plochy $k_{\text{STYK}} = 3600 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-3}$ [5].

Proti broušení a leštění však mnohdy hovoří jednak zpětné zavedení napětí do materiálu, které později může znamenat deformaci odlitku a ztrátu přesnosti stroje. Také fakt, že u dokonale nabroušených a naleštěných ploch vznikají mezi povrchy adhezivní síly, příliš nehovoří pro použití broušení, jako dokončovací operace stykových ploch součástí nosných struktur [5] [13] [14].

Pro dosažení co nejvyšší stykové tuhosti se doporučuje:

- volit co největší stykové plochy;
- volit co největší předepnutí [5].

4.1.2 Dynamická stabilita nosných soustav

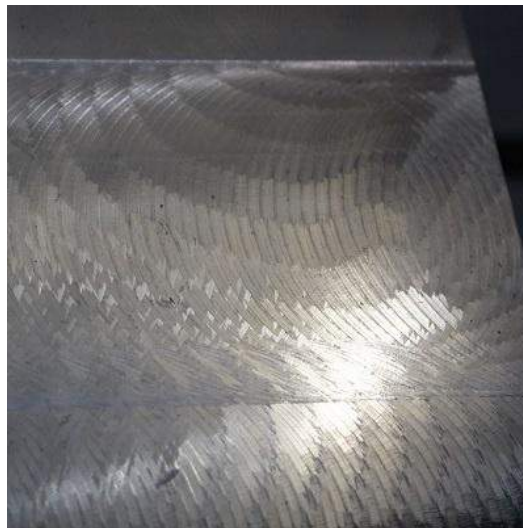
U nosných struktur obráběcích strojů jde při vyslovení pojmu dynamika zejména o vibrace (mechanické kmitání, chvění) a jejich tlumení. Vedle statických zatížení mají značný význam právě dynamická (v čase proměnná) zatížení. Vibrace jsou zdroji hluku a především se jedná o velmi škodlivé jevy, ovlivňující pracovní přesnost stroje. Mechanické kmitání namáhá součásti až na mez jejich pevnosti, zhoršuje jakost obráběné plochy a snižuje trvanlivost nástrojů [5] [10].

U obráběcích strojů se vyskytují čtyři základní druhy kmitání:

- kmitání vlastní (volné);
- kmitání vynucené (buzené);
- kmitání samobuzené;
- trhavé pohyby (Slip Stick) [10].

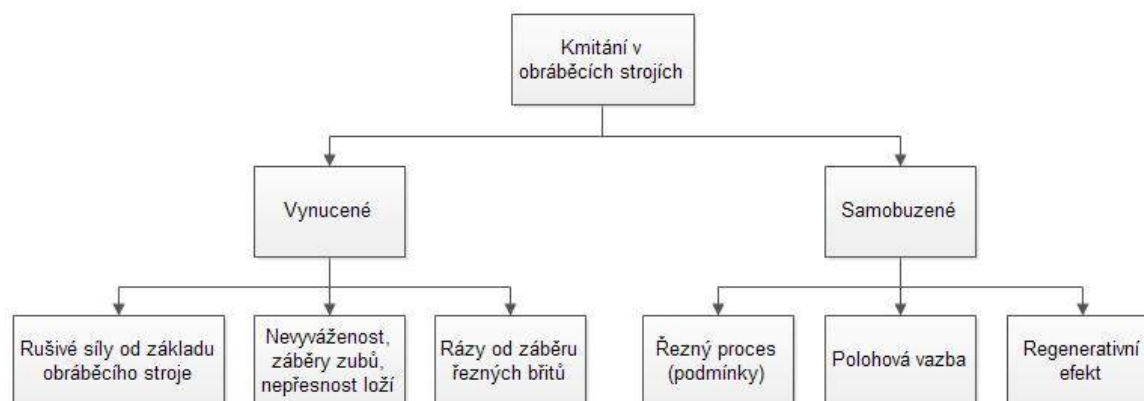
Vlastní kmitání lze dále rozdělit na tlumené a netlumené (v reálném světě neexistuje). Vlastní kmitání tlumené může vzniknout vychýlením tuhé, pružně uložené hmoty z klidové polohy účinkem síly nebo rázu s jejich následným zánikem. Například se jedná o záběr nástroje do materiálu, zapnutí spojky v pohonu, tvrdé místo v materiálu, ráz vnějšího okolí přenesený na stroj apod. Pakliže má soustava dostatečnou statickou tuhost a tlumení, vliv těchto kmitů lze zanedbat [5] [10].

Kmitání nucené (buzené) vzniká tehdy, působí-li na soustavu obráběcího stroje periodicky proměnlivá rušivá síla. Charakteristikou je to, že frekvence vynuceného kmitání se shoduje s frekvencí budící síly. Samobuzené kmity vznikají mezi obrobkem a nástrojem bez periodického vnějšího účinku. Projevují se hlukem a stopami chvění na obrobeném povrchu (obrázek 17). Toto kmitání se však projevuje pouze v určitém rozmezí rezných podmínek a změnou těchto podmínek lze řezání stabilizovat. Existují dva experimentálně způsoby vzniku samobuzeného kmitání. Prvním je vlnitost obrobeného povrchu, kdy nástroj periodicky mění průřez třísky při opakovaném přejezdu vln na povrchu obrobku a mění tak velikost rezné síly, která má za následek vyvolání kmitání. Druhý princip je princip polohové vazby, který založen na vlivu přebytku energie při rezném procesu, který následně překonává tlumení a udržuje systém ve stálém kmitání [5] [10].



Obr. 17) Stopy po obrábění při samobuzeném kmitání [15]

Příčiny vzniku u obou druhů kmitání jsou vyobrazeny na obrázku 18 a dále jsou popsány postupy zabraňující nebo snížení pravděpodobnosti jejich vzniku [5] [10].



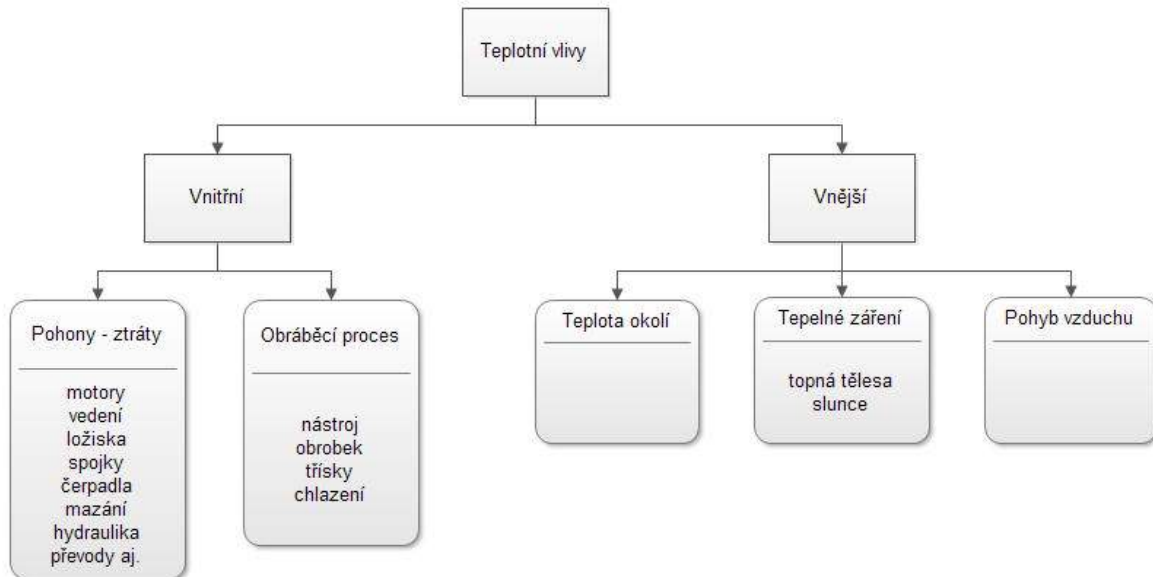
Obr. 18) Příčiny vzniku kmitání v obráběcích strojích [10]

Pro dosažení co nejvyšší dynamické stability se doporučuje:

- vyvážit rotační součásti na strojích pro vyvažování (hřídele, ozubená kola, nástroje, spojky, rotory elektromotorů apod.) – vyloučení vynuceného buzení;
- zvýšit jakost výroby a montáže ozubených kol, ložisek a dalších rozhodujících součástí – vyloučení vynuceného buzení;
- zmenšit hloubku třísky a tím pádem snížit amplitudu vynuceného kmitání a bohužel také výkon obrábění – vyloučení vynuceného buzení i snížení pravděpodobnosti vzniku samobuzeného kmitání;
- využít torzního tlumiče nebo frézovací hlavy s nestejnou roztečí nožů – vyloučení vynuceného buzení a zlepšení tlumení;
- zvýšení tuhosti rozhodujících součástí (zvýšení frekvence vlastních kmitů) – vyloučení vynuceného buzení;
- uložení stroje na základ nepřenášející chvění z okolí stroje – vyloučení vynuceného buzení;
- zvýšení nebo snížení otáček hlavního vřetene, díky čemuž se lze vyhnout oblasti rezonance – vyloučení vynuceného buzení i snížení pravděpodobnosti vzniku samobuzeného kmitání;
- zvolit tužší uložení nástroje (zkrácení vyložení nože, uložit do těsného pouzdra apod.) – snížení pravděpodobnosti samobuzeného kmitání;
- snížení tření na řezné části např. zavedením řezné kapaliny nebo snížením drsnosti řezných ploch nástroje – snížení pravděpodobnosti samobuzeného kmitání;
- využít tlumících schopností materiálu (např. u litiny mechanické tření volného grafitu) – zlepšení tlumení;
- využít tlumení ve stykových plochách (zaškrabané plochy navlhčené olejem) – zlepšení tlumení;
- využít vnitřní třecí plochy (mezistěny, žebra) a vyplnit vnitřní prostor tlumící hmotou – zlepšení tlumení [5] [10].

4.1.3 Teplotní stabilita nosných soustav

V provozu jsou obráběcí stroje vystaveny působení řadě zdrojů tepla, které v závislosti na zatížení (výkon, otáčky) a čase ovlivňují změny teploty jednotlivých uzlů stroje. Tyto změny jsou poté příčinou nežádoucích deformací, které mají nepříznivý vliv na přesnost a výrobnost obráběcích strojů. Dělení vlivů je znázorněno na obrázku 19 [10].



Obr. 19) Dělení teplotních vlivů na obráběcí stroje [5]

Největší část tepla vzniká v místě řezu, přičemž samotné teplo je přibližně přeměnou mechanické práce, která je vykonána nástrojem při oddělování třísky z obrobku [10].

Odvod tepla z místa vzniku se děje především:

- vedením (kondukcí) – například v oblasti tvoření třísky;
- prouděním (konvekcí) – například mezi obrobkem a řeznou kapalinou;
- sáláním (radiací) – elektromagnetickým vlněním v prostředí [10].

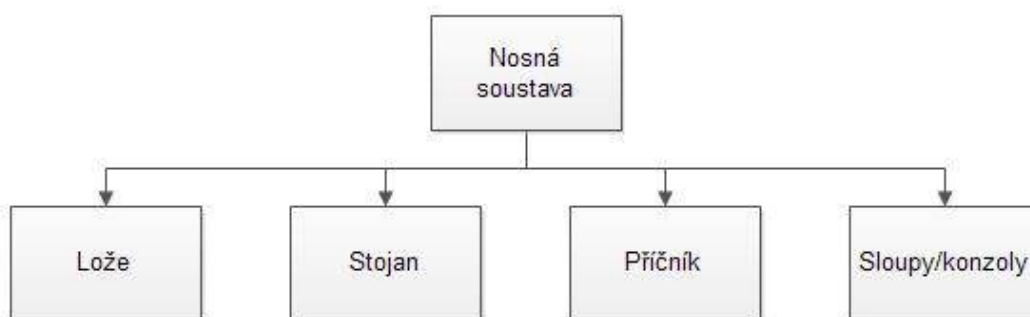
Pro dosažení co nejvyšší teplotní stability/tuhosti se doporučuje:

- Konstrukčními opatřeními:
 - zvýšit účinnost všech uzlů a prvků;
 - umístit zdroje tepla mimo vnitřní prostor stroje (motory, hydraulická zařízení apod.);
 - dodržovat zásady symetričnosti konstrukce uzlů podléhajícím vlivu oteplování;
 - volit dělicí roviny uzlů tak, aby deformace v kritickém směru byly minimální (směr deformace volit ve směru tečny k obráběné ploše) [10].
- Odvodem tepla:
 - odvod tepla vznikajícího v ložiscích, převodech, vedení apod.;
 - chlazení při řezném procesu nebo některých hlavních uzlů (např. vřeteník);
 - zajistit plynulý odvod třísek z pracovního procesu;
 - dimenzovat plochy pro odvod tepla [10].

- Kompenzacemi:
 - využít materiálů s různými součiniteli roztažnosti;
 - nahřívat určité části stroje;
 - aktivně kompenzovat teplotní deformace [10].
- Klimatizací:
 - udržovat konstantní teplotu v hale (např. $20\text{ °C} \pm 1\text{ °C}$);
 - kontrolovat proudění vzduchu;
 - clonit záření [10].

4.2 Konstrukční prvky nosných soustav

Základní prvky jsou vyobrazeny na obrázku 20. Použití těchto prvků vždy záleží na typu daného stroje (obrázek 12). Vzájemné spojení je realizováno skrze připojovací plochy.



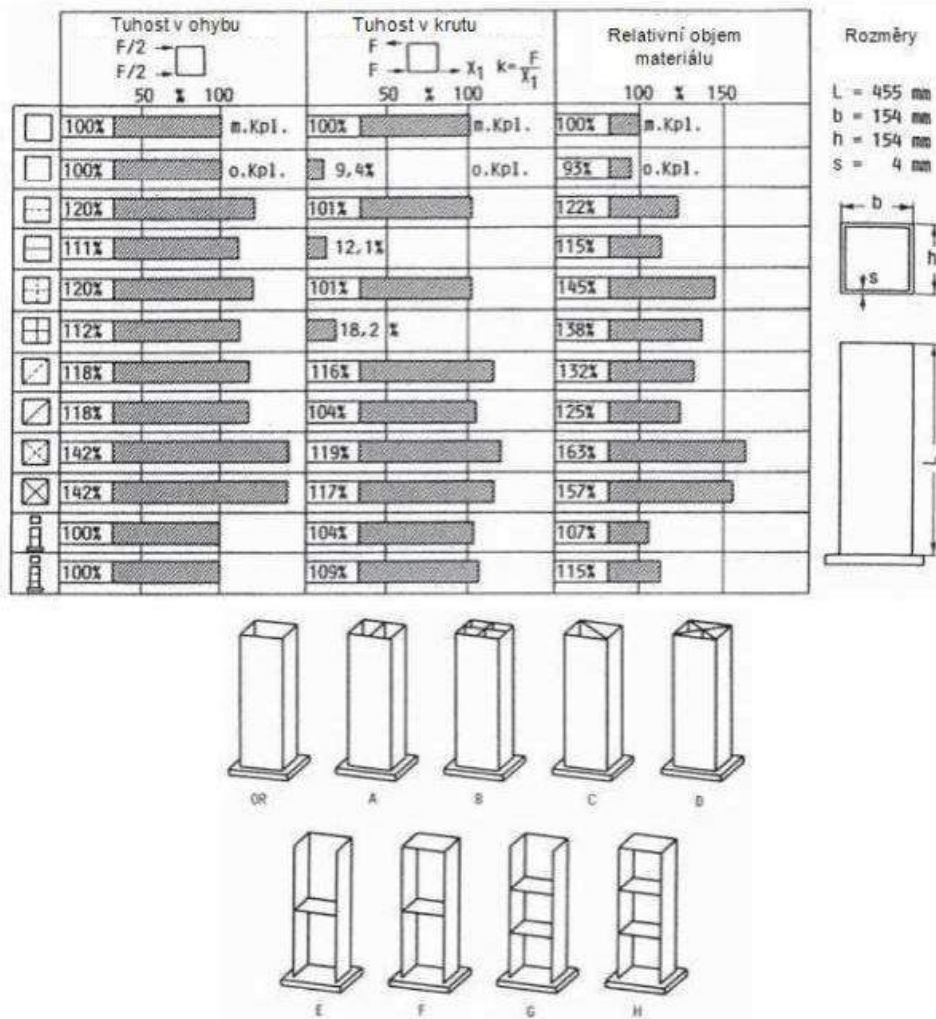
Obr. 20) Prvky nosné soustavy obráběcích strojů [5]

Konstrukční principy ovlivňující pracovní přesnost stroje vzhledem k nosné soustavě jsou následující:

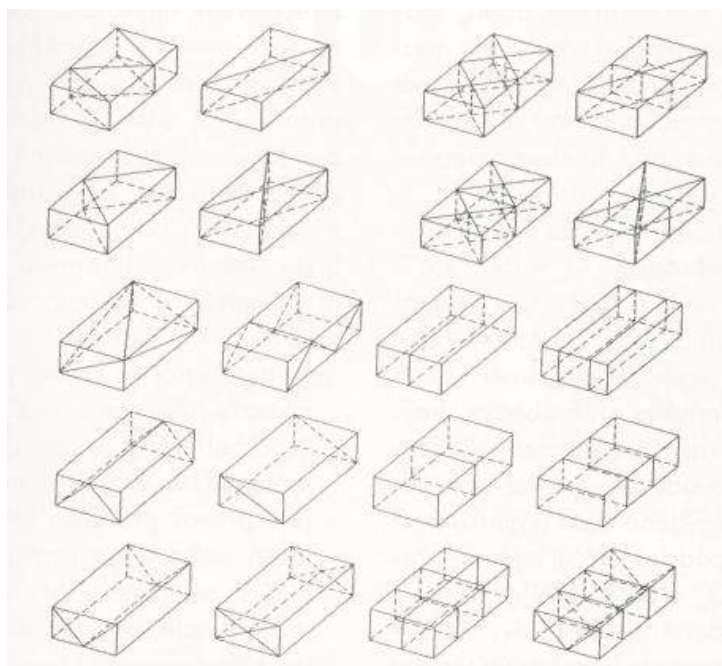
- zvolený materiál (příp. jeho jakost);
- konstrukční provedení profilů (obrázek 21);
- konstrukční provedení žebrování (obrázek 21 a 22);
- konstrukční provedení spojovacích ploch;
- provedení pohyblivých spojení a uložení;
- provedení spojení mezi dílci;
- uvažované způsoby zatěžování;
- uložení rámu na základu;
- dobrý a rychlý odvod třísek mimo stroj.

4.2.1 Konstrukční provedení profilů, žebrování a spojení dílců

Konstrukční provedení profilů rámu a jejich žebrování je vztaženo k jejich co největší tuhosti. Tyto prvky musí přenášet ohybová a krutová zatížení. Typy profilů rámových součástí a jejich teoretické možnosti žebrování jsou patrné z obrázku 21 a 22. Tabulka ukazuje, že žádné z řešení není univerzální a je tedy potřeba u všech typů rámu posuzovat individuálně působící vlivy (viz kapitola 4.1) a následný návrh ověřit metodou konečných prvků a reálnými zkouškami [5].



Obr. 21) Typy profilů a žebrování rámových součástí [5]

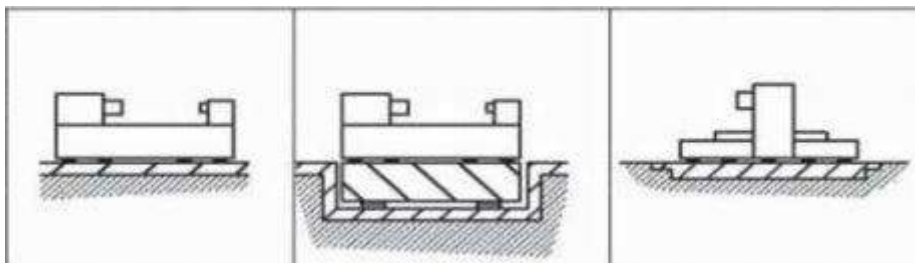


Obr. 22) Teoretické možnosti žebrování rámu [5]

4.2.2 Konstrukční provedení uložení na základu a spojení dílců

Správně dimenzovaný základ a uložení obráběcího stroje má velký vliv na jeho celkovou tuhost. Možnosti uložení strojů jsou následující (obrázek 23):

- volné ustavení;
- uložení na samostatném základě;
- uložení na samostatném izolovaném základě [5].



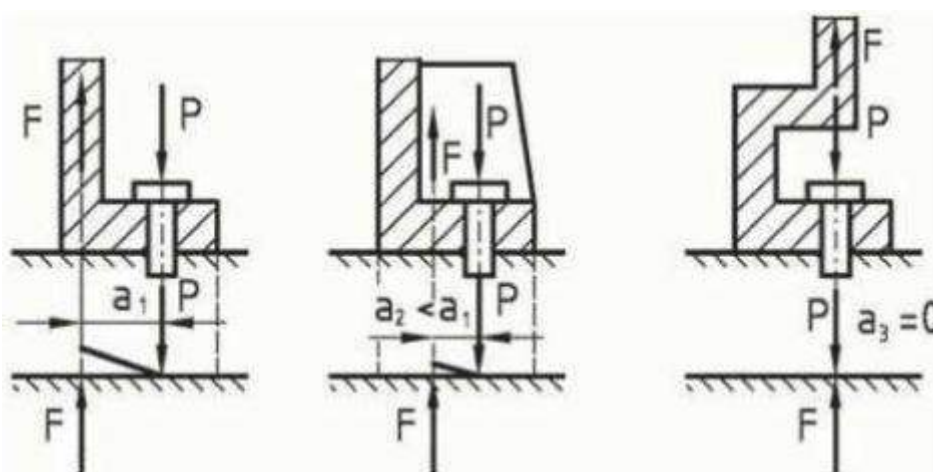
Obr. 23) Možnosti uložení strojů na základ [5]

Uložením strojů na základ se dosahuje až $4\times$ větší tuhosti, velkou nevýhodou je však fakt, že je třeba kopat v základech budovy. Používá se zejména u přesných obráběcích strojů příp. u středních a velkých strojů. Uložení strojů s dostatečně tuhým rámem lze aplikovat volně přímo na podlahu haly pomocí pevných nebo pružných stavitelných podložek [5].

Při spojování součástí rámu přírubovými spoji je doporučeno dodržovat několik zásad:

- rozměry základny příruby volit co největší (kvůli snížení pákového účinku sil);
- volit co nejmenší vzdálenost osy šroubu od stěny;
- tloušťku příruby volíme co největší pro zvětšení kontaktní zóny spoje [5].

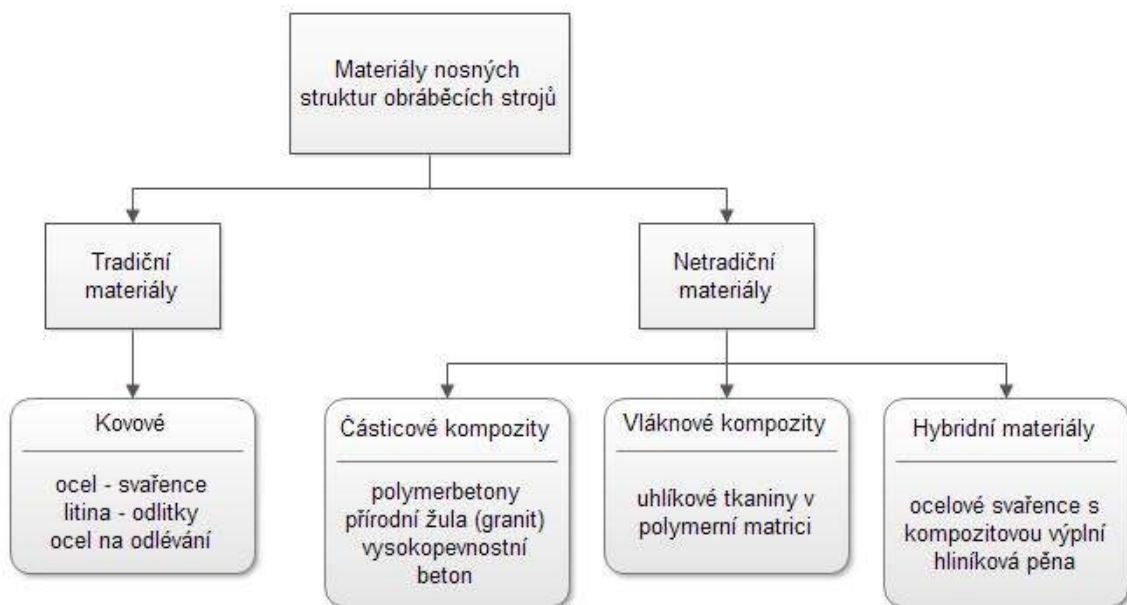
Princip ohybového namáhání přírubových spojů je patrný z obrázku 24. Varianta vpravo představuje umístění osy šroubů přímo do osy stěny, která ohybové momenty vyloučí [5].



Obr. 24) 3 typy konstrukce přírubových spojů [5]

4.3 Materiály nosných soustav

Mezi základní materiály tradičně využívané při konstrukci nosné soustavy obráběcích strojů patří zejména oceli a litiny, příp. oceli na odlévání. Dobré mechanické vlastnosti, jednoduchá výroba, nízké náklady a snadná recyklovatelnost, to jsou zásadní výhody, které hovoří pro jejich použití. Na druhé straně stojí požadavky na zeštíhlování a zlepšování vlastností dílců nosných soustav obráběcích strojů za současného snižování nákladů a také potřeba zvýšené schopnosti tlumení kmitů a chvění souvisejících s HSC obráběním. Tyto požadavky dokážou splnit struktury z moderních materiálů (neželezné materiály, hybridní sendvičové struktury apod.), které často kombinují tradiční i netradiční materiály používané ve stavbě nosných struktur. Základní přehled materiálů využívaných ve stavbě rámu obráběcích strojů je zobrazen na obrázku 25 [5] [11] [16].



Obr. 25) Základní materiály využívané na rámy obráběcích strojů [5]

4.3.1 Požadavky na volený materiál nosných struktur

Pro volbu vhodného materiálu na jednotlivé součásti nosné soustavy je třeba dbát zejména na následující aspekty:

- mechanické vlastnosti;
- technologické možnosti výroby;
- ekonomičnost konstrukce;
- vhodnost pro danou aplikaci stroje.

Při volbě druhu materiálu je potřeba posuzovat jeho základní fyzikální vlastnosti, které ovlivňují technické a provozní vlastnosti celého stroje (tabulka 2).

Tab 2) Závislost mezi fyzikálními a technicko-provozními vlastnostmi materiálů [10]

Fyzikální vlastnost	→	Technické a provozní vlastnosti stroje
pevnost (tah, tlak, ohyb, krut)	→	bezpečnost proti trvalé deformaci a zlomení
specifická hmotnost	→	hmotnost, statické a dynamické vlastnosti
modul pružnosti	→	statická a dynamická tuhost
útlum chvění	→	dynamické vlastnosti
kluzné vlastnosti, tvrdost	→	tření a opotřebení v kluzných zónách
vnitřní pnutí	→	trvalá přesnost (dlouhodobá)
tepelná roztažnost, vodivost	→	tepelná stabilita

Mezi pevnostní charakteristiky lze počítat mez pevnosti, kluzu a mez únavy. Pro obráběcí stroje jsou podstatné zejména mez kluzu a mez únavy, také tvrdost povrchů stykových ploch. Z technologických vlastností lze jako důležité vybrat dobré schopnosti obrobitelnosti, příp. svařitelnosti nebo slévateľnosti a následného tepelného zpracování. Nutné je zvažovat pro danou aplikaci i chemické vlastnosti, zejména korozivzdornost či odolnosti vůči agresivním kapalinám [17].

4.3.2 Ocelové svařence

Svařované konstrukce nosných soustav obráběcích strojů využívají ocelové profily nebo válcované plechy, u kterých je zaručena svařitelnost (nízký % obsah uhlíku). Počet svarů, jejich směr a velikost musejí být voleny tak, aby nedocházelo k vzájemnému pnutí, které zbortí profil svařence. Z těchto důvodů jsou voleny průběžné svary malých velikostí. Tyto konstrukce jsou vhodné zejména pro malosériové produkce, příp. pro výrobu jednotlivých kusů. Ve svařovaných konstrukcích vzniká vnitřní pnutí ve větší míře než u odlitku a je tedy potřeba toto pnutí odstranit pro správnou dlouhodobou pracovní přesnost stroje [5] [18].

Výhody a nevýhody při použití ocelových svařenců jsou zobrazeny v tabulce 3.

Tab 3) Výhody a nevýhody ocelových svařenců [5] [10] [12]

Výhody	Nevýhody
vyšší modul pružnosti, mez pevnosti	horší obrobitelnost
nižší hmotnost oproti	nehodné pro větší série výroby
výhodné pro malé série výroby	horší tlumící vlastnosti
možnost dodatečných oprav či dodatečných úprav	základní materiál nelze použít pro výrobu vodících ploch
kratší dodací lhůty oproti odlitkům	možnost vzniku větších vnitřních pnutí
lze vyrobít zcela uzavřené profily s větší tuhostí v krutu při poměrně malé váze	

Příklad svařované konstrukce lože stroje BF60 od turecké společnosti Baykal je zobrazen na obrázku 26. Příklad svařované konstrukce portálu stroje společnosti Benazzato je zobrazen na obrázku 27.



Obr. 26) Svařované lože společnosti Baykal [19]



Obr. 27) Svařovaný portál stroje společnosti Benazzato S.r.l. [20]

4.3.3 Litiny a ocel na odlévání

Litiny a oceli na odlévání jsou dnes nejpoužívanějšími materiály ve výrobě nosných struktur obráběcích strojů. Tvar odlitku musí být co nejjednodušší a téměř vždy je po konstrukčním návrhu upravován na technologické zvyklosti příslušné slévárny. Průřezy namáhané v kroucení se nedají u odlitků vytvořit zcela uzavřené, proto je nutno volit tlustší stěny než u součástí svařovaných z ocelového plechu. Konstrukční řešení musí odpovídat technologickým požadavkům, které jsou na ně kladeny (v modelárně, formovně, jádrovně, při strojním obrábění atd.). S ohledem na práci při formování, je třeba v maximální míře dávat přednost tvarům bez jádra. K výrobě dutých tvarů je zapotřebí drahých jader, u kterých je třeba mít dostatečný počet děr pro jejich uložení a odstranění. U šedé litiny je vhodné volit obráběné vodící plochy ve spodku formy. U velkých součástí nosných soustav je třeba dbát faktu, že je obtížné a nákladné s ním manipulovat a tedy volit obráběné povrchy tak, aby neovlivňovaly negativně výrobní proces. Při odlévání vznikají v odlitku vnitřní pnutí, která je potřeba následně odstranit. K tomuto odstranění slouží přirozené stárnutí, tedy proces, při němž je odlitek ponechán určitou dobu vystavený vnějším povětrnostním podmínkám. V důsledku změny teploty dochází k teplotním dilatacím a tím k odstranění pnutí. Dalším procesem může být umělé stárnutí, kterým je možné odstranit až 80% pnutí v odlitku při zkrácení potřebného času na řád dnů. Výhody a nevýhody litin jsou uvedeny v tabulce 4 [5] [18].

Tab 4) Výhody a nevýhody litin – šedá/tvárná litina [5] [12] [18]

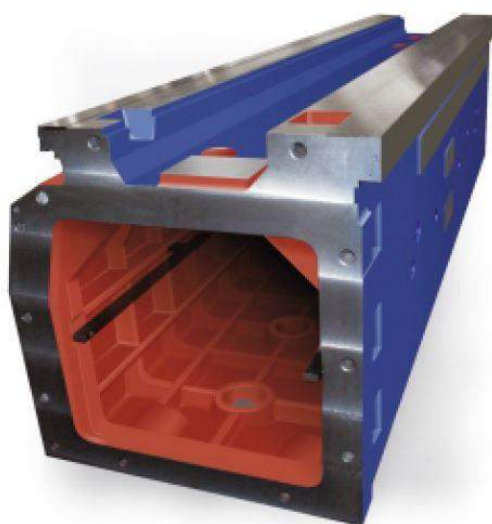
Výhody	Nevýhody
dobré tlumení dynamických kmitů	vyšší spotřeba materiálu
dobrá obrobiteľnosť	vyšší hmotnosť
příznivá cena pro vyšší série výroby	menší modul pružnosti
dobré kluzné vlastnosti	nevhodné pro malé série (cena forem apod.)
známá technologie konstrukce a výroby	nemožnosť oprav či dodatečných úprav

Ocel na odlévání je slitina železa s uhlíkem, křemíkem, manganem a dalšími prvky, jež mohou mít na základě předpisu zaručenou svařitelnost. Ocelové odlitky tak lze dodatečně upravovat či opravovat defekty. Výhodné jsou zejména u složitých odlitků. Nevýhodou oproti litinám je horší obrobiteľnosť.

Na obrázku 28 je zobrazeno řešení lože deskového vyvrtávacího stroje WFT 13 CNC od společnosti Fermat. Na obrázku 29 je pak vyobrazeno lože ze šedé litiny s označením GG25 stroje WHN(Q) 13 CNC od společnosti TOS Varnsdorf.

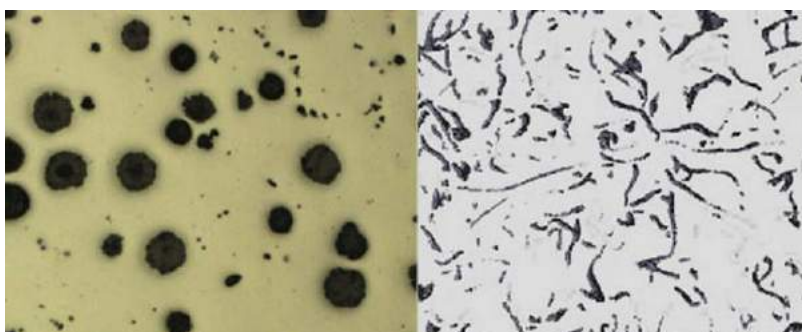


Obr. 28) Lože stroje WFT 13 CNC společnosti Fermat [6]



Obr. 29) Stojan stroje WHN(Q) 13 CNC společnosti TOS Varnsdorf [9]

Mezi litiny významné pro obráběcí stroje patří hlavně šedá (s lupínkovým grafitem) a tvárná litina (s kuličkovým grafitem). Pro výrobu ráků jsou využívány převážně šedé litiny s označením EN GJL-200/250, případně při požadavku na vysokou pevnost (těžké obráběcí stroje) EN-GJL-300/350. Struktury obou druhů jsou zobrazeny na obrázku 30.



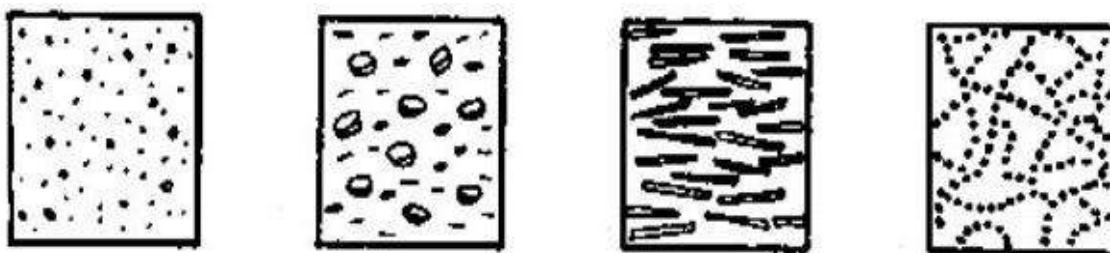
Obr. 30) Struktura tvárné a šedé litiny [21]

4.3.4 Kompozitní materiály

Obecně vzato lze kompozitním materiálem nazvat každý materiál, který obsahuje dvě rozdílné fáze. Fáze držící materiál pohromadě je zvaná jako pojivo (případně matrice). Fáze vyplňující materiál je pak zvaná jako plnivo [22].

Podle tvaru plniva je možné kompozity rozdělit do několika skupin (obrázek 31):

- vláknové kompozity;
- částicové kompozity;
- vločkové kompozity;
- hybridní kompozity [22].



Obr. 31) Typy kompozitů – zleva částicový, vločkový a vláknový [22]

Hybridní kompozity jsou například kombinace několika druhů tkanin [22].

4.3.5 Vláknové kompozity

V souvislosti s výrobními stroji a vláknovými kompozity je možné mluvit zejména o vláknových kompozitech na bázi uhlíkových (případně aramidových) vláken vyztužujících polymerní matrici. Tyto materiály mají několik zásadních výhod a to zejména vysoké hodnoty specifické tuhosti a pevnosti při velmi nízké váze. Jejich nevýhodami jsou vysoké výrobní náklady, komplikované výrobní postupy a nemožnost použití pro nosné struktury obráběcích strojů z důvodu téměř nulového tlumení vibrací a chvění. Z těchto důvodů jsou využívány pro experimenty s jejich použitím na konstrukci vřeteníků (obrázek 32) [23].

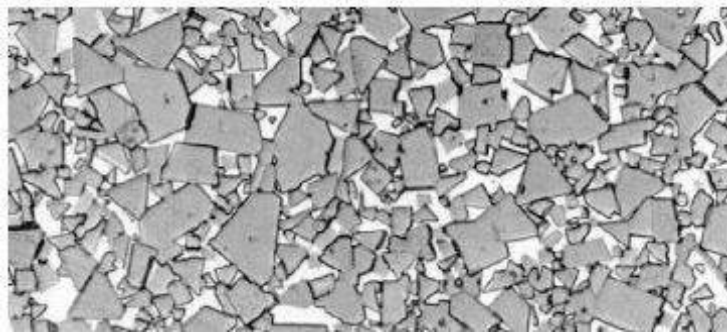


Obr. 32) Vřeteník z vláknového kompozitu od společnosti Compotech [24]

Pro účely této práce jsou mnohem zajímavější částicové kompozity a zejména betonové materiály, které budou podrobněji rozebrány v kapitolách 4.3.6 až 4.3.13.

4.3.6 Částicové kompozity

Za částicový kompozit může být považován materiál, jehož plnivo tvoří částice – tedy fáze, jejíž rozměry se v různých směrech příliš nemění. Tyto částice mohou mít tvar kulový, krychlový, plochý či jejich různé kombinace. Nejčastějšími plnivy jsou kameniva, konstrukční keramika a kovy. Pojiva se využívají kovová, keramická nebo polymerní. Typickými představiteli skupiny částicových kompozitů, využívaných ve strojírenství, jsou polymerbetony, betony nebo řezné materiály – např. cermety, řezná keramika, kubický nitrid bóru (obrázek 33) [22] [23].



Obr. 33) Mikrostruktura slinutého karbidu WC+Co [25]

4.3.7 Betonové materiály

Betonové materiály se dnes již běžně uplatňují ve stavebnictví, do strojírenství však svoji cestu stále hledají. Uplatnění zde nacházejí zejména následující skupiny:

- cementový beton (hydrobeton);
- polymerbeton;
- vysokohodnotný beton (podmnožinou je vysokopevnostní beton) [3].

Důležitou vlastností všech typů betonů je fakt, že do vzniku trhliny v průřezu se materiál chová lineárně (podle Hookova zákona), tedy při malých deformacích je závislost napětí na deformaci v materiálu lineární [53].

Betonové materiály patří do skupiny částicových kompozitů, tedy materiálů složených z více fází. Aby mohly tyto fáze tvořit plnohodnotný materiál pro dané podmínky, je využíváno velké řady přísad, které zlepšují technologické, mechanické a užitné vlastnosti výsledného betonu [3].

Jedná se o následující přísady:

- plastifikátory/superplastifikátory – snižují obsah vody;
- regulátory tuhnutí – mění dobu tuhnutí;
- provzdušňující přísady – zvyšují odolnost proti zmrazování, odměšování vody, plasticitu;
- stabilizátory/aktivátory – dohromady tvoří takzvané superzpomalovače (ekologické hledisko);
- inhibitory koroze – zamezují/zpomalují korozi betonu;
- přísady zamezující smrštění – zamezuje vzniku trhlinek na povrchu betonu z důvodu vznikajícího tahového napětí při tuhnutí [3].

4.3.8 Cementový beton (hydrobeton)

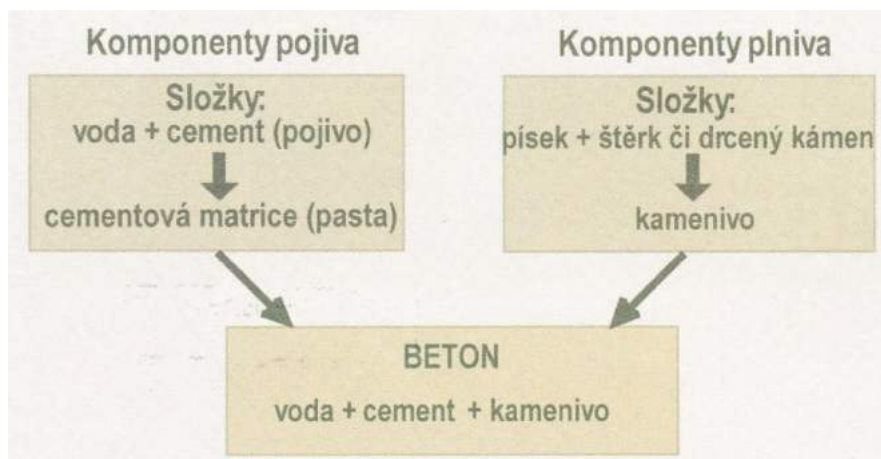
Ve své podstatě se cementový beton skládá ze dvou základních částí:

- kamenů (kameniva);
- cementové matrice [3].



Obr. 34) Řez betonem [3]

Z obrázku 34 je patrná struktura materiálu. Hrubší a drobnější kamenivo je zde obklopeno cementovým pojivem. Kamenivo se nejčastěji sestává z několika složek – šterku, písku a drti. Cementovou matici tvoří cement a voda. Výsledný systém tvořící cementový beton je zobrazen na obrázku 35. Nejznámějším a nejpoužívanějším cementem je dnes portlandský cement. Dle stádia tvrdnutí betonu rozlišujeme čerstvý a vytvrzený beton [3].



Obr. 35) Složky běžného betonu [3]

Mezi vlastnosti, které tento materiál vykazuje, patří zejména dostatečná pevnost v tlaku, nedokáže však odolávat ohybovému a smykovému napětí. U běžného betonu dosahují hodnoty pevnosti v tlaku od 10 do 60 MPa. Pevnost v tahu bývá v rozmezí 1 až 4 MPa a smyková pevnost pak 4 až 6 MPa. Pro zvýšení těchto hodnot se používá tzv. železobeton, případně předepjaté železobetonové konstrukce. Ocelové výztuže zalité ve struktuře betonu pomáhají základnímu materiálu s překonáním právě tahových a ohybových zatěžujících účinků. Výhody a nevýhody podstatné z hlediska výrobních strojů jsou uvedeny v tabulce 5 [3].

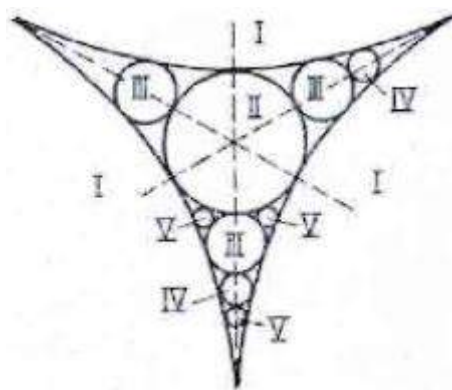
Tab 5) Výhody a nevýhody cementového betonu (hydrobetonu) [16]

Výhody	Nevýhody
vynikající tlumení dynamických kmitů	nízké hodnoty meze pevnosti v tahu a ohybu
lze dosáhnout zvětšování objemu při tuhnutí	málo známá technologie konstrukce a výroby součástí pro obráběcí stroje
dobrá přilnavost k ocelovým materiálům	malá odolnost vůči působení olejů, solí a dalších chemikálií
dostatečná pevnost v tlaku	nemožnost oprav či dodatečných úprav
příznivá cena	možnost dosáhnout většího objemu při tuhnutí

4.3.9 Polymerbetony

Polymerbeton (německy Reaktionsharzbeton RHB, Polymerbeton, Mineralguß; anglicky Polymer Concrete PC, Mineral casting) je částicový kompozit, tvořený směsí polymerního pojiva a plnivem několika frakcí. Polymerní pojiva zde zastupují pryskyřice polyesterové, epoxidové, polyuretanové, fenolformaldehydové, polyakrylové a další. Funkci plniv zde plní různé druhy a velikosti kameniva – SiO_2 , Al_2O_3 , TiO_2 , Fe_2O_3 , P_2O_5 , Cr_2O_3 , CaO , MgO , K_2O , Na_2O a další nebo jiná jako například skleněné a kovové kuličky, kovový prášek. Při návrhu polymerbetonové směsi pro uplatnění ve stavbě strojů hrají roli zejména tvar, velikost, hmotnostní podíl a rozdělení plniva ve struktuře materiálu [23].

Dle velikosti mezer (pórovitosti) v materiálu je možné rozeznávat několik typů systémů (obrázek 36):



Obr. 36) Disperzní systémy dle velikosti pórovitosti materiálu [23]

Velikost pórovitosti určuje zejména pevnost výsledného materiálu. Čím méně je ve struktuře mezer a tím pádem i pojiva, tím je pevnější. Od 3-4 frakce plniva již je zisk na hutnosti zanedbatelný, proto jsou u materiálů využívaných ve stavbě součástí upřednostňovány systémy se 3-4 frakcemi o velikostech u moučky méně než 0,1mm, u písku 0,1-2mm a u šterku až 16mm. Pro zlepšení vlastností se využívají přísady jako například látky snižující viskozitu, zlepšující zatékání ve formě, přilnavost a od vzdušnění. Struktury polymerbetonu využívané u obráběcích strojů jsou zobrazeny na obrázku 37. Výhody a nevýhody polymerbetonů jsou uvedeny v tabulce 6 [23].



Obr. 37) Polymerbeton EPUMENT – zleva čerstvá a vytvrzená směs [26]

Tab 6) Výhody a nevýhody polymerbetonů [9] [23]

Výhody	Nevýhody
vynikající tlumení dynamických kmitů (8× až 10× vyšší než u litiny a oceli)	drahá technologie výroby (výroba drahých forem)
vysoká měrná tepelná kapacita	nerovnoměrné rozložení teplotních deformací
nízká tepelná vodivost	přehřívání míst se silnými zdroji tepla
vysoká tuhost oproti litinovým odlitkům či ocelovým svařencům	nemožnost přenosu sil koncentrovaných do malých ploch (například závity) – nutno konstruovat speciální prvky pro přenos sil
dobrá chemická odolnost	dražší než standardní beton
snadná ekologická likvidace	

Vlivem nízké měrné hmotnosti jsou polymerbetonové odlitky vyráběny s výrazně silnějšími průřezy a tím pádem mají i výrazně vyšší tuhost, než stejně těžké litinové odlitky nebo ocelové svařence [23].

4.3.10 Vysokohodnotný beton (HPC)

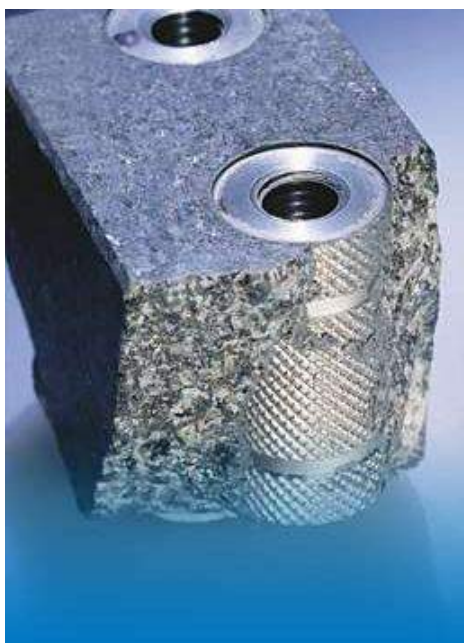
Pod názvem vysokohodnotný beton (HPC) se začleňuje množina vysokopevnostních betonů (HSC) a dalších, které oproti standardnímu betonu obsahují pojiva a plniva, která dovolují dosáhnout pevnosti v tlaku až 150 MPa, vysoké houževnatosti, odolnosti proti trhlinám nebo dlouhodobé stálosti. Toho je možné dosáhnout například použitím speciálního drceného kameniva (žuly, čediče), charakterizovaného vysokou pevností nebo zařazením křemičitých úletů do struktury materiálu, které mají malou velikost zrn a mohou se tedy vměstnat mezi částice cementu a snížit tak pórovitost materiálu. Nadskupinou k vysokohodnotným betonům jsou ultra vysokohodnotné betony (UHPC), které mohou dosahovat pevnosti tlaku 200 MPa a více. Tyto materiály mají velmi malou pórovitost. Výhody a nevýhody HPC betonů jsou uvedeny v tabulce 7 [3] [5].

Tab 7) Výhody a nevýhody vysokohodnotných betonů [5]

Výhody	Nevýhody
vyšší mez pevnosti v tlaku a houževnatost	nemožná výroba odlitků vyšších přesností
výrazně jednodušší technologie výroby (tekutá konzistence, pokojové teploty)	vyšší křehkost materiálu
nižší cena oproti polymerbetonům	dražší než standardní cementový beton
velmi nízká tepelná vodivost	
vysoká tlumící schopnost	
snadná ekologická likvidace	

4.3.11 Přírodní žula (Granit)

Granit je přírodní materiál těžený v oblastech jižní Afriky ve tvaru velkých kvádrů. Bloky jsou následně využívány ve stavbě základů strojů, zejména přesných souřadnicových měřicích strojů a vysoce přesných obráběcích strojů (obrázek 38). Důvodem je velmi vysoká tvarová stabilita, vysoká tuhost, velmi nízký součinitel teplotní vodivosti a nízký součinitel teplotní roztažnosti. Tyto výborné vlastnosti pro obráběcí stroje jsou však vyváženy extrémně vysokou cenou [16].



Obr. 38) Struktura Granitu a zalité závitové pouzdro [27]

4.3.12 Hybridní materiály

Hybridními materiály bývají v oboru obráběcích strojů nazývány takové materiály, které kombinují zavedené materiály (ocel, litina) s novými materiály (betony, pěny). Mezi takovéto materiály patří následující kombinace:

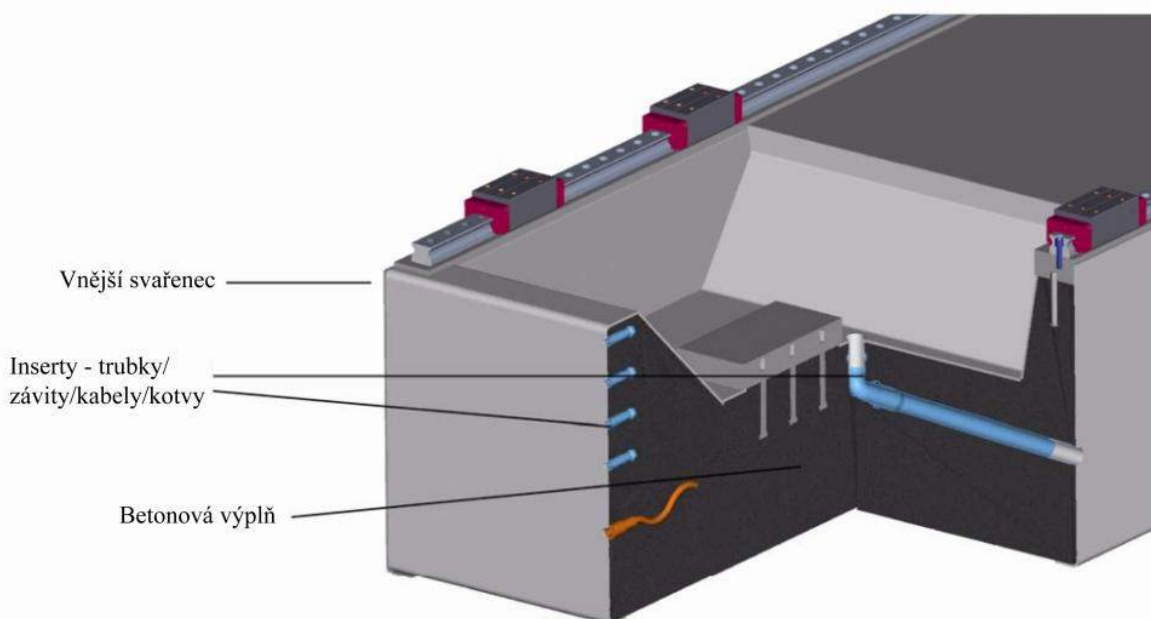
- ocelové svařence s výplní z betonu;
- litinové odlitky s výplní z betonu;
- ocelové svařence/litinové odlitky s výplní z písku;
- sendvičové struktury s hliníkovou pěnou.

4.3.13 Ocelové svařence/litinové odlitky s výplní z betonu („Sendvičové materiály“)

Velmi perspektivními budoucími materiály nosných struktur obráběcích strojů jsou ocelové svařence a litinové odlitky vyplněné cementovým nebo vysokohodnotným betonem. Důvodů pro to je hned několik:

- nízká výrobní cena;
- výborné tepelné a dynamické vlastnosti;
- vysoká výsledná tuhost součásti.

Svařenec/odlitek tvoří vnější formu pro beton (obrázek 39), který je zároveň pevně uložen uvnitř součásti a není tak třeba při výrobě používat drahých forem. Z toho důvodu jsou součásti s výplní značně levnější než samotné polymerbetonové odlitky. Problémem tohoto materiálového uspořádání je soudržnost betonu s ocelovou konstrukcí. Ocelový svařenec/odlitek z litiny jsou oproti betonu pružné a přenáší vibrace. Betonový materiál uvnitř součásti není pružný a naopak nepřenáší vibrace. Standardní betonový materiál není při tuhnutí objemově stálý a tak všechny tyto faktory mohou způsobit pozdější odlepení betonové výplně od ocelového svařence/litinového odlitku či zavedení dodatečných pnutí do vnějšího materiálu. Výsledkem odlepení je pak podstatně snížená pevnost celé konstrukce a schopnost pohlcování kmitů. Tomu lze zabránit upravením směsi betonu, zdrsněním stykových ploch, zalitím kotevních prvků a nerovností umožňujících zatékání betonu. Výsledná směs tedy musí mít co největší zatékavost [28] [29].



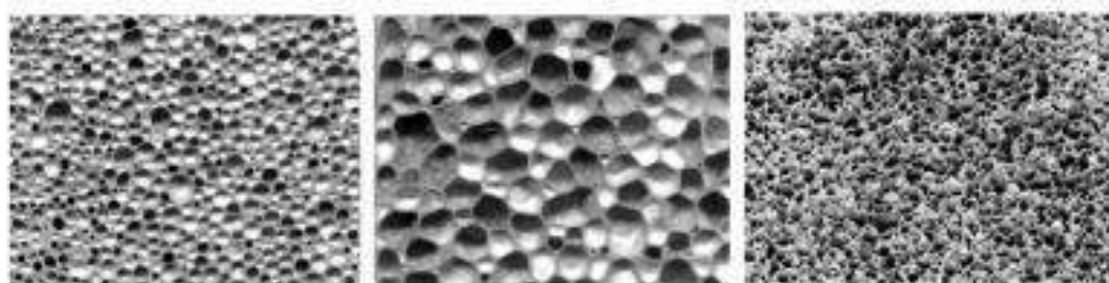
Obr. 39) Kombinace ocelového svařence s betonovou výplní společnosti Rampf [29]

4.3.14 Ocelové svařence/litinové odlitky s výplní z písku

Někteří výrobci záměrně zanechávají písková jádra ve svých odlitcích z tvárné nebo šedé litiny. Vlivem smršťování odlitku je písek se zbytky pryskyřice pevně sevřen uvnitř součásti. Odlitky bývají naplněny také samotným pískem. Písek (nebo například olověné pelety) dokáže tlumit nechtěné vibrace. Zde je však problematické zajištění přetlaku pískové směsi v dutině dílce po celou dobu životnosti součásti. Přidaná hmotnost granulátového materiálu snižuje velikost vlastních frekvencí součásti [5] [30].

4.3.15 Sendvičová struktura ocel-hliníková pěna-ocel

Hliníková pěna je odlehčený materiál pěnivého typu, který je silně porézni (obrázek 40). Stejně jako například lidské kosti nebo korály, i tento kov je díky své struktuře poměrně tuhý. Póry jsou v prostoru materiálu značně stochasticky rozmístěny a tak nelze jednoznačně určit jejich chování při různém namáhání. Póry tvoří asi 60% objemu materiálu [31].



Obr. 40) Struktura a velikost pórů různých typů hliníkových pěn [31]

4.4 Porovnání vlastností materiálů nosných soustav OS

Technické, technologické i ekonomické parametry materiálů uvedených v předchozích kapitolách jsou i s jejich vyčíslením uvedeny v tabulkách č. 8 a 9. Jelikož vždy záleží na typu materiálu a jeho složení, jsou uvedené hodnoty pouze orientační. Hodnoty meze pevnosti v tahu a tlaku pro vláknové kompozity závisí na použité tkanině, tloušťce a počtu vrstev a zejména na směru zatěžování hotového produktu.

Tab 8) Orientační porovnání technických vlastností materiálů pro nosné prvky [21] [23] [27] [32] [33] [34][35] [36]

Materiál	Měrná hmotnost (kg·m ³)	Modul pružnosti (GPa)	Mez pevnosti v tahu (MPa)	Mez pevnosti v tlaku (MPa)	Mez pevnosti v ohybu (MPa)	Poissonovo číslo (-)	Cena/kg (€/kg)
ocel	7850	210	400-1600	250-1200	150-600	0,3	1-2
šedá litina	7250	70-140	150-400	600-1000	250-500	0,26	0,5-1,5
tvárná litina	7350	170-180	350-800	800-1200	-	0,275	0,7-1,7
vláknové kompozity	1400-1600	100-800	100-7000	-	-	-	100-1000
hydrobeton	2200-2500	5-39	1,5-3,5	10-35	3-8	0,2-0,3	0,05
polymerbeton	2300-2500	30-44	10-40	140-160	15-50	0,25-0,3	0,3-0,7
HPC beton	2200-2500	50-60	8-10	100-200	3-8	0,2-0,3	0,2-0,8
přírodní žula	2800-3000	60-90	-	250	13	0.2-0.3	3-10

Tab 9) Porovnání teplotních a dynamických vlastností materiálů pro nosné prvky [23] [27] [32]

Materiál	Koeficient teplotní roztažnosti ($10^{-6}/K$)	Koeficient teplotní vodivosti ($W \cdot m^{-1}K^{-1}$)	Měrná tepelná kapacita ($KJ \cdot kg^{-1}K^{-1}$)	Měrný řezný odpor (MPa)	Dekrement útlumu (-)
ocel	11-18	47-50	0,49	~ 1000-4000	0,0023
šedá litina	9-10	47-50	0,45	~ 500-1000	0,0045
tvárná litina	11,5	36	0,46	~ 500-1000	0,004
vláknové kompozity	~ -0,5	1-50	1	~ 100-400	0,03
hydrobeton	10-11	1,6-2,3	0,8-1	-	0,038
polymerbeton	9-18	1-3	0,7-1,3	-	0,0382
HPC beton	12	1,7	0,9	-	0,0385
přírodní žula	5-7	3	845	-	0,015

4.5 Příklady kombinovaných materiálů a jejich realizací pro stroje

Materiálů na bázi kombinace oceli nebo litiny a betonu, které se využívají pro stavbu obráběcích strojů, je dnes na trhu již řada. V následujících podkapitolách je proveden krátký přehled aplikací betonů v konstrukci obráběcích strojů a porovnání vlastností těchto strojů.

4.5.1 EPUFILL- RAMPF

Technologie EPUFILL společnosti Rampf (dříve EPUCRET) kombinuje výhody ocelových svařenců a polymerbetonových směsí, které tvoří jejich výplň a které také společnost sama vyvíjí. Vyplňovány mohou být buď tenkostěnné svařence o tloušťkách 2-5 mm nebo standardní trubkové nebo profilové konstrukce s plechovými součástmi. Majoritní zatížení v obou případech přebírá vnitřní polymerbetonová výplň (obrázek 41). Tuto materiálovou kombinaci využívá například obráběcí centrum MCX 1200 společnosti Burkhart & Weber [29] [37].



Obr. 41) Technologie EPUFILL [29]

4.5.2 Lože stroje FUT - TOS Kuřim

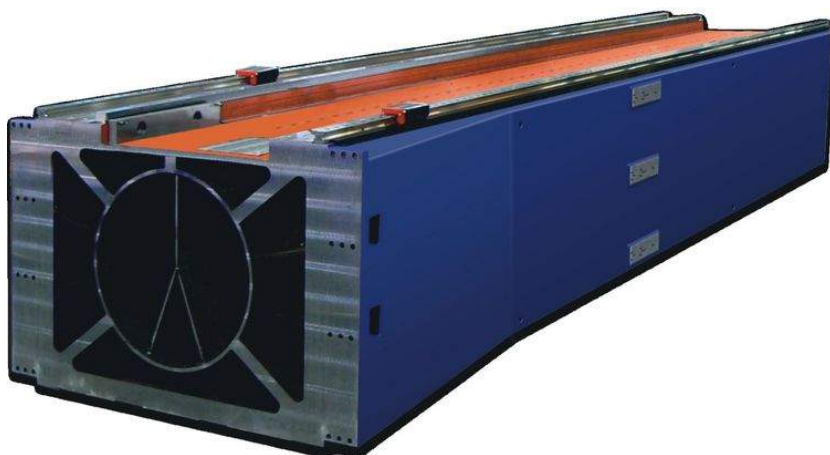
Ve spolupráci s výzkumnými organizacemi vzniklo ve společnosti TOS Kuřim ocelové lože, které je vyplněno vysokopevnostním betonem (obrázek 42). Předností tohoto lože jsou zejména nižší výrobní náklady za současné vyšší dynamické tuhosti oproti variantě se samotným svařovaným ocelovým ložem [38] [39].



Obr. 42) Lože stroje TOS FUT [38]

4.5.3 COMBItec – TOS Varnsdorf

Společnost TOS Varnsdorf vyvíjí svoji vlastní konstrukci ocelového svařence vyplněného betonovým materiálem zvanou COMBItec. Tato technologie je hojně využívána pro vyplnění hustě žebrovaných svařovaných stojanů různých strojů této značky, například deskového vyvrtávacího stroje WRD 170 nebo obráběcí centra TOSTec Prima (obrázek 43) [9].



Obr. 43) Struktura COMBItec na stojanu stroje WRD 170 [9]

4.5.4 Lože stroje BFR 2x - Reiden

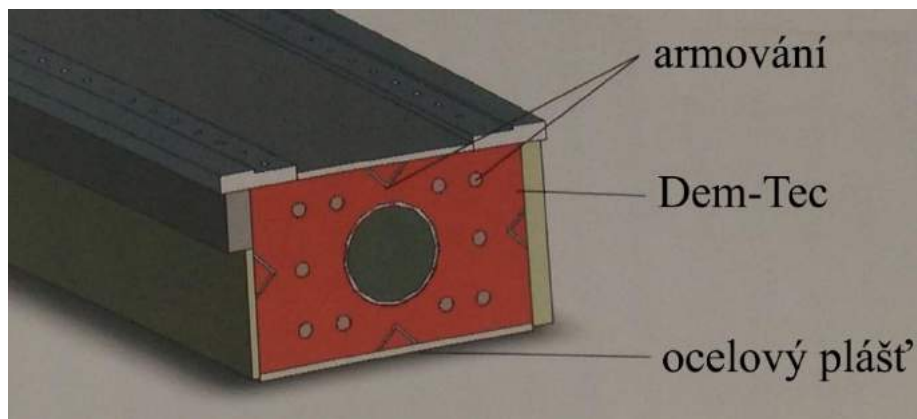
Rozdílný přístup k vyplňování konstrukčních součástí použila společnost Reiden u svých pětiosých obráběcích center s označením BFR 2x. Místo ocelového svařence je zde pro stojan využita klasická šedá litina EN-GJL-250 s mezí pevnosti 250 MPa (obrázek 44). Tento stojan je silně vyžebrován a vyplněn polymerbetonovou směsí [40].



Obr. 44) Litinové lože vylité betonovou směsí [40]

4.5.5 DemTec - Demmeler

Struktura technologie Dem-Tec společnosti Demmeler kombinuje ocelový plášť, na který je přivařeno vnitřní armování. Celá taková struktura je následně vylita polymerbetonem navrženým a vyvinutým ve společnosti Demmeler (obrázek 45) [41].



Obr. 45) Struktura součásti s technologií Dem-Tec [41]

4.5.6 Durfill- Durcrete

Německá společnost Durcrete specializující se na vývoj a aplikaci betonových materiálů pro stroje vyvinula materiál na bázi vysokopevnostního betonu, který je vhodný pro vyplnění svařovaných konstrukcí. Tento beton je založený na patentované technologii MIKRODUR, která je použita ve strojích AT-500 SBZ německé společnosti Auratronic (obrázek 46) [42].



Obr. 46) Lože stroje AT-500 SBZ ve fázi před vylitím [42]

4.6 Zanite Plus - BaseTek LLC

Společnost BaseTek sídlící v americkém Ohiu nabízí polymerbetonové materiály již od roku 2001. Jejich nejnovější produkt je obchodně nazván Zanite Plus. Tento materiál byl již úspěšně aplikován na výrobu loží brousicích strojů, ale také různých dalších základů pro stroje průmyslových partnerů, jakož i vylití současných ocelových konstrukcí (obrázek 47) [43].



Obr. 47) Základ stroje vyplněný materiálem Zanite Plus [43]

4.7 Porovnání vlastností strojů s rámy z kombinací litiny/oceli a betonů

V následující tabulce 10 jsou shrnuty vlastnosti strojů, které mají ve své rámové nosné konstrukci jednu nebo více součástí, u nichž byla při výrobě využita kombinace oceli/litiny a různých betonových materiálů.

Tab 10) Porovnání vlastností strojů s kombinovanými materiály [9] [37] [39] [40] [44]

Výrobce - stroj	Typ materiálové kombinace	Maximální posuvy v osách X/Y/Z (m)	Maximální rychloposuvy v osách X/Y/Z (m/min)	Maximální zatížení stolu (t)
Burkhart & Weber – MCX 1200	ocel a polymerbeton	2,5/1,8/1,8	50/50/50	7
TOS Kuřim – FUT	ocel a vysokopevnostní beton	6/3/2	30/30/30	-
TOS Varnsdorf – TOSTec PRIMA	ocel/beton	2,3/1,6/2,5	30/30/30	4
Reiden – BFR 24	šedá litina a polymerbeton	4/1,2/1,5	30/20/20	34
AuratronicAT-500 SBZ	ocel a vysokopevnostní beton	30/1,4/0,93	60/60/30	-

4.8 Porovnání vlastností betonových materiálů využívaných pro vylévání

V příloze 3 a 4 jsou uvedeny tabulky s výpisem volně dostupných informací o materiálech, které jsou využívány pro vylévání ocelových svařenců nebo litinových odlitků.

4.9 Součásti z polymerbetonu

Součásti, jejichž základ tvoří samotný odlitek z polymerbetonu bez kombinace s dalšími materiály, vyrábí například následující společnosti pod obchodními názvy:

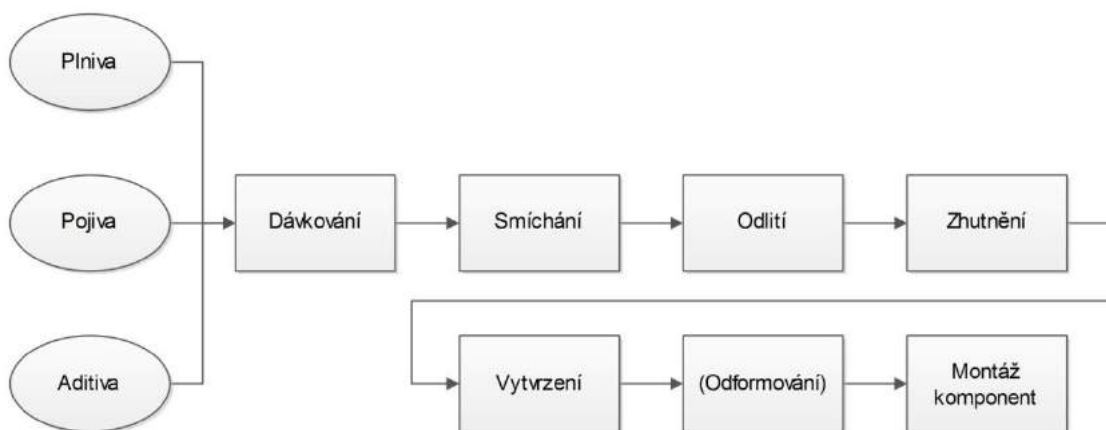
- Schneeberger – technocon;
- Basetek LLC – Zanite Plus;
- Durcrete – NANODUR;
- Rampf – EPUMENT;
- Studer – Granitan.

4.10 Technologie výroby polymerbetonových/betonem kombinovaných součástí

Každý materiál, ať už jde o běžnou ocel/litinu nebo polymerní a betonové materiály, vyžaduje určité technologické postupy k jejich správné výrobě. Při konstrukci a návrhu výroby musí být správně identifikovány požadavky, které jsou následně převedeny do výsledné konstrukce. Velkou výhodou výroby betonových materiálů je fakt, že tento proces není energeticky náročný – vytvrzování probíhá při teplotách od 20 do 50 °C (pozn.: odlévání litiny probíhá při teplotách kolem 1500 °C).

4.10.1 Proces výroby

Obrázek 48 obsahuje diagram, obecně popisující proces a fáze výroby polymerbetonových a kombinovaných dílů [23].



Obr. 48) Proces výroby betonových dílů

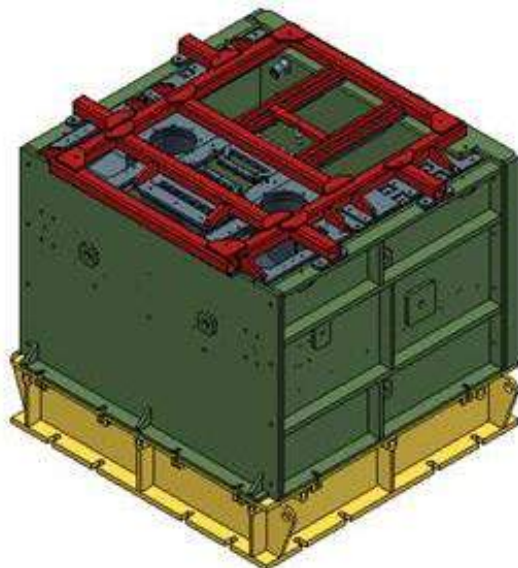
Nejprve jsou objemově dávkovacími šneky nadávkovány jednotlivé komponenty. Dle receptury jednotlivých výrobních podniků se může obsah plniva pohybovat v rozmezí 90-93% a pojiva 7-10%. Následně jsou prvky smíseny ve dvou fázích – nejprve samotná plniva a následně i s pojivou a aditivou dohromady. Výsledná směs je i přes vyšší viskozitu dobře odlévatelná. Samotné odlévání probíhá buď z licích pánví, nebo přívodem z míchačky. Ideální je odlévat více součástí naráz kvůli čistění míchaček/licích pánví. Odlévání probíhá buď do forem pro polymerbeton, nebo do předpřipravených ocelových svařenců nebo odlitek z litiny. Pro správné zatečení betonu u vodících prvků je ideální mít formu otočenou o 180 stupňů směrem k zemi. Při odlévání a po odlití je třeba směs ztuhnout. Toto se provádí buď pomocí setřásacích stolů nebo vibračními motory připojenými na formy/svařence/odlitky. Tímto procesem se ve struktuře snižuje množství pórů. Následuje proces vytvrzení, při kterém dochází k vytvrzení směsi. Tento proces je závislý na složení směsi a velikosti formy/součásti případně množství betonového materiálu využitého na konstrukci. Dosažení konečných vlastností součástí trvá přibližně 24 hodin u polymerbetonů a 28 dní u cementových betonů. Produkt je po vytvrzení v případě polymerbetonu odformován a dále probíhá opracování ploch pro vodící lišty a pravítka. V případě kombinované součásti proces odformování odpadá [23].

4.10.2 Typy forem

Formy slouží jako přesné bednění formující vylévanou směs. Využívány jsou pouze u polymerbetonových dílů a dle používaného materiálu se dělí se na následující typy:

- dřevěné;
- ocelové;
- hliníkové;
- plastové.

Využívání dřevěných a plastových forem je limitováno počtem 30 až 40 odlitek, které je možné při dané tvarové přesnosti vyrobit. Pro výrobu vyšších sérií (300 až 1 000 odlitek), jsou využívány formy kovové – hliníkové a ocelové (obrázek 49). Jejich nevýhodou je však cena, která se pohybuje v rozmezí od 6 000 do 85 000 euro za 1 formu. Před odléváním polymerbetonu jsou plochy formy natřeny vhodným separátorem, který zajistí nepřilnutí dílce k formě [23] [45].



Obr. 49) Ocelová forma pro odlévání polymerbetonu [46]

4.11 Typy insertů

Specifikem betonových dílů je nutnost zalévání přídavných komponent. Jedná se o následující prvky:

- závitová pouzdra;
- nosné úchyty (přepravní kotvy);
- kovové nebo plastové trubkové systémy pro vedení elektroinstalace, pneumatiky nebo hydrauliky;
- integrované senzory/čidla.

Závitová pouzdra slouží pro připevnění vodících lišt a odměřovacích pravítek. Tyto prvky nejsou potřebné u kombinovaných konstrukcí, například betonu s ocelí, kdy je k ocelovému vnějšímu plášti vedení přivařeno. Nejvíce namáhané jsou nosné úchyty, které slouží jako nosný prvek pro přepravu součástí. Pro tyto účely jsou využívány válcovité součásti zakončené zvlněným kruhovým profilem opatřeným výstupky pro co největší soudržnost se směsí (obrázek 50). Jako druhá varianta prvků určených k přepravě součástí jsou zalité ocelové tyče nebo trubky, jimiž je možné protažení přepravních tyčí. Pro všechny zalévané prvky platí, že nesmí být příliš blízko k okraji součásti [23].



Obr. 50) Přepravní kotva společnosti Friedrich Schroeder [47]

5 SYSTÉMOVÝ ROZBOR VYUŽITÍ NETRADIČNÍCH MATERIÁLŮ

Systémový rozbor využití netradičních materiálů v konstrukci obráběcích strojů je rozdělen do následujících celků:

- systémová analýza podstatných veličin ovlivňující nosnou soustavu stroje;
- systémový výběr vhodného materiálu na základě systému podstatných veličin;
- analýza současného konstrukčního řešení;
- návrh variant konstrukce.

5.1 Problémová situace

Nosné soustavy tvoří základ stroje a podílí se tedy značnou měrou na výsledné pracovní přesnosti stroje. Na výrobce obráběcích strojů jsou ze strany zákazníků kladeny zvyšující se požadavky na pracovní přesnost strojů za současného klesání nebo nezvyšování nákladů na pořízení stroje. Motivací výrobce je tedy být co nejvíce konkurenceschopný a splňovat tyto požadavky. Podstatným nástrojem pro jejich splnění je výběr vhodných materiálů konstrukce – zejména netradičních.

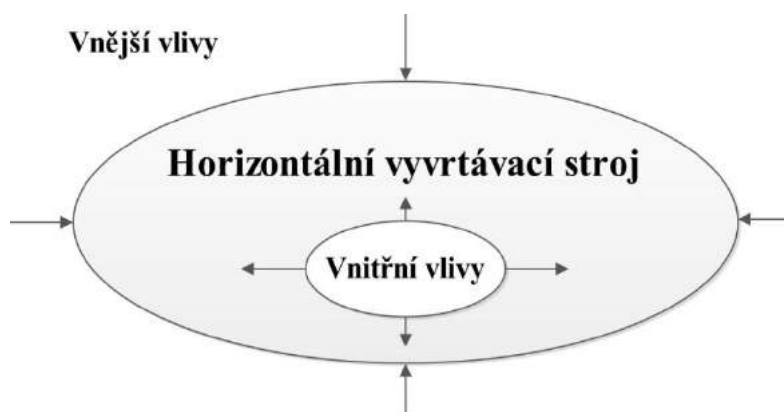
5.2 Formulace problému

Jak vhodně zvolit materiál konstrukce tak, aby odpovídala požadavkům výrobce a zákazníka – co nejvyšší pracovní přesnost při co nejnižších nákladech.

5.3 Systém podstatných veličin

Při řešení problémové situace musí subjekt vždy řešit problém a s ním i to, co je a co není pro jeho vyřešení důležité. Tento proces je zvaný jako „Vytváření systému veličin“ a vede ke stanovení vztahů mezi subjektem a zkoumaným objektem. Subjektem je v tomto případě vnímán výrobce (potažmo zákazník) a zkoumaným objektem horizontální vyvrtávací stroj [48].

Vlivy působící na stroj a jeho nosnou soustavu lze rozdělit do dvou skupin – vnitřní a vnější (obrázek 51).



Obr. 51) Znázornění zkoumaného systému

5.3.1 Vnější vlivy

Vnějšími vlivy chápeme působení vnějšího okolí na konstrukci stroje. Tyto vlivy lze rozdělit dvěma základními hledisky:

- hledisko teploty;
- hledisko vibrací.

Vnější teplotní vlivy jsou blíže specifikovány na obrázku 19 v kapitole 4.1.3. Patří mezi ně hlavně pohyb vzduchu v hale, sluneční a tepelné záření (například od topných těles, ostatních strojů apod.) a samotné teploty vzduchu.

Vibrace zatěžující nosnou soustavu mohou mít zdroj v okolních strojích, přídavných zařízeních stroje umístěných v blízkosti stroje, činnosti lidí v okolí stroje (otevírání vrat, chůze apod.) nebo v podloží (zdroje hluku a vibrací v okolí haly - například železnice, silnice, ostatní haly apod.). Blíže o dynamické stabilitě pojednává kapitola 4.1.2.

Mezi podstatné veličiny, kterými je možné charakterizovat tyto vlivy, jsou:

- dekrement útlumu (čím větší, tím lepší);
- koeficient teplotní roztažnosti (čím menší, tím lepší) a vodivosti (čím menší, tím lepší);
- měrná tepelná kapacita (čím menší, tím lepší).

5.3.2 Vnitřní vlivy

Vnitřní vlivy, které mají dopad na výběr materiálu stroje, lze rozdělit několika hledisky:

- hledisko výroby;
- hledisko mechanické stavby.

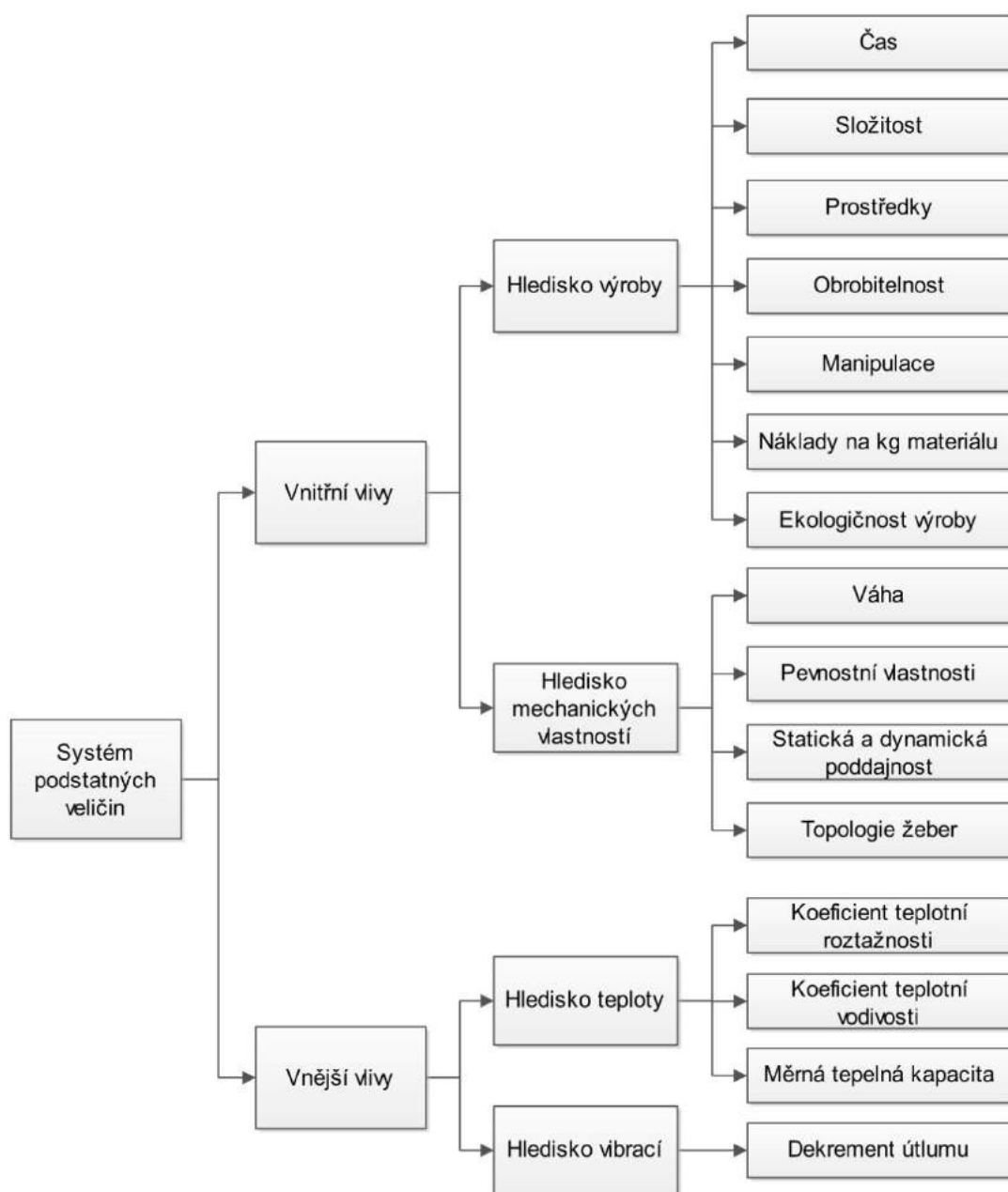
Podstatné veličiny z výrobního hlediska se identifikují následovně:

- čas – doba, za niž je možno součást dodat/vyrobít (čím menší, tím lepší);
- složitost – jak složitě je součást navrhnout a vyrobit (čím menší, tím lepší);
- prostředky – co vše k výrobě potřebuji (čím méně, tím lépe);
- obrobitelnost – jak snadno je materiál obrobitelný (čím více, tím lépe);
- manipulace – jak náročné je součást přemístit (čím méně, tím lépe);
- náklady na kg materiálu – jak drahé je pořízení materiálu (čím méně, tím lépe);
- ekologičnost výroby – spotřebované energie, vypuštěné nečistoty, převrácená hodnota recyklovatelnosti (čím méně, tím lépe).

Podstatné veličiny z hlediska mechanické stavby lze identifikovat následovně:

- statická a dynamická poddajnost - tuhost, odolnost proti kmitání – zejména samobuzenému (čím více, tím lépe);
- hmotnost – kolik materiálu spotřebujeme (čím méně, tím lépe);
- pevnostní vlastnosti – modul pružnosti, mez pevnosti v tahu/tlaku/ohybu;
- topologie žebor – možnosti žebrování (čím více, tím lépe).

Přehled všech podstatných veličin je uveden na obrázku 52.



Obr. 52) Přehled podstatných veličin

5.4 Systém hodnocení podstatných veličin

Hodnocení bude provedeno na základě bodovací metody, přičemž jednotlivá hodnotící kritéria symbolizují podstatné veličiny (tabulka 11). Pro hodnocení je využita pětistupňová škála, přičemž symbol „++“ představuje maximální povahu kritéria a symbol „-“ minimální povahu kritéria. Porovnávají jsou vlastnosti z tabulek 8 a 9.

Tab 11) Kritéria podstatných veličin

Kritérium	Podstatná veličina	Kritérium	Podstatná veličina
1.	dekrement útlumu	9.	manipulace
2.	koeficient teplotní roztažnosti	10.	hmotnost
3.	koeficient teplotní vodivosti	11.	pevnostní vlastnosti
4.	měrná tepelná kapacita	12.	náklady na kg materiálu
5.	čas	13.	ekologičnost výroby
6.	složitost	14.	statická a dynamická poddajnost
7.	prostředky	15.	topologie žeber
8.	obrobitelnost	-	-

5.5 Systémový výběr vhodného materiálu

Výběr reprezentuje tabulka 12 na jejímž konci je provedena suma symbolů. Na základě sumy jsou na dalším řádku materiály seřazeny pořadím od nejvhodnějšího po nejméně vhodný materiál pro konstrukci nosné soustavy obráběcího stroje.

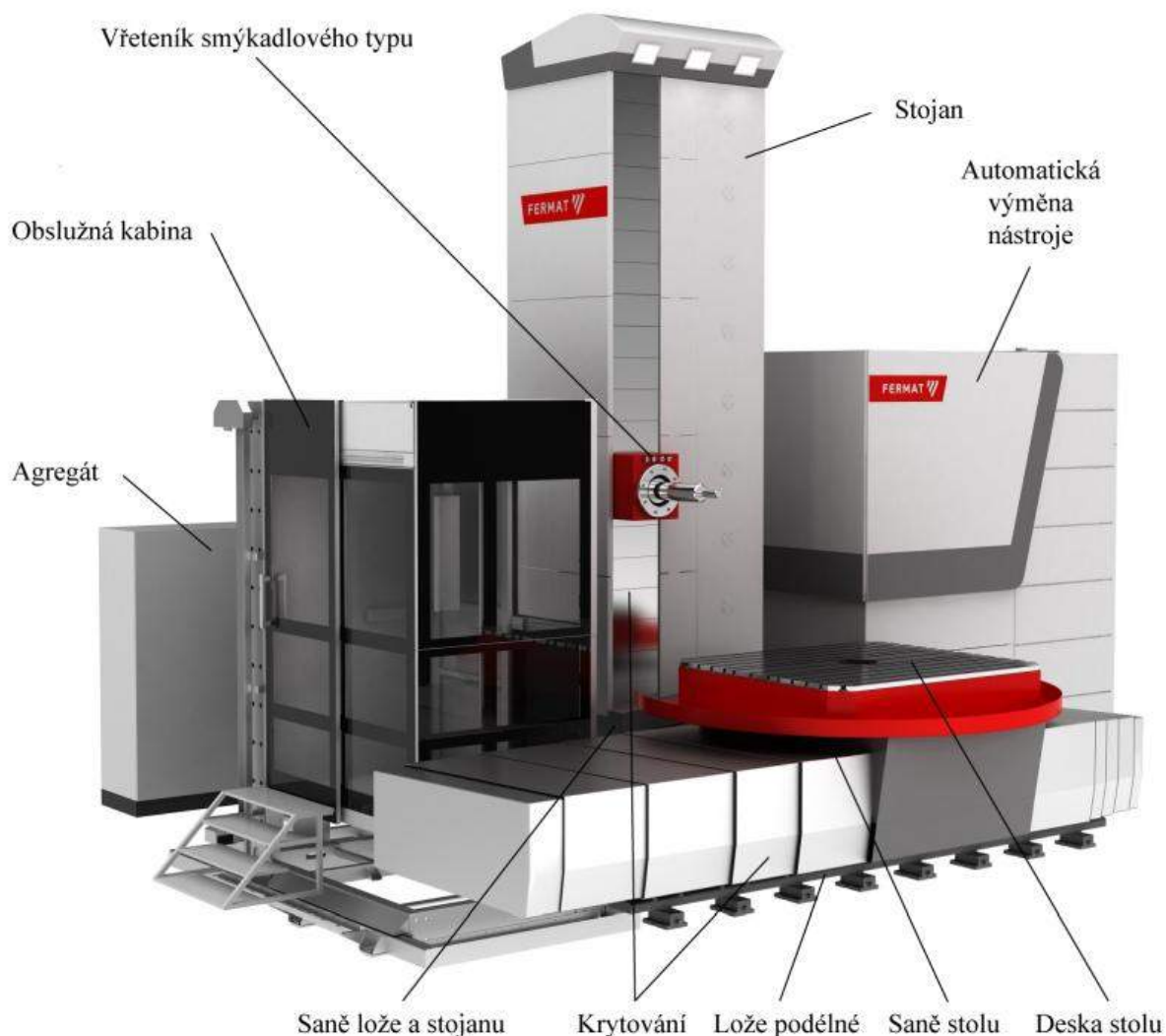
Tab 12) Výběrová tabulka vhodného materiálu

Kritérium	Povaha	ocel	šedá litina	tvárná litina	vláknové kompozity	kombinace materiálů	polymerb eton	HPC beton
1.	MAX	-	+	+	+	++	++	++
2.	MIN	0	0	0	++	0	-	0
3.	MIN	--	--	--	--	+	++	++
4.	MAX	-	-	-	+	+	+	+
5.	MIN	-	-	-	-	+	--	-
6.	MIN	0	0	-	--	+	-	-
7.	MIN	+	-	-	--	+	+	+
8.	MIN	-	+	+	0	+	+	+
9.	MIN	+	+	+	++	0	-	-
10.	MIN	+	0	0	++	0	0	0
11.	MAX	++	+	+	-	+	0	0
12.	MIN	0	0	0	--	+	+	+
13.	MAX	-	-	-	--	+	+	++
14.	MAX	0	0	0	0	++	++	++
15.	MAX	0	+	+	0	+	0	0
Suma		-2	-1	-2	-4	14	6	9
Pořadí		5.	4.	5.	6.	1.	3.	2.

Jako vhodný materiál pro konstrukci byla vybrána materiálová kombinace ocelového svařence nebo litinového odlitku s výplní betonovým materiálem. Z tabulky je patrné, že tato kombinace má výrazné výhody jak z hlediska výroby, tak z hlediska používání stroje. Výsledná struktura spojuje výhody obou druhů materiálů i přes komplikace, které toto spojení způsobuje.

5.6 Specifikace stroje

Objektem, kterým se zkoumání bude zabývat, je horizontální křížový vyvrtávací stroj WFT 13 CNC brněnské společnosti Fermat. Jedná se o středně velký stroj, který je základním pilířem nabídky Fermat, a proto kladen důraz na jeho dlouhodobou konkurenceschopnost. Obecná stavba stroje je popsána na obrázku 53.



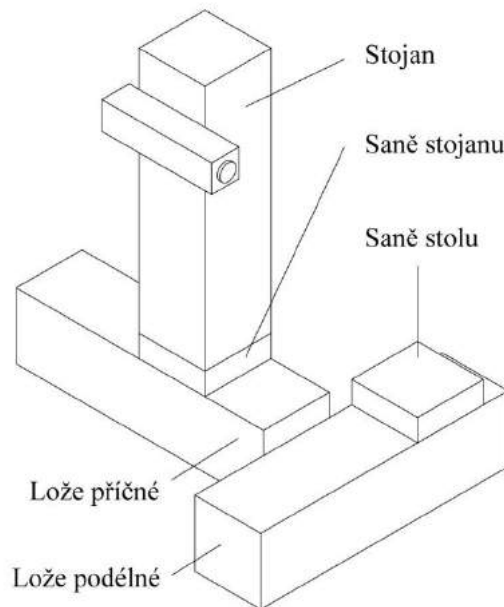
Obr. 53) Prvky stroje WFT 13 CNC [6]

Parametry stroje jsou uvedeny v tabulce 1. Stroj nabízí šest řízených os, z toho čtyři posuvové (X, Y, Z, W) a dvě rotační (B, C). Svou velikostí je určený k obrábění středně velkých obrobků (v řádech jednotek až desítek tun) pro energetický, dopravní, těžební nebo chemický průmysl.

5.7 Analýza současného konstrukčního řešení stroje WFT 13 CNC

Nosná struktura stroje WFT 13 CNC se skládá z následujících uzlů (schematicky obrázek 54):

- Podélné lože;
- Saně stolu (podélné);
- Příčné lože;
- Saně stojanu (příčné);
- Stojan.



Obr. 54) Hlavní uzly nosné struktury stroje WFT 13 CNC

Osu X reprezentují podélné lože a saně, na nichž je nasazená deska s obrobkem. Osa Z je tvořena příčně uloženým lože se saněmi. Na saních je připevněn stojan, který tvoří osu Y stroje. Osu W pak reprezentuje výsuvný vřeteník s vřetenem, který je uložen v saních pojíždějících po vodících lištách stojanu.

Příčné a podélné lože jsou dělená, nejsou spojena stykovou vazbou a jsou ustavovaná samostatně. Výhoda tohoto řešení spočívá v zamezení nutnosti docílit velké geometrické přesnosti stykových ploch (jejich zaškrabávání) a tím značně snížit náklady a nároky na montáž. Mezerou mezi loži je možné vést dopravník třísek.

Mezi ložem a saněmi na obou sestavách jsou vymezovány vůle pomocí úhlové plochy a klínů.

Rozvaděč (chlazení, hydraulická čerpadla, elektrika) je koncipován v samostatné jednotce mimo prostor stroje – ovlivňuje tedy stroj svými vibracemi a teplem méně než u strojů, u nichž je tato jednotka přímo na konstrukci.

U osy Y se nepoužívá závaží pro vyrovnání jednostranného zatížení způsobeného vřeteníkem. Toto řešení ušetřilo hmotnost v řádu tun, odlehčilo pohyblivé části, čímž se snížily energetické nároky na pohony. Nevýhodou je však fakt, že toto jednostranné zatížení klade vyšší nároky na tuhost součástí stroje.

Z parametrů stroje jsou důležitá zatížení, která vznikají při obrábění. Tyto hodnoty se při standardní práci nabývají hodnot v rozmezí 10 až 20 kN. Pevnostní charakteristiky nosné soustavy stroje budou detailněji zkoumány v kapitole 6. V závislosti na délce os a příslušenství stroje WFT 13 CNC se jejich hmotnost pohybuje mezi 35 až 45 tunami.

Všechny součásti nosné struktury stroje WFT 13 CNC jsou v současnosti vyráběny jako odlitek z šedé litiny s označením EN-GJL-300. Parametry materiálu dle ČSN 422430 jsou uvedeny v tabulce 13.

Tab 13) Vlastnosti litiny s lupínkovým grafitem EN-GJL-300 – ČSN 42 2430 [49]

Parametry	Měrná hmotnost (kg·m ³)	Modul pružnosti (GPa)	Mez pevnosti v tahu (MPa)	Mez pevnosti v tlaku (MPa)	Mez pevnosti v ohybu (MPa)	Poissonovo číslo (-)
Hodnoty	7350	144,4	300	-	490	0,26

Pro potřeby této práce byly jednotlivé díly modelovány na základě výkresové dokumentace v programu Autodesk Inventor 2018. Odhad nákladů v následujících podkapitolách je stanoven na základě průměrné ceny kg šedé litiny z tabulky 8. Hmotnosti součástí z kapitol 5.7.1 až 5.7.5 mají průměrnou odchylku 1,71% od hmotnosti reálných součástí.

5.7.1 Podélné lože

Celé lože tvoří jeden kompaktní odlitek z šedé litiny specifikované v kapitole 5.7 s příměsí chromu a mědi. Tyto příměsi umožňují tvorbu struktury s jemným grafitem a výsledný výrobek tak získává vyšší mechanické vlastnosti a tvrdost [34].

Vnitřní prostor lože je bohatě žebrovaný s cílem dosáhnout vysoké tuhosti. Žebra jsou odlehčena otvory, kterými je možné vést elektrickou kabeláž a hydraulické vedení (obrázky 55 a 56).

Na horní straně lože se nachází dvě vodící lišty, po nichž kluzně jezdí saně stolu. Tyto lišty jsou kaleny a jsou v nich vedeny drážky. Vodící lišty jsou po jedné straně zkoseny tak, aby bylo možné mezi ložem a saněmi vymezit vůle.

Mezi lištami je uprostřed lože vedena půlkruhová dráha, která tvoří prostor pro tělo kuličkového šroubu a matice. Kuličkové šrouby využití ve stavbě stroje WFT 13 CNC jsou vnitřně chlazené. To má pozitivní vliv na nosnou soustavu, kterou šrouby neovlivňují přílišným tepelným namáháním. Podél půlkruhové dráhy vede lišta pro přišroubování odměřovacího pravítka.

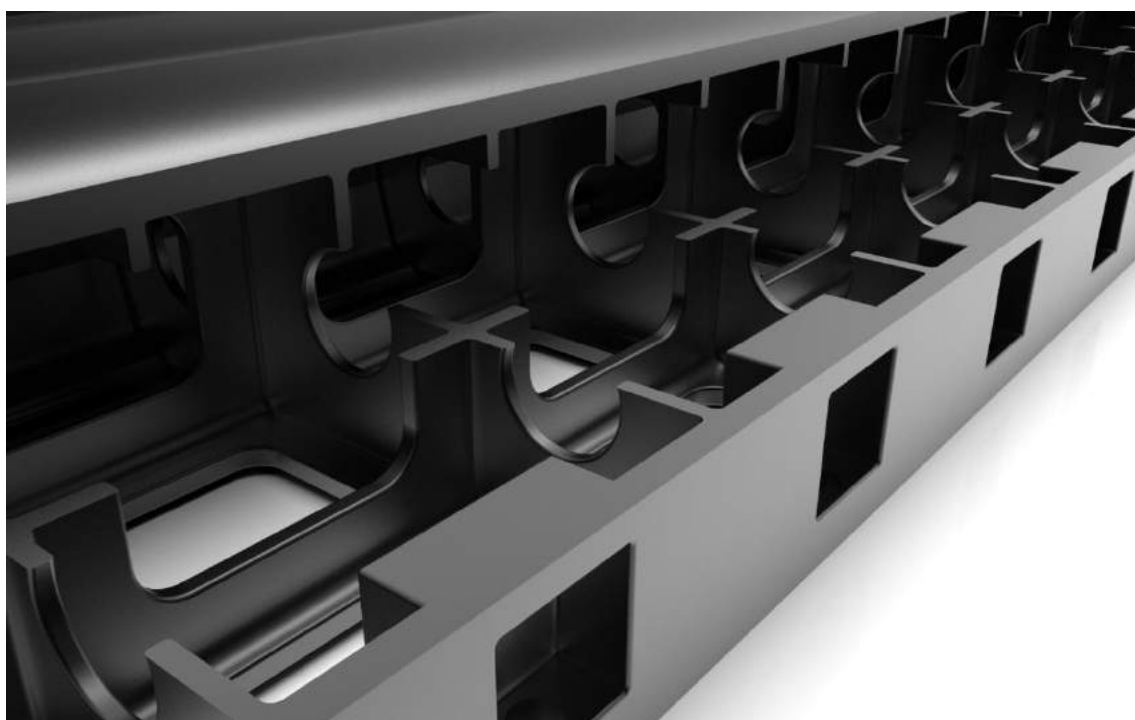
Do bočních stran součástí jsou vyvrtány díry, které slouží pro nasunutí transportních trubek, za které je součást upnuta na jeřáb. Na jedné boční straně jsou příruby řešeny vnitřním způsobem, kde je osa díry kotvícího šroubu shodná s osou stěny. Na opačné straně jsou pak příruby tvořeny vnějšími žebry. Lože je uloženo po obou stranách stavitelnými podložkami na základ výrobní haly. Parametry podélného lože jsou uvedeny v tabulce 14.

Tab 14) Parametry podélného lože

Parametr	Délka (mm)	Šířka (mm)	Výška (mm)	Hmotnost (kg)	Tloušťka stěn (mm)	Odhad nákladů na výrobu (€)
Hodnota	5540	1200	650	8883	20 až 35	4442 až 13325



Obr. 55) Model podélného lože stolu stroje WFT 13 CNC



Obr. 56) Pohled na vnitřní žebrování podélného lože stroje WFT 13 CNC

5.7.2 Saně stolu

Saně stolu (podélné) slouží jako spojovací prvek mezi ložem a kuličkovým šroubem na jedné straně a deskou stolu a obrobkem na straně druhé. Jejich struktura je tvořena odlitkem šedé litiny EN-GJL-300.

Deska a saně stolu spojuje velkého křížové ložisko, které dokáže přenášet jak axiální, tak radiální zatížení. Držáky na boční straně slouží pro připojení dvou servomotorů s pastorky, které pracují v režimu master-slave. Tyto motory nahání ozubený věnec, který je přimontovaný k desce stolu.

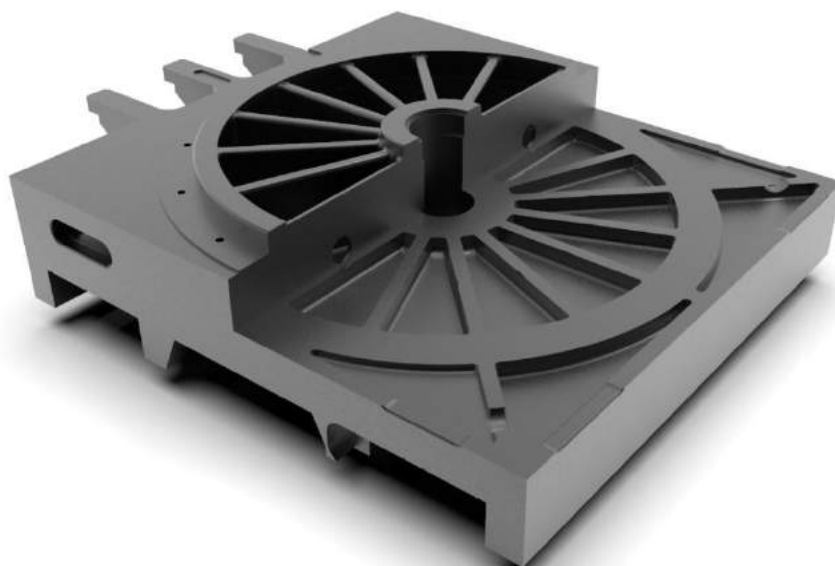
Prostřední průchozí dírou je veden absolutní enkodér pro odměřování aktuální polohy stolu. Jakmile stůl dosáhne požadované polohy, je hydraulickými brzdami zaaretován.

Na spodní straně saní se nachází držák matice kuličkového šroubu a stykové plochy s drážkami sloužící pro umístění na lišty vedení lože.

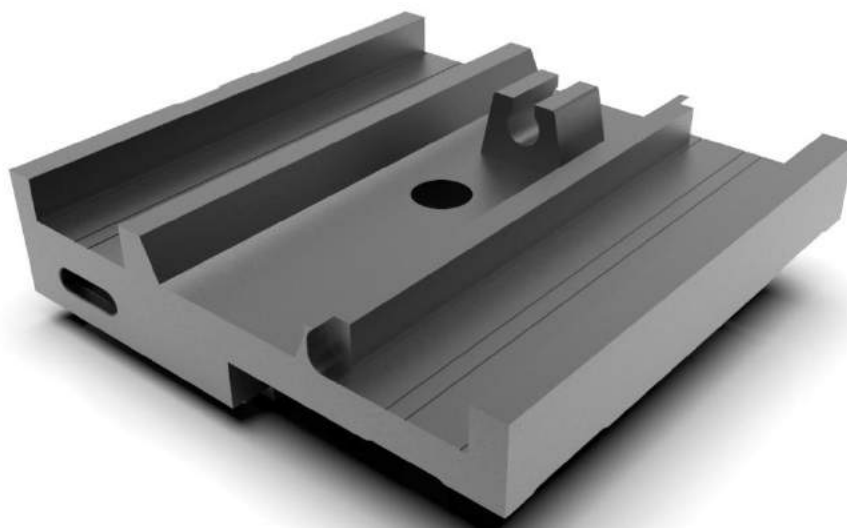
Vnitřní prostor saní tvoří výrazně žebrovaná kruhová část uprostřed a trojúhelníkové komory ve všech rozích saní. Tyto prostory mají odlehčovací funkci, přičemž obsahují žebra o tloušťkách 30 až 35 mm. Přeprava saní je realizována pomocí transportních ok za boky saní. K tělu saní je také pomocí šroubových spojů ukotveno krytování lože a žlábek, zachycující třísky, umístěný pod deskou stolu. Celkový pohled na horní a spodní stranu saní je vyobrazen na obrázku 57 a 58. Parametry saní stolu jsou pak uvedeny v tabulce 15.

Tab 15) Parametry saní stolu (podélných)

Parametr	Délka (mm)	Šířka (mm)	Výška (mm)	Hmotnost (kg)	Tloušťka stěn (mm)	Odhad nákladů na výrobu (€)
Hodnota	1575	1300	387	2240	30 až 35	1120 až 3360



Obr. 57) Model saní stolu stroje WFT 13 CNC – horní strana



Obr. 58) Model saní stolu stroje WFT 13 CNC – spodní strana

5.7.3 Příčné lože

Příčné lože je stejně jako lože podélné, vyrobeno z šedé litiny s příměsí chromu a mědi. Strukturu příčného lože tvoří symetrická konstrukce s vnitřním žebrováním (obrázek 59 a 60). Přírubové spoje, pomocí nichž je lože spojeno se stavitelnými podložkami a podlahou haly, tvoří na obou stranách žebra. Vnitřní prostor lože je opět silně žebrován pro odlehčení celé součásti a zároveň zachování vysoké tuhosti. V žebrech jsou kruhové a obdélníkové otvory sloužící pro vedení elektroinstalace a hydraulických prvků.

Vedení lože tvoří dvě kalené kluzné lišty, po nichž jezdí saně stojanu. Drážkami v lištách proudí mazivo, tak aby nedošlo k zadření. Uprostřed lože vede po celé délce půlkruhová dráha pro kuličkový šroub a matici. Na obou koncích lože jsou pro uložení šroubu připravené výstupky s opracovanými stykovými plochami. Půlkruhovou dráhu lemuje broušená lišta sloužící k připojení odměřovacího pravítka.

Pro přepravu slouží přepravní díry v bocích lože, jimiž jsou protaženy trubky, za něž je lože upnuto k jeřábu. Rozměry a další informace o příčném loži jsou uvedeny v tabulce 16.

Tab 16) Parametry příčného lože

Parametr	Délka (mm)	Šířka (mm)	Výška (mm)	Hmotnost (kg)	Tloušťka stěn (mm)	Odhad nákladů na výrobu (€)
Hodnota	3310	1200	565	5613	20 až 40	2807 až 8420



Obr. 59) Model příčného lože stojanu stroje WFT 13 CNC



Obr. 60) Pohled na vnitřní žebrování příčného lože stroje WFT 13 CNC

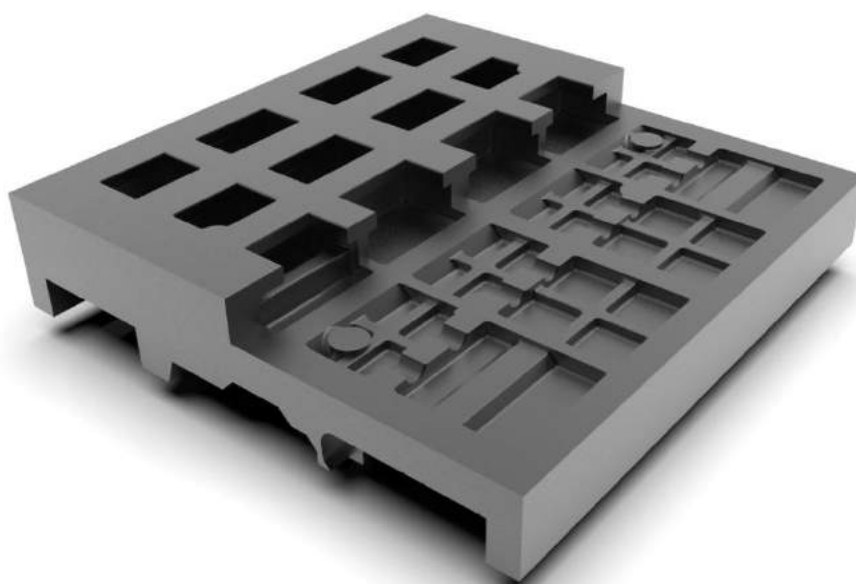
5.7.4 Saně stojanu

Saně stojanu (příčné) mají podobnou strukturu jako saně stolu, s tím rozdílem, že na horní straně není připojené ložisko a deska, ale další součást rámové konstrukce – stojan. Struktura je vyrobena z šedé litiny EN-GJL-300. Vnitřní prostor saní je žebrován komorami obdélníkového tvaru, přičemž tloušťka žeber, která tyto komory tvoří, se pohybuje od 30 do 50 mm (obrázek 61 a 62). Skrze tyto komory jsou vedeny šroubové spoje, kterými je k saním přimontován stojan. Spodní stranu saní tvoří stykové plochy a držák kuličkového šroubu. Stykové plochy se kluzně pohybují po vodících lištách příčného lože.

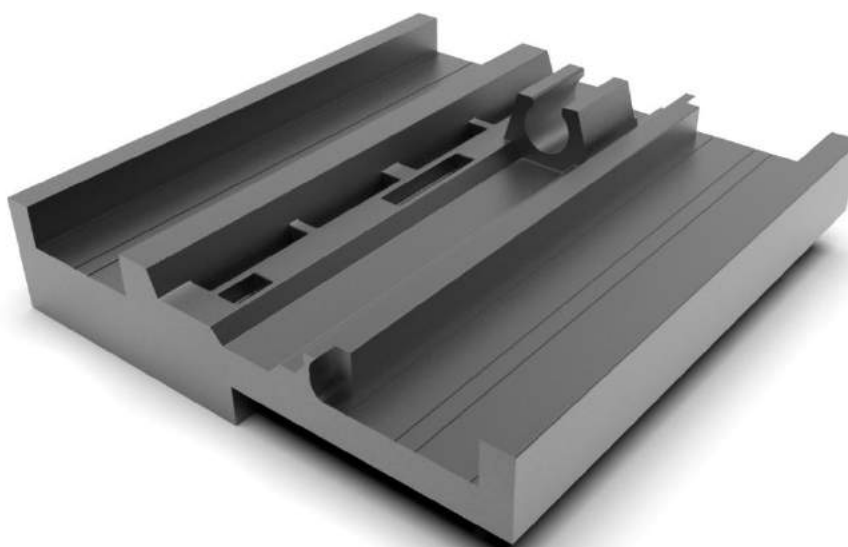
K vystupujícímu držáku je přichycena matice kuličkového šroubu a společně jsou tyto součásti vedeny půlkruhovou dráhou v příčném loži. K tělu saní je připevněno pomocí šroubů krytování příčného lože. Celé saně jsou přepravovány pomocí transportních ok, které jsou přišroubovány na bocích saní. Parametry saní jsou uvedeny v tabulce 17.

Tab 17) Vlastnosti saní stojanu (příčných)

Parametr	Délka (mm)	Šířka (mm)	Výška (mm)	Hmotnost (kg)	Tloušťka stěn (mm)	Odhad nákladů na výrobu (€)
Hodnota	1400	1350	291	2306	30 až 55	1153 až 3459



Obr. 61) Model saní stojanu stroje WFT 13 CNC – horní pohled



Obr. 62) Model saní stojanu stroje WFT 13 CNC – spodní pohled

5.7.5 Stojan

Odlitek stojanu ze šedé litiny EN-GJL-300 s přídavkem chromu a mědi se pohybuje ve směru osy Z společně se saněmi po příčném loži. Jeho strukturu tvoří uzavřený obdélníkový tvar s hustým vnitřním žebrováním, přičemž žebra mají tloušťku pouze 20 mm (obrázek 63).

Po celé výšce stojanu vedou vodící lišty, na nichž se pohybují saně s výsuvným vřeteníkem. Tyto saně pohání kuličkový šroub vedený půlkruhovým vybráním uprostřed stojanu. Z bezpečnostních důvodů musí být na konci šroubu umístěna brzda proti samovolnému spadnutí saní s vřeteníkem.

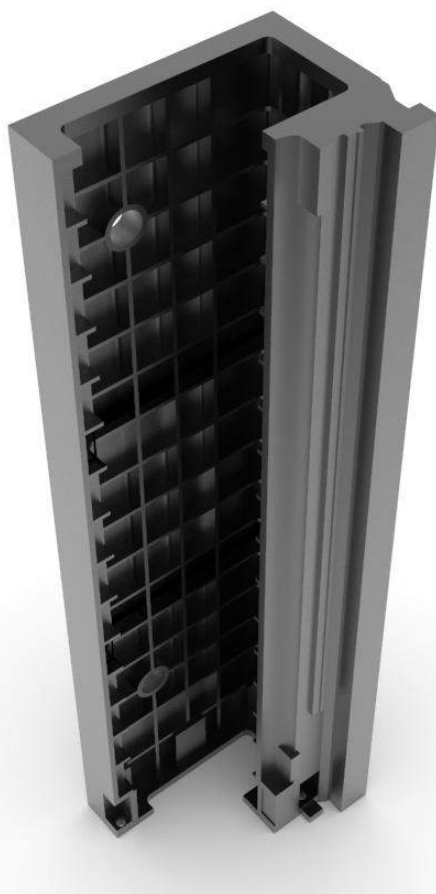
Na opačné straně stojanu může být přimontován systém automatické výměny nástroje. Tento systém však může nahradit externí zásobník s manipulačním robotem.

Připojení stojanu k saním realizují příruby, u nichž je osa šroubu shodná s osou stěny stojanu. Toto spojení je výhodné z hlediska nevznikajících ohybových momentů ve spoji.

Transport stojanu se realizuje za pomoci trubek provlečených otvory v bocích stojanu. Parametry stojanu jsou uvedeny v tabulce 18.

Tab 18) Vlastnosti stojanu

Parametr	Délka (mm)	Šířka (mm)	Výška (mm)	Hmotnost (kg)	Tloušťka stěn (mm)	Odhad nákladů na výrobu (€)
Hodnota	900	1200	4300	8179	20 až 70	4090 až 12269



Obr. 63) Model stojanu stroje WFT 13 CNC

6 KONCEPČNÍ VARIANTY NOVÉ KONSTRUKCE

Na základě kapitoly 5.5 jsou koncepční varianty navrhovány jako kombinace ocelového svařence/litinového odlitku a betonového materiálu.

6.1 Návrh koncepčních variant

Pro návrh koncepčních variant je zapotřebí dodržet vnější rozměry součástí a následně pro výpočtovou část i jejich zatěžování tak, aby bylo možné porovnávat jednotlivé koncepční varianty se současným řešením stroje. Proto je návrh soustředěn zejména na vnitřní žebrování a jeho modifikace. Při návrhu modelů koncepčních variant se vychází z modelů uvedených v kapitolách 5.7.1 až 5.7.5.

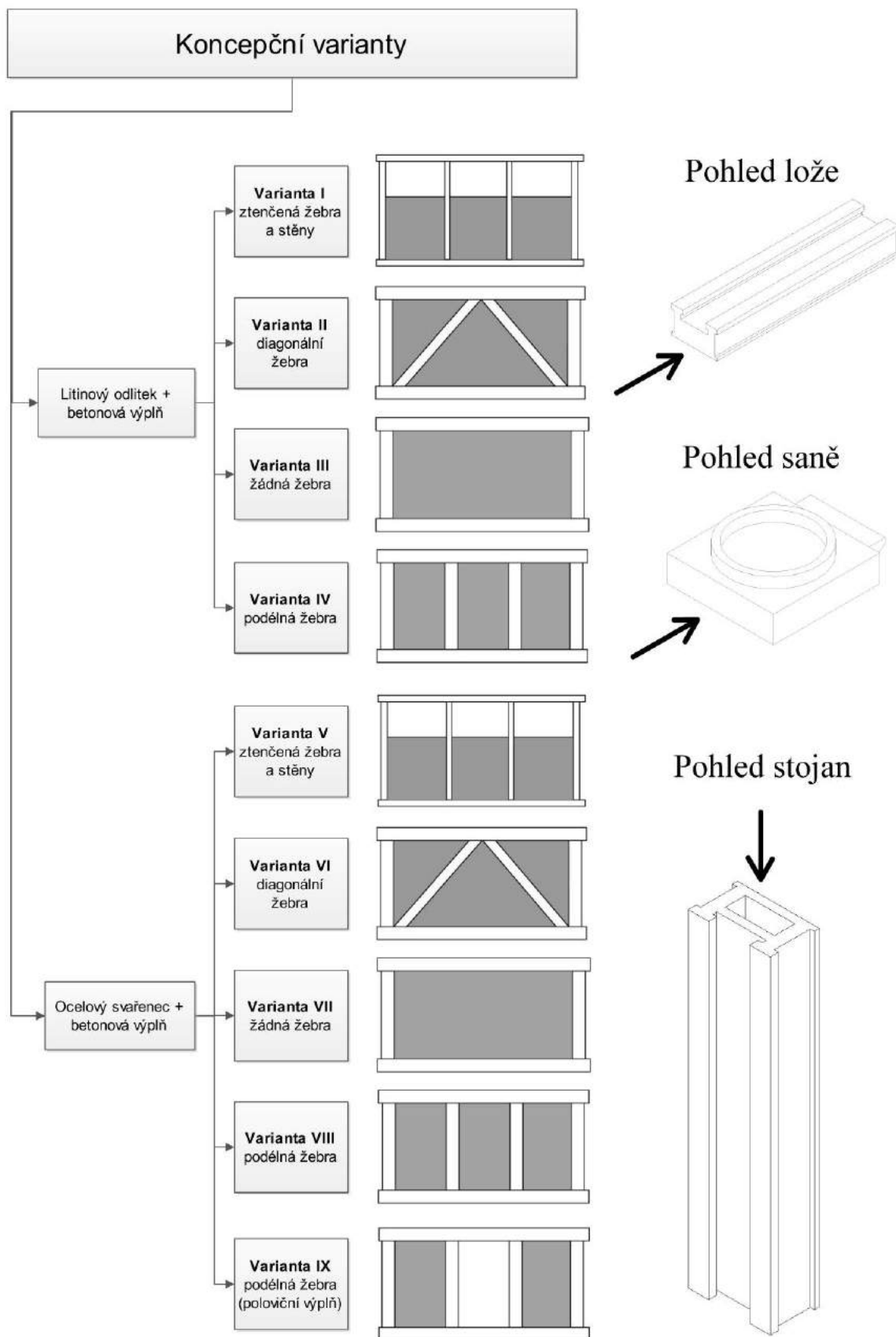
6.2 Struktura koncepčních variant

Na základě kapitoly 4.2.1. je zřejmé, že způsobů žebrování rámových součástí je celá řada. Každá varianta má své výhody a nevýhody. Pro potřeby této diplomové práce jsou vybrány pouze některé varianty, jejichž struktura je zobrazena na obrázku 64. Varianty jsou rozděleny do dvou skupin podle materiálu vnějšího pláště:

- Vnější plášť – litinový (varianty I až IV);
- Vnější plášť – ocelový (varianta V až IX).

Bílá barva znázorňuje ocel/litinu, šedá barva pak betonovou výplň. Každá tato skupina pak obsahuje jednotlivé varianty rozdělené dle způsobu vnitřního žebrování:

- Varianta I a V – současná konstrukce se ztenčenými žebry a stěnami;
- Varianta II a VI – konstrukce s diagonálními žebry;
- Varianta III a VII – konstrukce bez vnitřního žebrování;
- Varianta IV, VIII a IX – konstrukce s podélnými žebry.



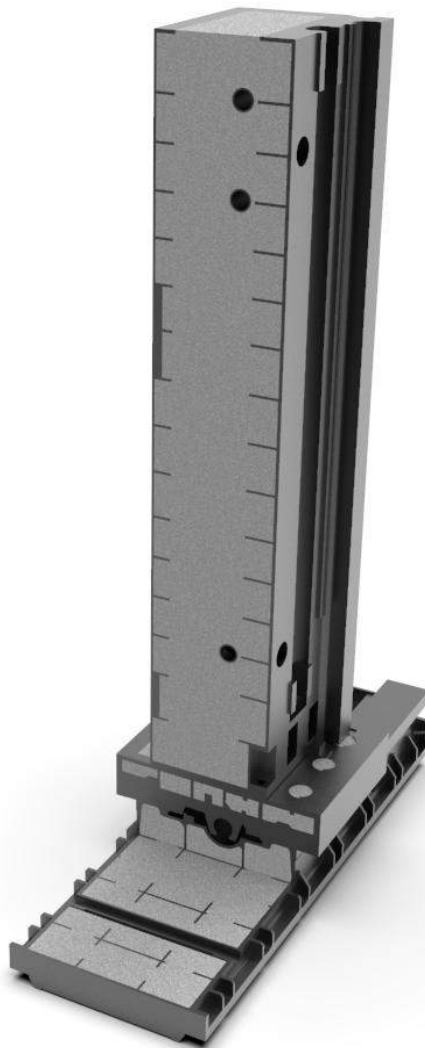
Obr. 64) Struktura koncepčních variant

6.2.1 Úpravy základních modelů na koncepční varianty

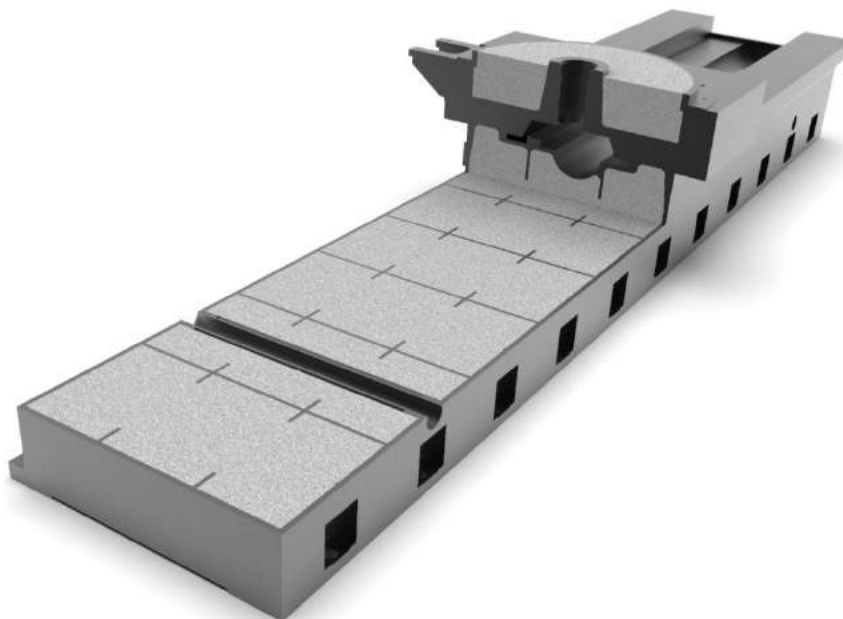
Koncepční varianty v největší možné míře zohledňují topologickou stavbu současného stroje za současného přihlídnutí k možnostem výroby tak, aby modely představovaly i reálně vyrobitelné součásti. U všech modelů je kladen důraz na zachování vnějších rozměrů pláště součástí, tedy délky, šířky a výšky. U variant I až IV jsou ponechány vnější pláště beze změny, u variant V až VIII jsou pláště přizpůsobeny možnostem výroby. Vnitřní struktury jsou změněny dle kapitoly 6.2. U variant I až IV jsou tloušťky stěn a vnitřních žebér ztenčeny v rozsahu od 40 do 60 %, u variant V až IX pak od 60 do 80 %. Duté vnitřní prostory všech variant vyplňuje betonový materiál. Vzhledem k vysokým hustotám ztenčovaných součástí a současně nízké hustotě betonového materiálu je možné tímto procesem docílit snížení hmotnosti součástí.

6.2.2 Koncepční varianta I

Varianta I obsahuje ztenčené stěny a žebra ve stejné prostorové konfiguraci, jako je tomu u současného řešení. Materiálem vnějšího pláště zůstává šedá litina specifikovaná v tabulce 13. Specifikace výplňového betonového materiálu je uvedena v tabulce 23. Hmotnost modelových sestav koncepční varianty č. I činí u podélné sestavy 14 627 kg (obrázek 66) a u příčné sestavy 22 772 kg (obrázek 65).



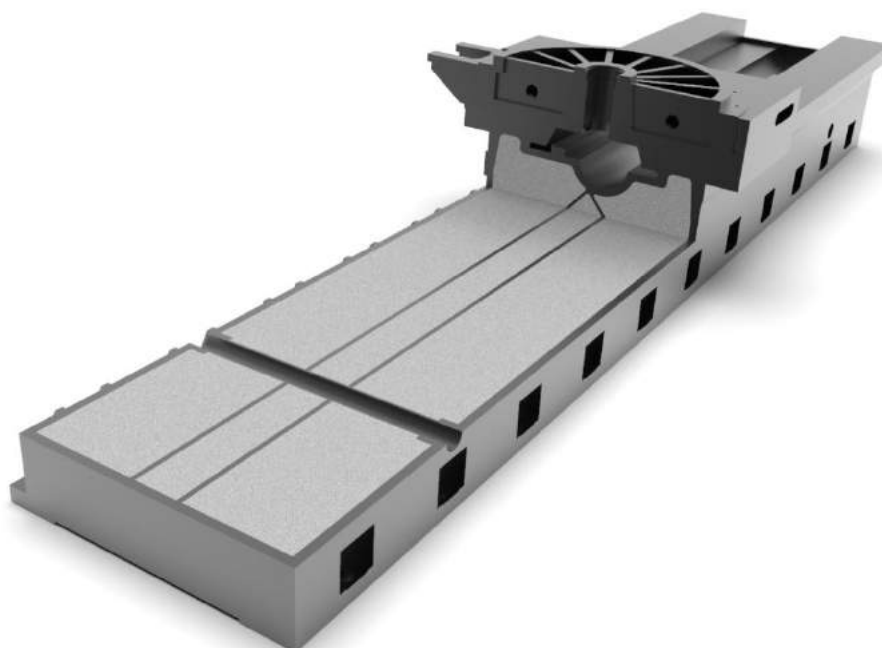
Obr. 65) Částečný řez modelem příčné sestavy - varianta I



Obr. 66) Částečný řez modelem podélné sestavy - varianta I

6.2.3 Koncepční varianta II

Modely varianty II se sestávají z diagonálních žebër ve tvaru obráceného V a stěn současného pláště. Stěny vnějšího pláště tedy nejsou nijak ztenčeny a diagonální žebra mají tloušťku 35 mm. U této varianty byly saně nahrazeny modelem současné výchozí konstrukce z důvodu obtížné nebo nemožné vyrobiteľnosti nových sendvičových dílů. Materiálem vnějšího pláště zůstává šedá litina specifikovaná v tabulce 13. Výplňový materiál tvoří betonový materiál specifikovaný v tabulce 23. Hmotnost modelových sestav koncepční varianty č. II činí u podélné sestavy 15 434 kg (obrázek 67) a u příčné sestavy 24 015 kg (obrázek 68).



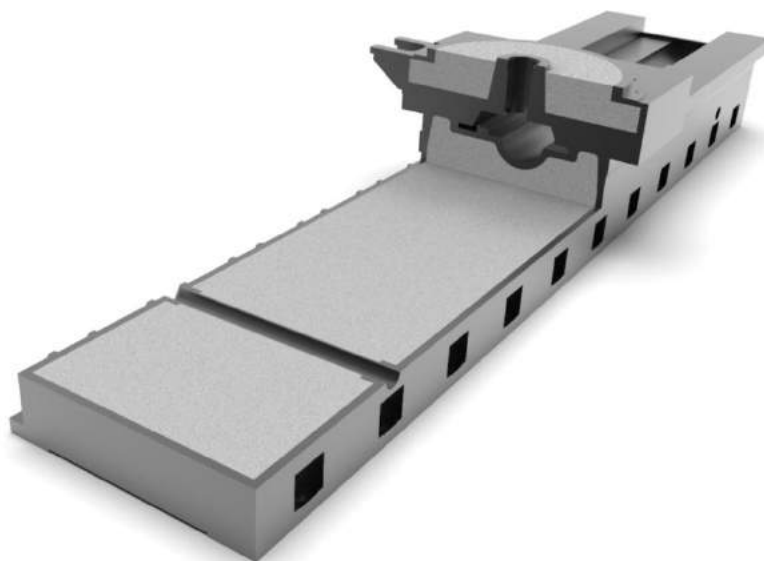
Obr. 67) Částečný řez modelem podélné sestavy – varianta II



Obr. 68) Částečný řez modelem příčné sestavy – varianta II

6.2.4 Konceptní varianta III

Varianta III obsahuje modely s vylévanými vnitřními prostory bez žebrování (bez kovového materiálu). Je zde pouze výplňový materiál v podobě betonu. Obvodový plášť tvoří šedá litina specifikovaná v tabulce 13. Výplňový materiál tvoří betonový materiál specifikovaný v tabulce 23. Hmotnost modelových sestav konceptní varianty č. III činí u podélné sestavy 15 060 kg (obrázek 69) a u příčné sestavy 23 186 kg (obrázek 70).



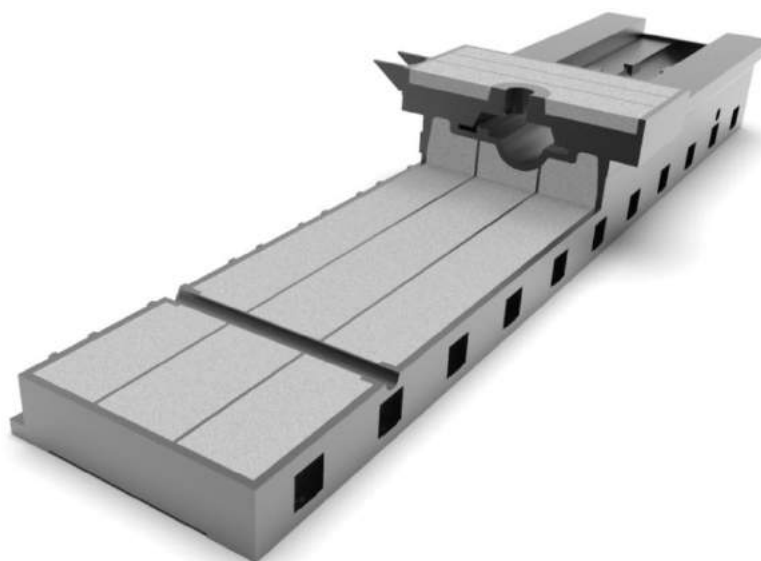
Obr. 69) Částečný řez modelem podélné sestavy – varianta III



Obr. 70) Částečný řez modelem příčné sestavy – varianta III

6.2.5 Konceptní varianta IV

Konceptní varianta IV je tvořena vnějším pláštěm s nezměněnou tloušťkou stěn a dvěma podélnými žebry skrze celé součásti. Žebra mají u všech součástí tloušťku 15 mm. Mezi žebry jsou vnitřní prostory vyplněny betonem specifikovaným v tabulce 23. Obvodový plášť tvoří šedá litina specifikovaná v tabulce 13. Hmotnost modelových sestav konceptní varianty č. IV činí u podélné sestavy 15 409 kg (obrázek 71) a u příčné sestavy 23 186 kg (obrázek 72).



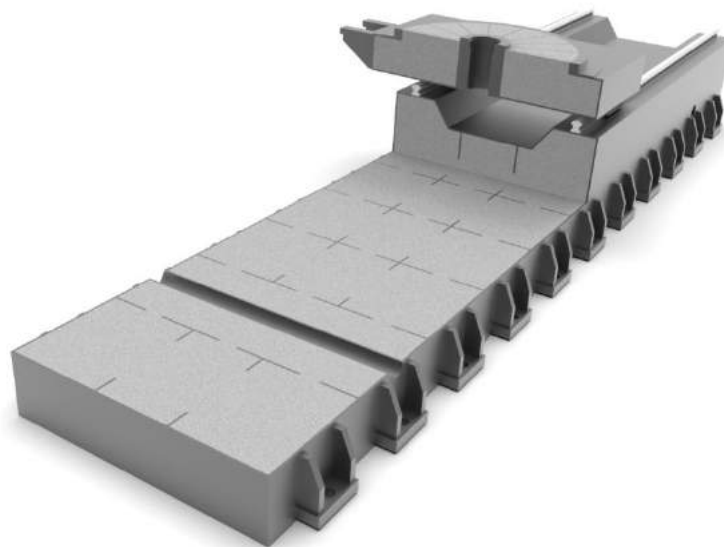
Obr. 71) Částečný řez modelem podélné sestavy – varianta IV



Obr. 72) Částečný řez modelem příčné sestavy – varianta IV

6.2.6 Koncepční varianta V

Varianta č. V je první z variant, u nichž je vnější plášť tvořen ocelovým svařencem. Tato varianta je vytvořena tak, aby brala v úvahu možnosti výrobní technologie, ale zároveň prostorově odpovídala současnému litinovému řešení. Plášť součástí je vyroben z oceli ČSN 11 523 specifikované v tabulce 24 a vnitřní prostory jsou vyplněny betonovým materiálem specifikovaným v tabulce 23. Hmotnost modelových sestav koncepční varianty č. V činí u podélné sestavy 12 223 kg (obrázek 73) a u příčné sestavy 18 458 kg (obrázek 74).



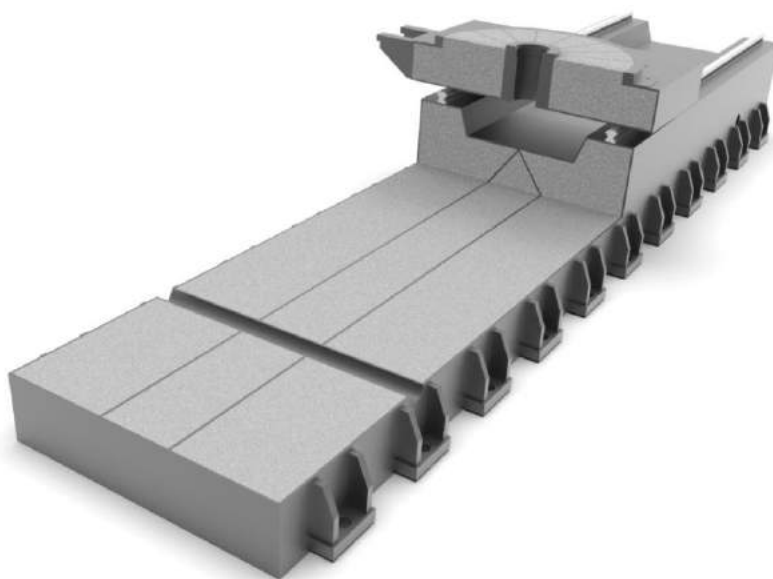
Obr. 73) Částečný řez modelem podélné sestavy – varianta V



Obr. 74) Částečný řez modelem příčné sestavy – varianta V

6.2.7 Koncepční varianta VI

Modely varianty č. VI. jsou žebrovány profilem obráceného V. Z důvodů náročné, případně nemožné výroby vychází příčné i podélné saně z varianty č. V. Prostory mezi žebry o tloušťce 10 mm jsou vyplněny betonem specifikovaným v tabulce 23. Ocelový materiál je specifikovaný v tabulce 24. Hmotnost modelových sestav koncepční varianty č. VI činí u podélné sestavy 12 041 kg (obrázek 75) a u příčné sestavy 18 027 kg (obrázek 76).



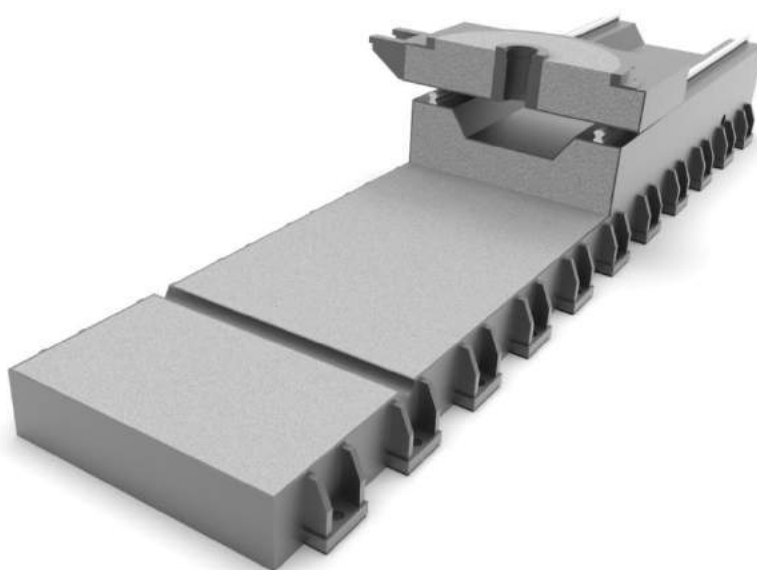
Obr. 75) Částečný řez modelem podélné sestavy – varianta VI



Obr. 76) Částečný řez modelem příčné sestavy – varianta VI

6.2.8 Konceptní varianta VII

Varianta č. VII je tvořena pouze vnějším pláštěm bez žebrování, který je vyplněný betonovým materiálem. Beton je specifikovaný v tabulce 23, ocel pláště pak v tabulce 24. Hmotnost modelových sestav konceptní varianty č. VII činí u podélné sestavy 11 634 kg (obrázek 77) a u příčné sestavy 17 390 kg (obrázek 78).



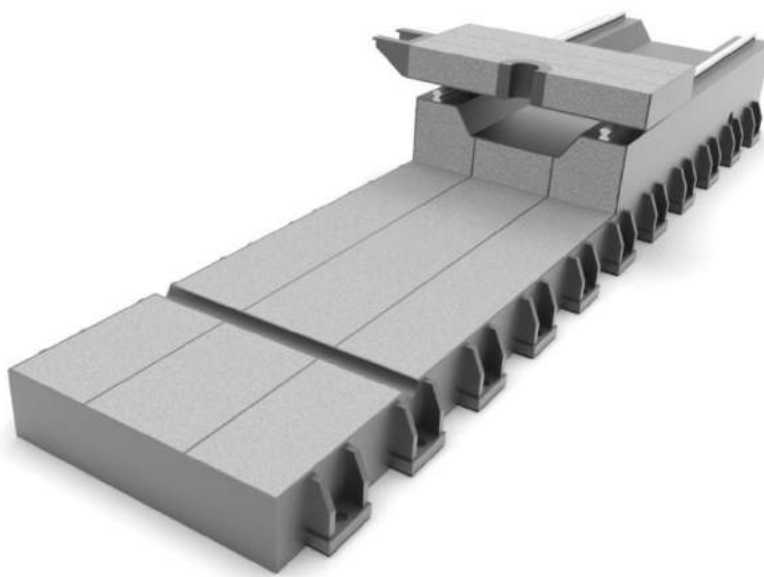
Obr. 77) Částečný řez modelem podélné sestavy – varianta VII



Obr. 78) Částečný řez modelem příčné sestavy – varianta VII

6.2.9 Koncepční varianta VIII

Dvě podélná žebra tvoří všechny součásti koncepční varianty č. VIII. Ostatní vnitřní prostory vyplňuje beton specifikovaný v tabulce 23. Ocelové pláště jsou tvořeny materiálem s označením 11 523 specifikovaným v tabulce 24. Hmotnost modelových sestav koncepční varianty č. VIII činí u podélné sestavy 12 016 kg (obrázek 79) a u příčné sestavy 18 129 kg (obrázek 80).



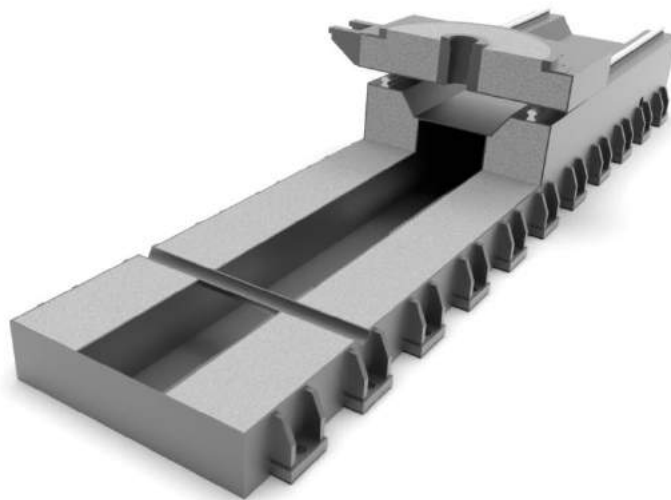
Obr. 79) Částečný řez modelem podélné sestavy – varianta VIII



Obr. 80) Částečný řez modelem příčné sestavy – varianta VIII

6.2.10 Koncepční varianta IX

Devátá koncepční varianta vychází svojí topologickou stavbou z varianty VIII, tedy součástí s podélnými žebry a vyplněnými prostory mezi nimi. Použité materiály jsou identické jako v předchozích variantách V až VIII. Vzhledem k hmotnostem a pevnostním vlastnostem předchozích variant jsou koncepty doplněny ještě variantou č. IX, kde prostřední část mezi podélnými žebry není betonovým materiálem vyplněna, ale vyplněny jsou pouze krajní prostory pod vedením (obrázek 81 a 82). Tímto způsobem je možné dosáhnout v součtu na všech součástech rámu značné úspory výplňového materiálu. Hmotnost sestav koncepční varianty č. IX činí u podélné sestavy 9 290 kg a u příčné sestavy 13 023 kg.



Obr. 81) Částečný řez modelem podélné sestavy – varianta IX



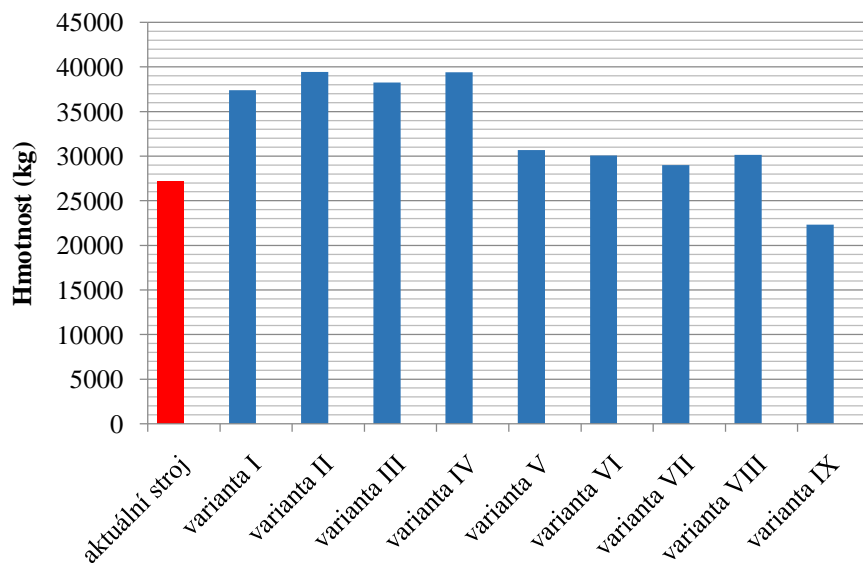
Obr. 82) Částečný řez modelem příčné sestavy – varianta IX

6.2.11 Porovnání hmotností a nákladů na kg materiálu celkových sestav koncepčních variant a současného stroje

U koncepčních variant nás zajímá řada parametrů. Jedním z důležitých, který lze získat modelováním variant, je hmotnost jednotlivých konstrukcí a následné porovnání nákladů vztažených na kg použitých materiálů potřebných k výrobě součástí. Hmotnostní parametr je změřen na modelech složených do kompletních sestav obsahujících jak podélnou (lože, saně), tak příčnou (lože, saně, stojan) sestavu. V tabulce 19 a grafu 83 je provedeno jejich porovnání včetně hmotnosti současného stroje.

Tab 19) Tabulka porovnání hmotností celkových sestav

Varianta	Hmotnost celkové sestavy (kg)
současná konstrukce	27221
vI	37399
vII	39449
vIII	38246
vIV	39413
vV	30669
vVI	30056
vVII	29011
vVIII	30132
vIX	22313



Obr. 83) Graf porovnání hmotností celkových sestav koncepčních variant

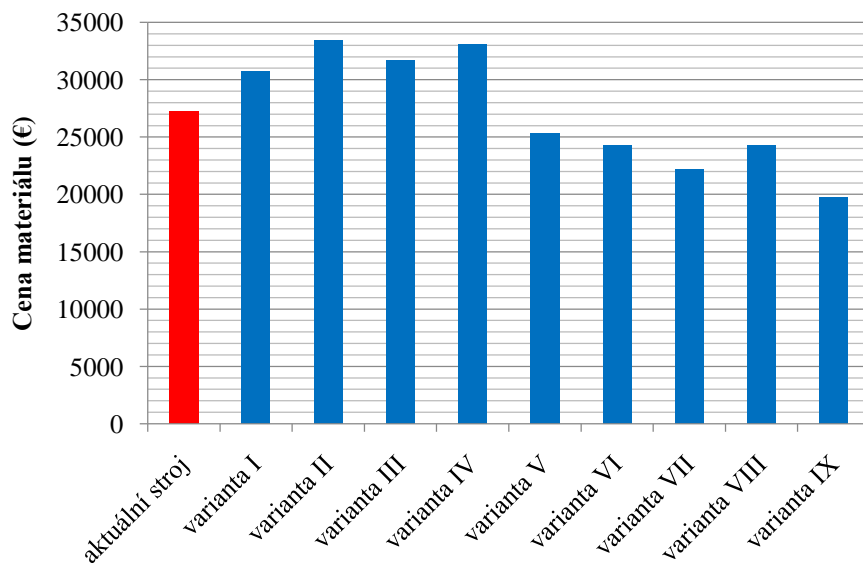
Z grafu je patrné, že litinové varianty I až IV, jsou podstatně těžší než varianty V až IX s ocelovým pláštěm. Strukturou ocel a beton také lze dosáhnout při vhodném způsobu vylití i nižší hmotnosti než u konceptů s plným vyléváním a současné litinové konstrukce.

Pro vyčíslení nákladů jsou použity ceny materiálů z tabulky 8, přičemž použité hodnoty jsou střední hodnotou údajů uvedených v tabulce. Pro ocel je stanovena odhadovaná cena za kg materiálu na 1,5 €, pro šedou litinu na 1 € a pro betonovou výplň 0,575 €. [55]

Pro větší přehlednost jsou odděleny hmotnosti a ceny různých materiálů použitých na konstrukci vnějších plášťů a výplně. Hmotnosti vždy zahrnují celkové sestavy, tedy všechny součásti z podélné (lože, saně) i příčné (lože, saně, stojan) sestavy. Náklady za celkové sestavy variant konstrukce jsou shrnuty v tabulce 20 a graficky zobrazeny v grafu 84.

Tab 20) Porovnání hmotností a nákladů

Varianta	Hmotnosti vnějších plášťů (kg)	Hmotnosti vnitřních výplní (kg)	Náklady na materiál vnějšího pláště (€)	Náklady na materiál vnitřní výplně (€)	Náklady na celkovou sestavu (€)
současná konstrukce	27221	-	27221	-	27221
vI	21603	15796	21603	9083	30686
vII	25378	14071	25378	8091	33469
vIII	22779	15467	22779	8894	31673
vIV	24468	14945	24468	8593	33061
vV	8300	22369	12450	12862	25312
vVI	7561	22495	11342	12935	24276
vVII	5967	23044	8951	13250	22201
vVIII	7511	22597	11267	12993	24260
vIX	7470	14843	11205	8535	19740



Obr. 84) Náklady na celkové sestavy ráků

Aby mohla být nová konstrukce uvažována pro zavedení do výroby, je potřeba, aby se nezvyšovala nákladová stránka její výroby a zejména pořízeného materiálu. Tato podmínka je předběžně splněna několika koncepčními variantami.

7 VÝPOČTOVÁ ČÁST

Výpočtová část bude rozdělena do dvou hlavních etap:

- Analýza současného řešení;
- Analýza koncepčních variant.

V obou etapách bude k analýzám vzhledem ke složitosti součástí využita metoda konečných prvků (FEM). Výpočty budou zpracovávány v programu ANSYS v prostředí Workbench (verze 17.1). Základním cílem je zjistit pomocí strukturální analýzy hodnoty maximální deformace a napětí soustavy. Jelikož cílem práce není zpracovat detailní výpočty, ale získat pouze hrubou představu pro porovnání koncepčních variant se současným řešením, budou výpočtové modely maximálně zjednodušeny. Cílem těchto analýz také není porovnávat různé druhy zatěžování, zejména působící na součásti při jejich transportu.

7.1 Analýza současného řešení

7.1.1 Model geometrie a materiálu

Jako výchozí geometrie pro výpočty je využito modelů z kap. 5.7.1 až 5.7.5. Tyto modely jsou vzhledem k jejich složitosti a s ohledem na výsledky s dostatečnou vypovídající hodnotou zjednodušeny zanedbáním následujících prvků (tabulka 21):

- zaoblení a zkosení/úkosy;
- závitové a jiné otvory (drobné montážní otvory);
- vymezení vůle mezi ložem a saněmi pomocí kolíků (styčná plocha je rovná);
- další drobné prvky (drážky apod.).

Tab 21) Porovnání hmotností modelů součástí před a po úpravách

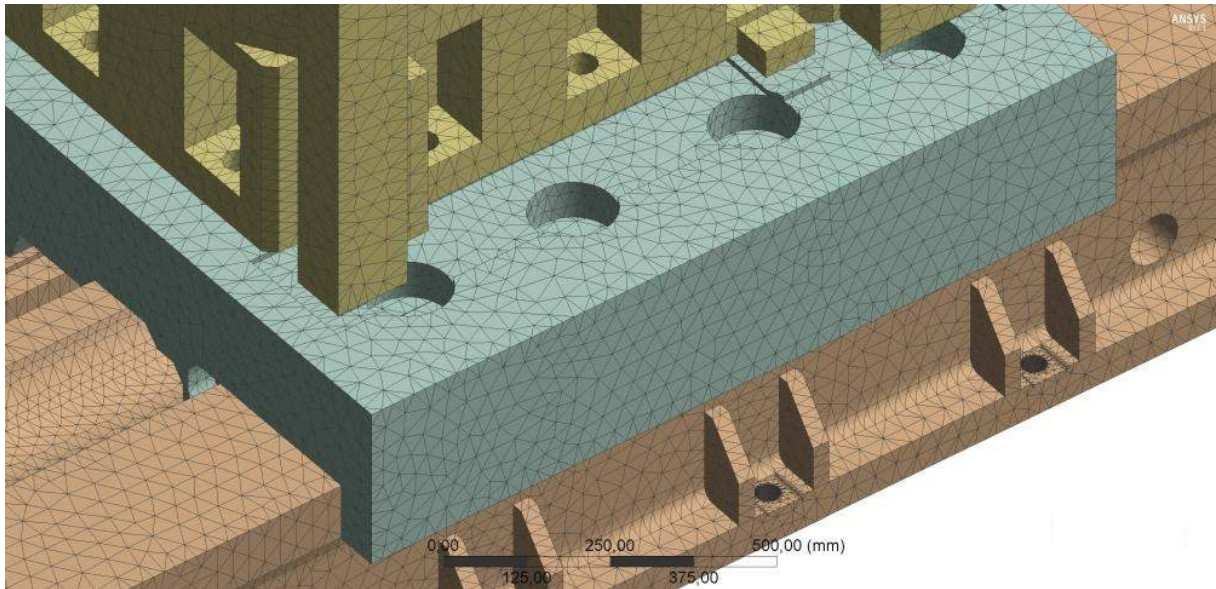
Součást	Hmotnost před úpravami (kg)	Hmotnost po úpravách (kg)
Lože podélné	8883	8879
Saně stolu (podélné)	2240	2238
Lože příčné	5613	5608
Saně stojanu (příčné)	2306	2300
Stojan	8179	8196

Vzhledem k částečné nesymetričnosti součástí nelze využít osy symetrie pro zjednodušení výpočtových modelů. Materiál je nastaven jako izotropní s elasticko-plastickým chováním – hodnoty Youngova modulu pružnosti E a Poissonova čísla μ jsou definovány v tabulce 13.

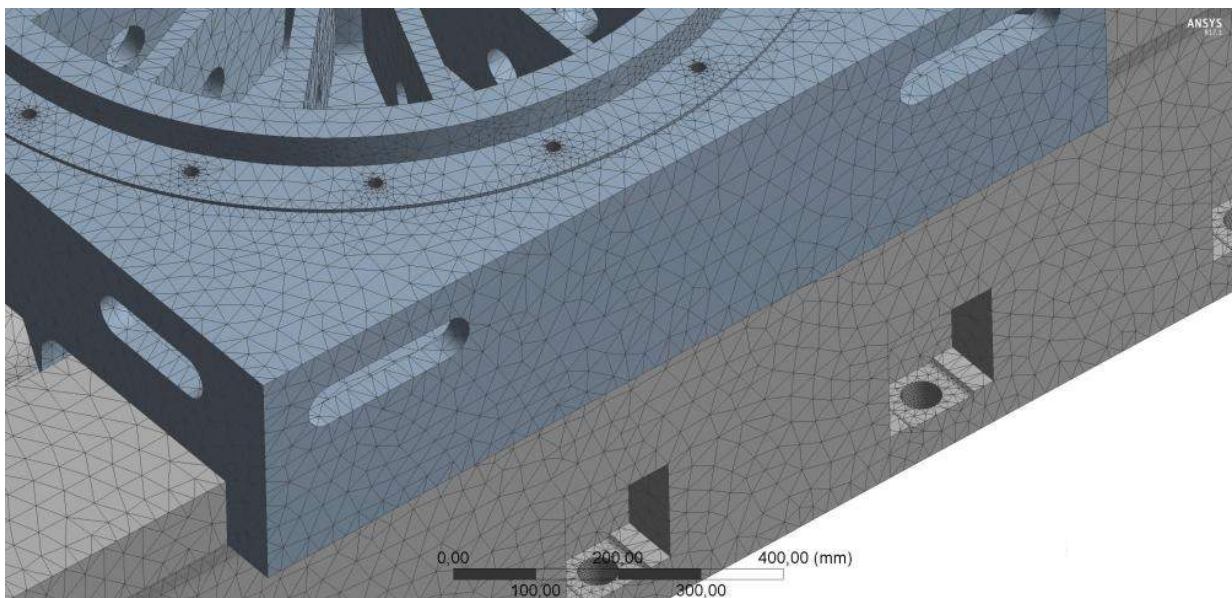
7.1.2 Model sítě prvků

Na tvorbě sítě prvků závisí kvalita a přesnost analýzy, zároveň je však třeba mít na paměti, že se vzrůstající jemností sítě rostou požadavky na výpočetní techniku a čas výpočtů. Výsledky také nemusí nutně vykazovat lepší vlastnosti.

Pro modely sítě součástí jsou vhodné objemové prvky – tetraedry a hexaedry. V prostředí ANSYS těmto prvkům odpovídá označení SOLID 186 a SOLID 187. Sít pro výpočty v této a následujících kapitolách je tvořena zejména prvky SOLID 187. Výhodou tohoto prvku je fakt, že má 10 uzlových bodů – rohové a uprostřed svých hran. Tyto body umožňují simulaci přesnějších výsledků i při hrubší síti. Sítě sestav tvoří prvky o velikosti 20 mm (obrázek 85 a 86) [50].



Obr. 85) Detail sítě prvků na příčné sestavě současného stroje



Obr. 86) Detail sítě prvků na podélné sestavě současného stroje

7.1.3 Okrajové podmínky

Okrajové podmínky zahrnují jak všechna zatížení působící na konstrukci, tak omezení posuvů a rotace – vazby.

Silová zatížení

Při práci stroje je rámová konstrukce zatěžována především následujícími druhy sil:

- zatěžující síly od obrábění;
- gravitační síly od hmotnosti součástí a obrobku.

Obrázek 87 zobrazuje rozložení sil od obráběcího procesu na jednotlivé složky. Složka F_z má hodnotu 20 kN, složka F_y 7 kN a složka F_x 2 kN. Tyto složky působí jak na podélnou sestavu, tak na příčnou sestavu. Hodnoty byly stanoveny na základě konzultace ve společnosti Fermat. Maximální rozměry obrobku činí 3000×2000×2500 mm [6].

Z tohoto rozměru jsou stanovena ramena, na nichž působí síly na podélné saně a lože a tedy výsledný moment zatěžující tuto sestavu:

$$M_{k_pod_X} = F_{C_X} \cdot r_{pod_X} = 2000 \cdot 2,5 \text{ (Nm)} = 5000 \text{ (Nm)} \quad (3)$$

$$M_{k_pod_Y} = F_{C_Y} \cdot r_{pod_Y} = 7000 \cdot 1,0 \text{ (Nm)} = 7000 \text{ (Nm)} \quad (4)$$

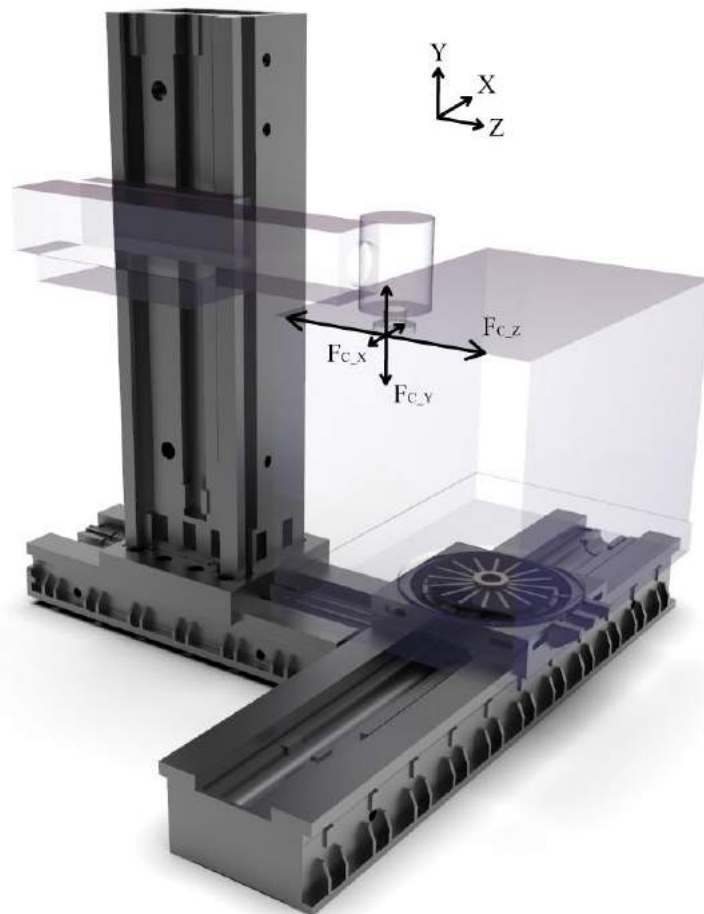
$$M_{k_pod_Z} = F_{C_Z} \cdot r_{pod_Z} = 20000 \cdot 1,5 \text{ (Nm)} = 30000 \text{ (Nm)} \quad (5)$$

Ramena pro výpočet zatěžujících momentů od obráběcích sil byla na příčné sestavě stanovena z charakteristických rozměrů sestavy vřeteníku a saní vřeteníku.

$$M_{k_pric_X} = F_{C_X} \cdot r_{pric_X} = 2000 \cdot 0,3 \text{ (Nm)} = 600 \text{ (Nm)} \quad (6)$$

$$M_{k_pric_Y} = F_{C_Y} \cdot r_{pric_Y} = 7000 \cdot 0,8 \text{ (Nm)} = 5600 \text{ (Nm)} \quad (7)$$

$$M_{k_pric_Z} = F_{C_Z} \cdot r_{pric_Z} = 20000 \cdot 0,2 \text{ (Nm)} = 4000 \text{ (Nm)} \quad (8)$$



Obr. 87) Síly od obrábění působící na soustavu

Gravitační síly vycházejí z hmotností jednotlivých součástí, které jsou specifikovány v kapitolách 5.7.1 až 5.7.5. Hmotnosti nespecifikovaných součástí jsou uvedeny v tabulce 22.

Tab 22) Hmotnosti nespecifikovaných součástí a obrobku

Prvek	Zkratka	Hmotnost (kg)
Saně vřeteníku	m_{sv}	3000
Vřeteník	m_v	2000
Deska stolu, ložisko, ozubený věnec	m_{dslov}	2500
Obrobek	m_{obr}	20000

Z významných zatížení od hmotnosti působí na příčnou sestavu pouze hmotnost vřeteníku a saně vřeteníku, na podélnou sestavu pak hmotnost obrobku, desky stolu, ložiska a ozubeného věnce:

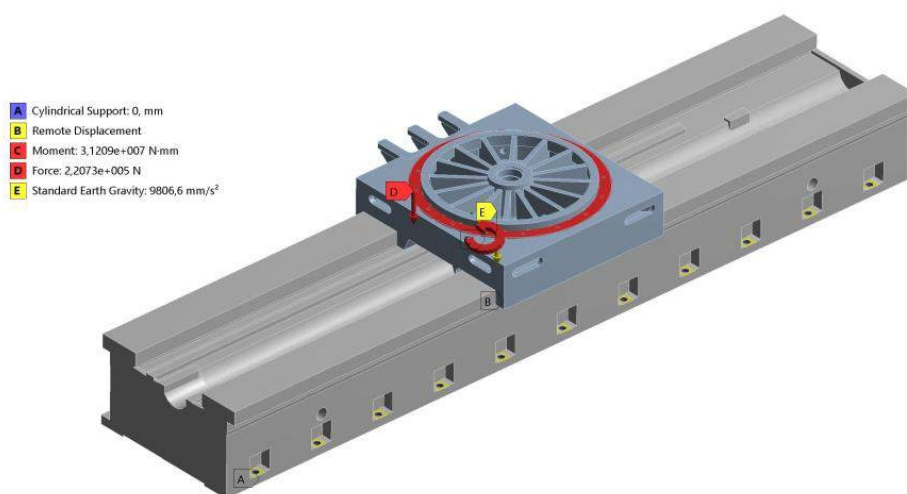
$$F_{g_pric} = (m_{sv} + m_v) \cdot g = 49050 \text{ (N)} \quad (9)$$

$$F_{g_pod} = (m_{obr} + m_{dslov}) \cdot g = 220725 \text{ (N)} \quad (10)$$

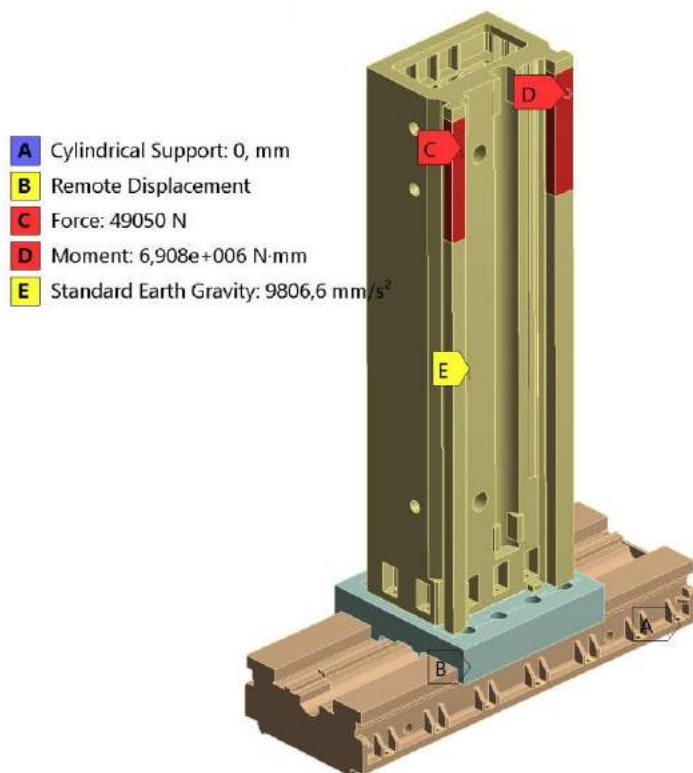
Váhy součástí sestavy reprezentuje tíhová síla působící v těžišti dané sestavy. Okrajové zatěžující podmínky jsou na obou sestavách zobrazeny na obrázcích 88 a 89.

Vazby

Vazby mezi jednotlivými částmi sestav (stojanem, saněmi a loži) jsou pro zjednodušení ve výpočtech uvažovány jako tuhé a realizovány kontaktem typu „bonded“. Vazby k základu pak představují buď styk skrze stykové plochy, nebo šroubový spoj. Lože příčné i podélné sestavy je uloženo na základu stroje stavitelnými podložkami pomocí šroubových spojů. U těchto šroubových spojů je zanedbána jejich deformace a tento spoj tedy uvažován jako tuhý. Ve výpočtu jej představuje vazba „cylindrical support“ (obrázek 88 a 89 - vazba A) s omezením pohybů stykové plochy ve všech směrech. Mimo šroubových spojů je uvažován styk stavitelných podložek s lože skrze stykové plochy. Vazbou typu „remote displacement“ je modelováno omezení pohybu ve směru os X a Z (obrázek 88 a 89 - vazba B).



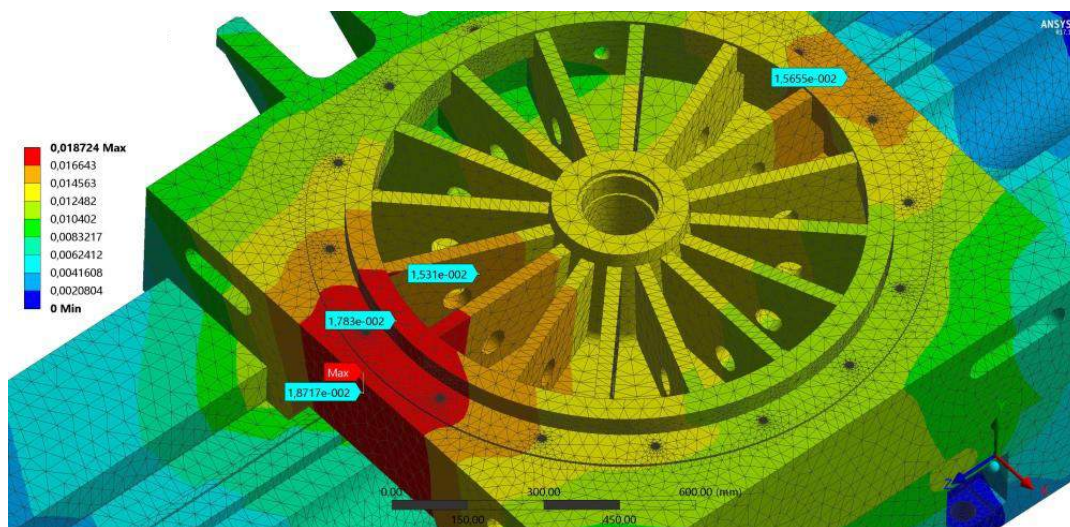
Obr. 88) Okrajové podmínky na podélné sestavě současného stroje



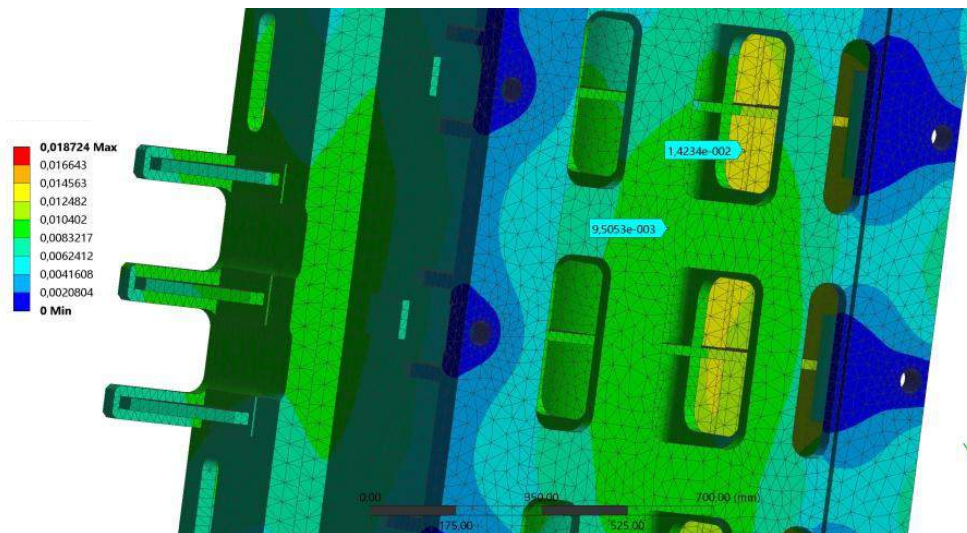
Obr. 89) Okrajové podmínky na příčné sestavě současného stroje

7.1.4 Výsledky výpočtů současné konstrukce

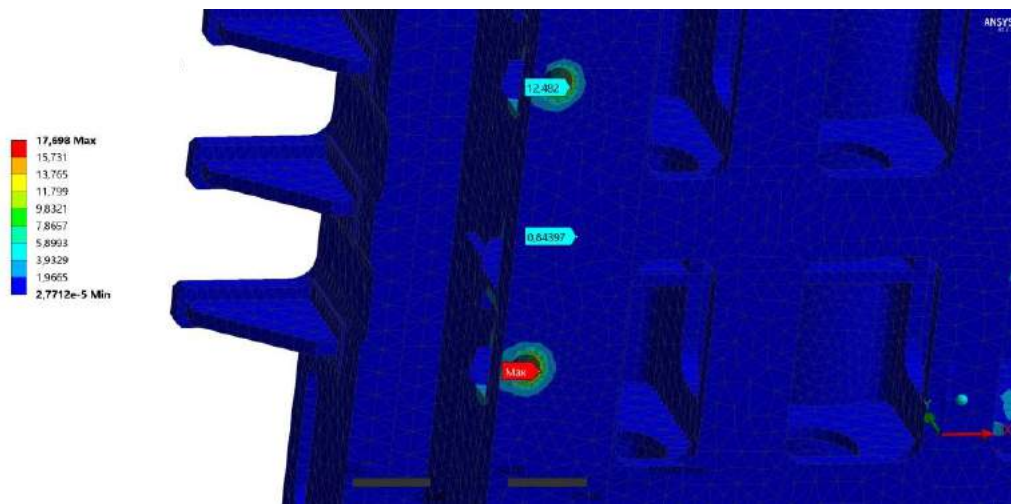
Výsledné maximální napětí na současně sestavě kompletního rámu je 17,7 MPa a nachází se v oblasti styku spodní strany vedení stojanu a příčných saní. Maximální deformace z celé soustavy nastává v horní oblasti stojanu s hodnotou přibližně 0,1 mm. Tyto hodnoty nastávají pro nejhorší možný případ, tedy hrubování na největším možném obrobku při největším vyložení (obrázek 90, 91, 92, 93 a 94). Pro dokončování budou tyto hodnoty řádově nižší.



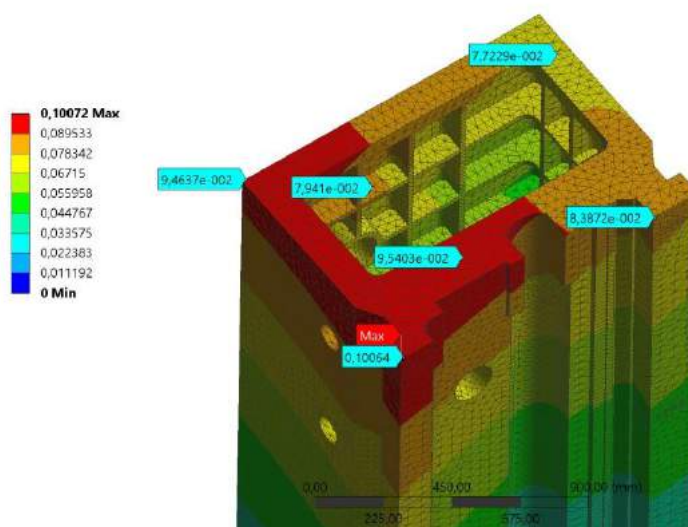
Obr. 90) Deformace na výchozí podélné sestavě současného stroje – horní pohled



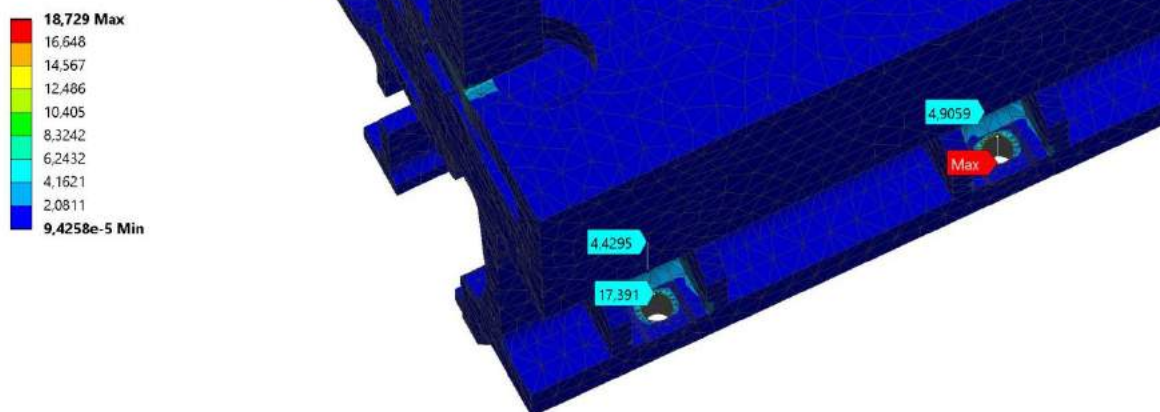
Obr. 91) Deformace na výchozí podélné sestavě současného stroje – spodní pohled



Obr. 92) Maximální napětí na výchozí podélné sestavě současného stroje



Obr. 93) Maximální deformace na výchozí příčné sestavě současného stroje



Obr. 94) Napětí na výchozí příčné sestavě současného stroje

7.2 Analýza koncepčních variant

Výpočtové modely koncepčních variant jsou vytvořeny jako sestavy litinových nebo ocelových plášťů a betonových výplní. Analýzy jsou rozděleny do dvou základních kapitol. Kapitola 7.3 popisuje nastavení výpočtů koncepčních variant využívajících šedou litinu, kapitola 7.4 pak nastavení výpočtů variant využívajících ocel. Jako referenční výplňový materiál je využit materiál s obchodním názvem Durfill německé společnosti Durcrete. Vlastnosti tohoto betonového materiálu jsou uvedeny v tabulce 23 a katalogový list je přiložen v příloze 5. Materiál je izotropický a vykazuje elasticko-plastické vlastnosti, díky čemuž lze využít lineární analýzu pro zjišťování vlastností součástí. Materiál obsahuje částice o maximální velikosti 5 mm [53].

Tab 23) Vlastnosti a parametry betonu Durcrete Durfill [54] [55]

Parametry	Měrná hmotnost (kg·m ³)	Modul pružnosti (GPa)	Mez pevnosti v tahu (MPa)	Mez pevnosti v tlaku (MPa)	Mez pevnosti v ohybu (MPa)	Poissonovo číslo (-)	Cena kg materiálu (€)
Hodnoty	2275	32	10	90	-	0,2	0,575

Vzhledem k velkému počtu variant budou kapitoly 7.3 a 7.4 popisovat detailněji pouze varianty I a V jako představitele jednotlivých materiálů vnějších plášťů – šedé litiny a oceli. Postup z těchto variant bude aplikován i na ostatní a výsledky analýz budou připojeny v příloze.

7.3 Analýza koncepční varianty I

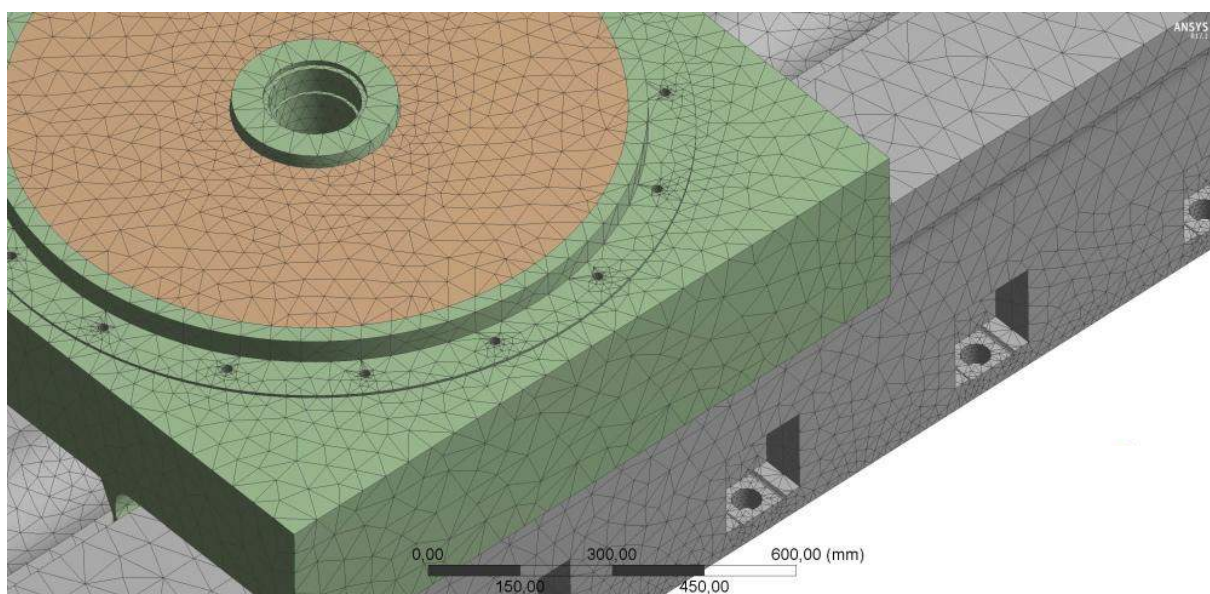
7.3.1 Modely geometrií a materiálů

Pro statickou analýzu jsou využity modely varianty I z kapitoly 6.2.2. Ostatní modely koncepční variant (II, III a IV) jsou převzaty z kapitol 6.2.3 až 6.2.5. Tyto modely byly vytvořeny v programu Autodesk Inventor a následně nahrány pro simulaci pevnostních vlastností do programu ANSYS Workbench. Platí zde také zjednodušení uvedená v kapitole 7.1.1. Výsledky analýz variant II, III a IV jsou přiloženy v příloze 6.

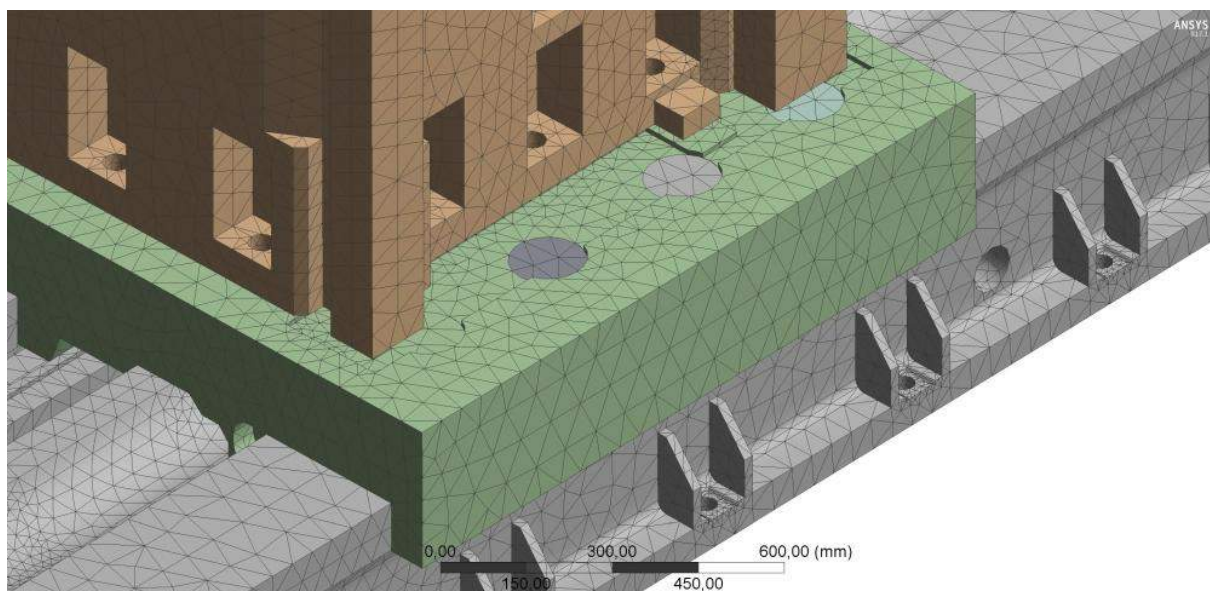
Materiálem pláště je šedá litina GG30 specifikovaná v tabulce 13, výplň tvoří betonový materiál, jehož vlastnosti jsou uvedeny v tabulce 23.

7.3.2 Model sítě prvků

Pro tvorbu sítě obou prvků sestav je využito automatické síťování, které obsahuje ve velké míře objemové prvky SOLID 187 s nastavenou primární velikostí 50 mm a místním zjemněním v místech koncentrace zatížení. Sítě jsou opět vytvořeny na dvou sestavách – příčné a podélné. Tyto sítě a jejich detaily jsou zobrazeny na obrázku 95 a 96.



Obr. 95) Detail sítě prvků na podélné sestavě koncepční varianty I



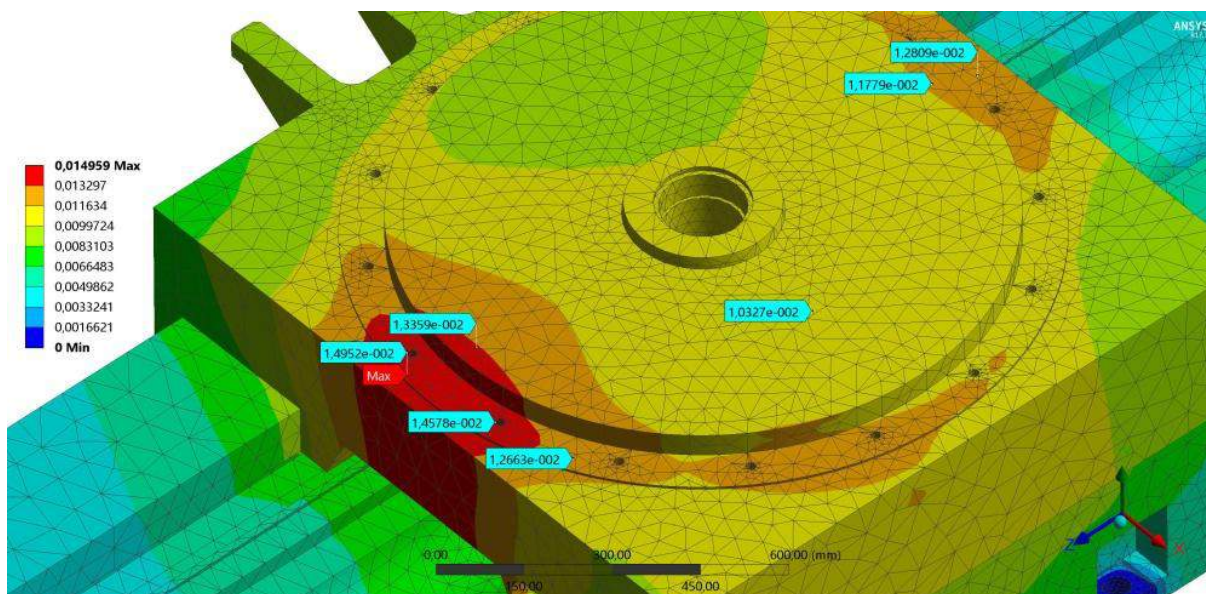
Obr. 96) Síť prvků na příčné sestavě koncepční varianty I

7.3.3 Okrajové podmínky

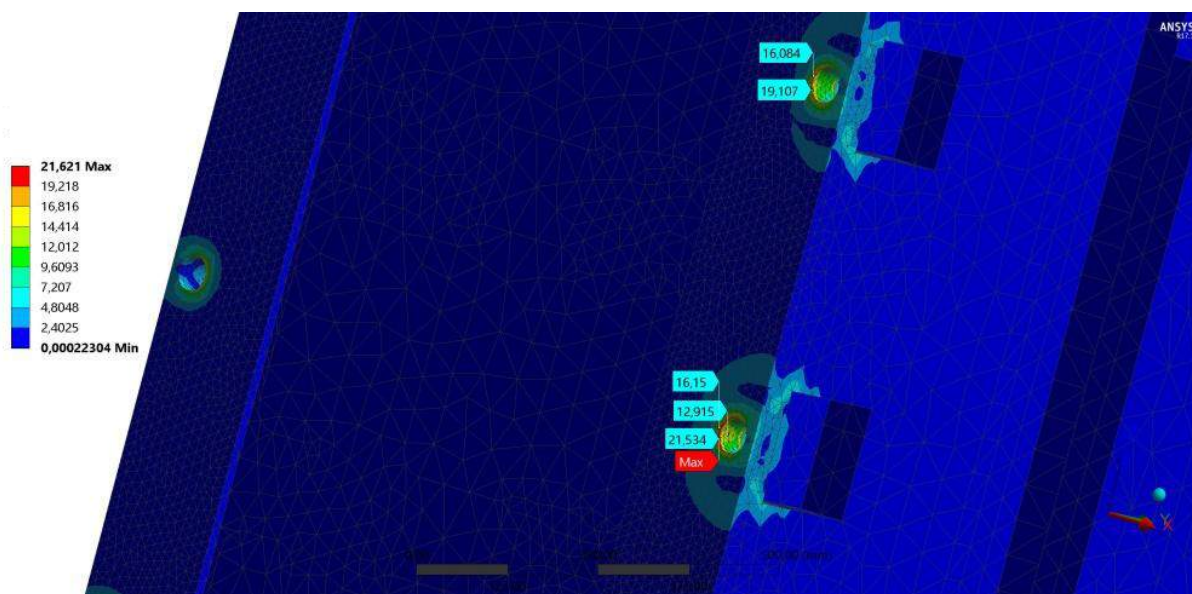
Okrajové podmínky pro koncepční varianty jsou totožné jako v kapitole 7.1.3. Zatížení působící na sestavy je identické a také omezení posuvů byla ponechána. Vazba betonové výplně a vnějšího pláště je provedena kontaktem typu „bonded“. Tato vazba zamezuje „odlepení“ ploch materiálu výplně a pláště a také zamezuje jejich vzájemnému posouvání při deformaci.

7.3.4 Výsledky výpočtů varianty I

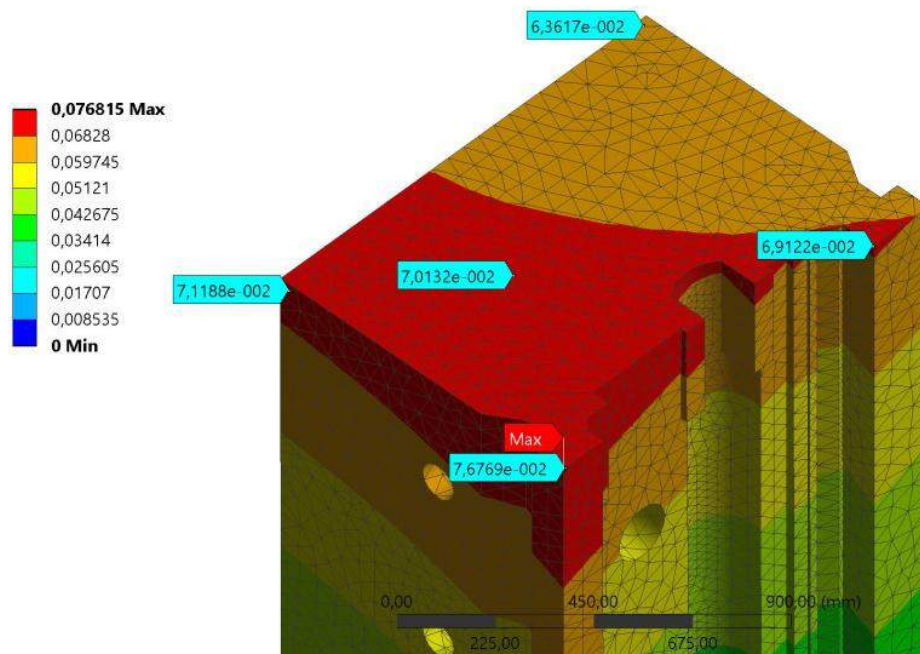
Maximální napětí se u varianty I nachází na podélné sestavě (v místě uložení lože - obrázek 98) a má hodnotu 21,62 MPa. Maximální deformace se s hodnotou 0,0768 mm nachází v horní oblasti stojanu příčné sestavy (obrázek 99). Hodnot sestavy nabývají při nejhorším možném případě zatěžování stroje – hrubování, největší možný obrobek a vyložení.



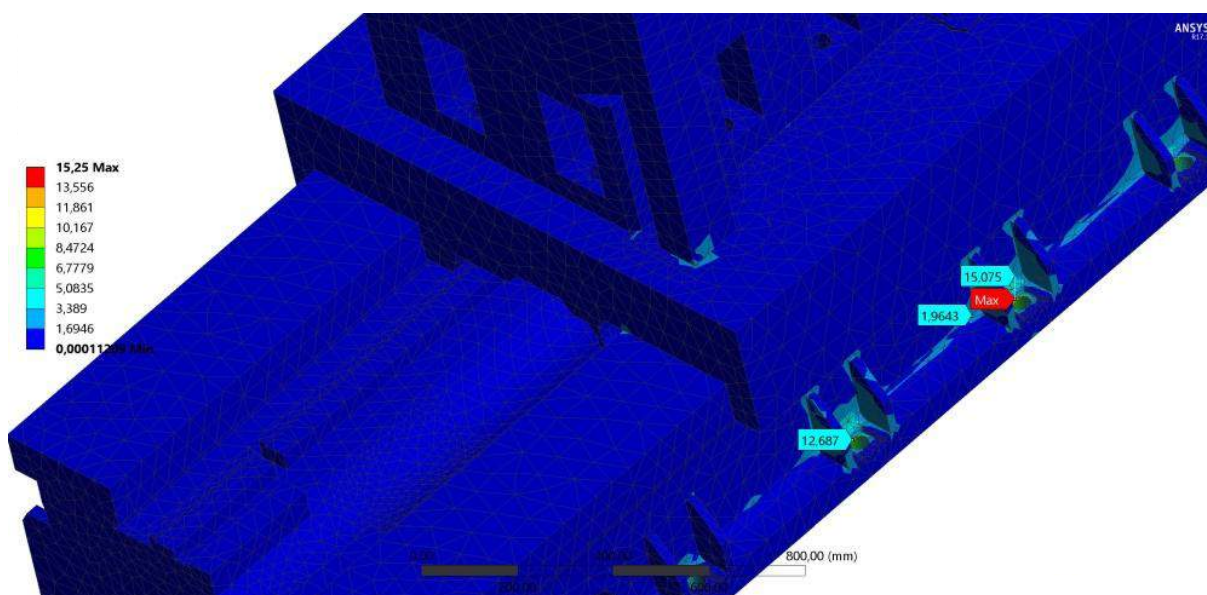
Obr. 97) Maximální deformace na podélné sestavě koncepční varianty I



Obr. 98) Maximální napětí na podélné sestavě koncepční varianty I



Obr. 99) Maximální deformace na příčné sestavě koncepční varianty I



Obr. 100) Maximální napětí na příčné sestavě koncepční varianty I

7.4 Analýza koncepční varianty V

7.4.1 Modely geometrií a materiálů

Jako modely geometrií jsou pro statickou analýzu využity modely varianty z kapitoly 6.2.6. Pro ostatní koncepční varianty jsou pak využity modely z kapitol 6.2.7 až 6.2.10. Tyto sestavy obsahují i zjednodušené modely vozíků a lišt vedení, které jsou nutné pro fungování rámu. Chování těchto vozíků a lišt je nastaveno jako „Rigid“. Toto nastavení způsobí, že modely se

chovají jako absolutně tuhé a není jim tedy dovolena deformace. Součásti tak pouze přenáší přes svoji geometrii zatížení na ostatní deformovatelné prvky.

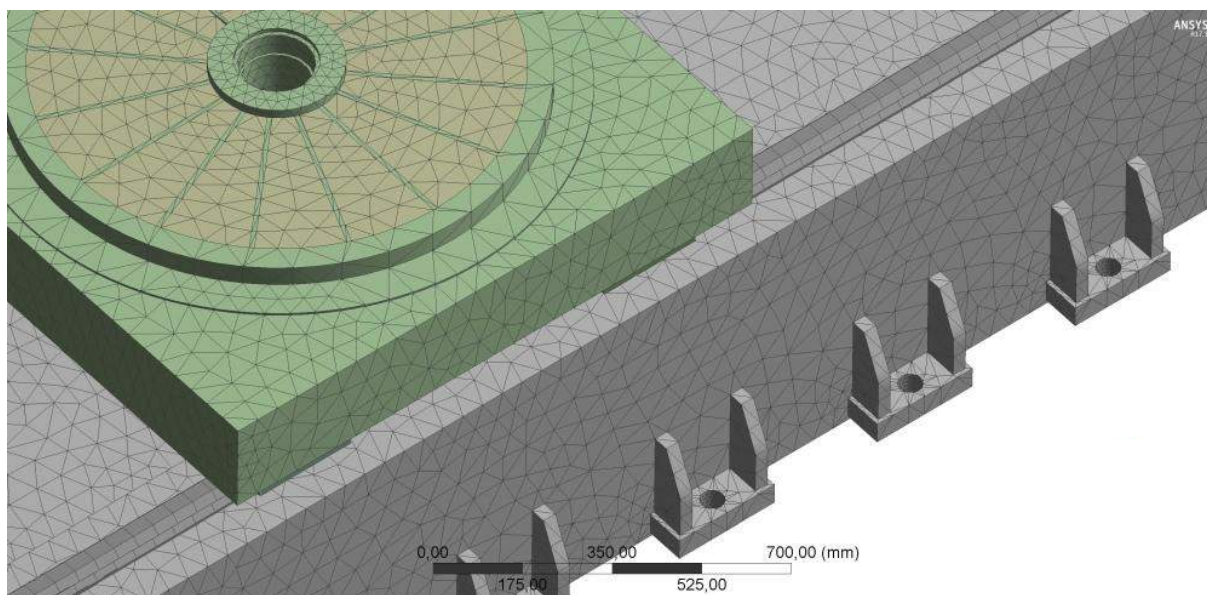
Materiálem vnějšího pláště je zvolena ocel s označením 11 523 (S35530), jejíž parametry částečně specifikuje ČSN 41 1523 (tabulka 24).

Tab 24) Vlastnosti oceli 11 523 [51] [52]

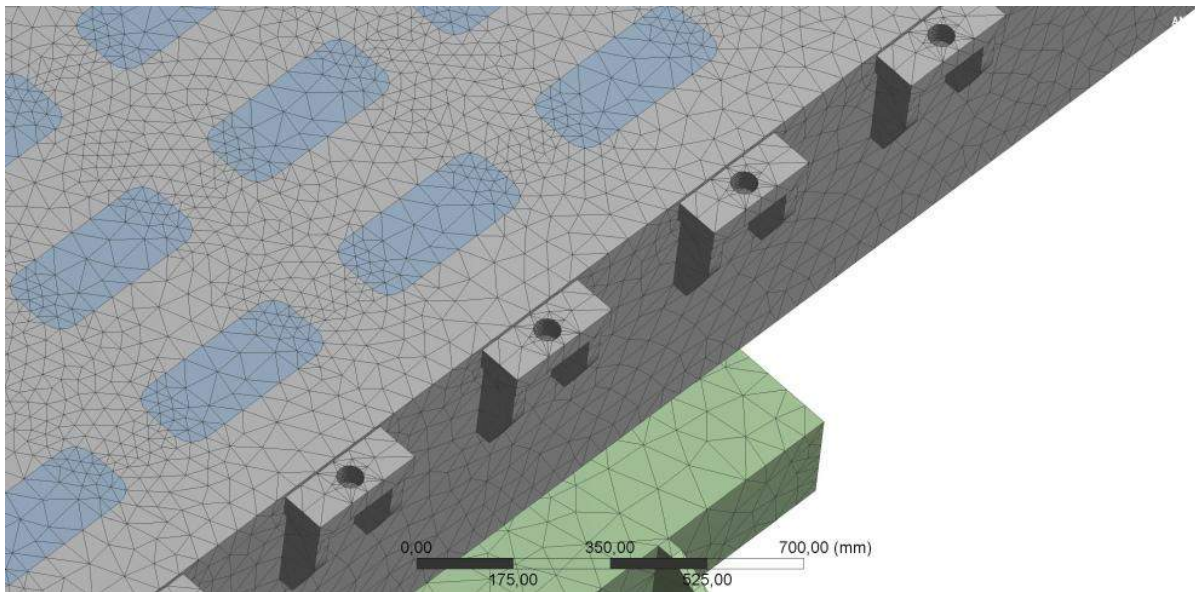
Parametry	Měrná hmotnost (kg·m ³)	Modul pružnosti (GPa)	Mez pevnosti v tahu (MPa)	Mez pevnosti v tlaku (MPa)	Mez pevnosti v ohybu (MPa)	Poissonovo číslo (-)
Hodnoty	7850	206	510-680	-	-	0,3

7.4.2 Model sítě prvků

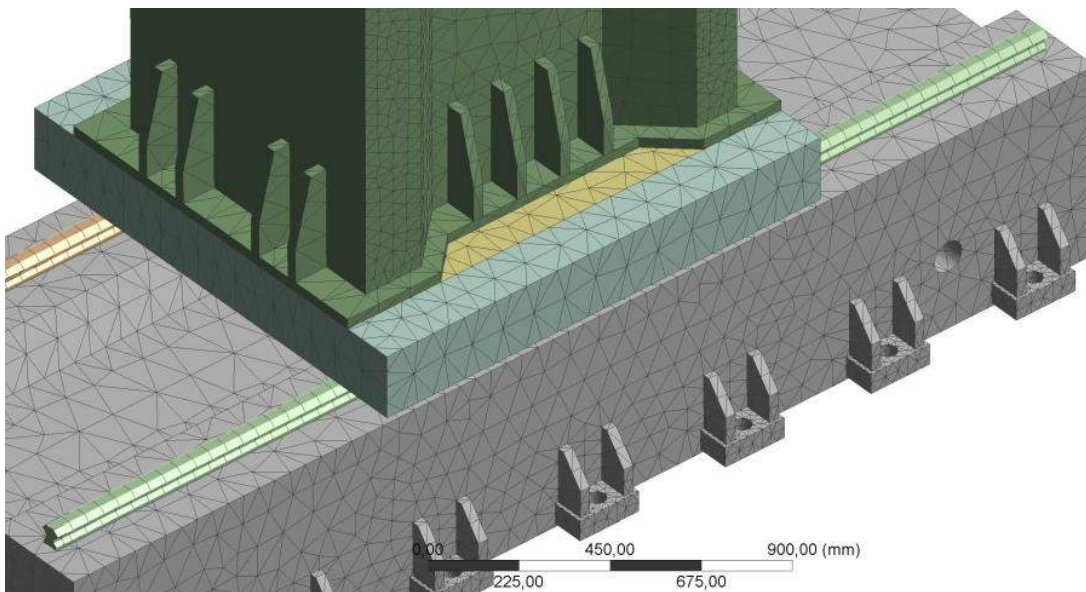
Pro síť sestav modelů varianty V je použita síť zejména s prvky SOLID 187. Z důvodu vysoké náročnosti na hardware je velikost těchto prvků nastavena na 100 mm. Do modelů jsou však zavedena místní zjemnění v místech deformace sítě a koncentrace zatížení. Pohled na výslednou síť je zobrazen na obrázcích 101, 102 a 103.



Obr. 101) Detail sítě prvků na podélné sestavě koncepční varianty V – horní pohled



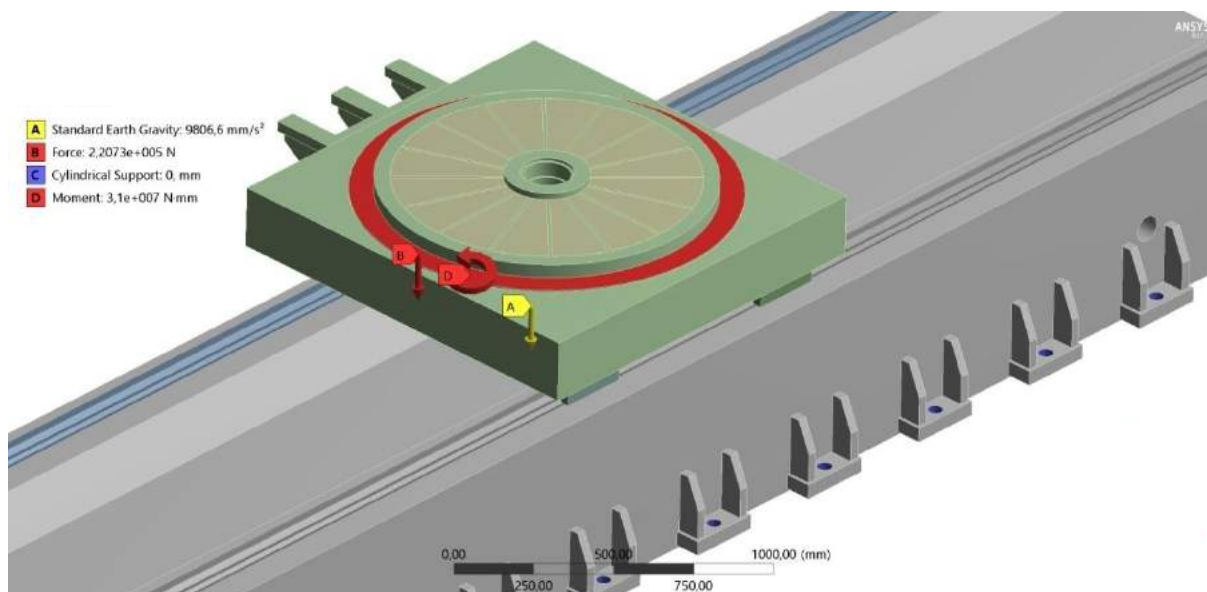
Obr. 102) Detail sítě prvků na podélné sestavě koncepční varianty V – dolní pohled



Obr. 103) Detail sítě prvků na příčné sestavě koncepční varianty V – horní pohled

7.4.3 Okrajové podmínky

Okrajové podmínky vychází částečně z kapitoly 7.1.3, ze které jsou použity vypočítané hodnoty zatížení (obrázek 104 a 105). Umístění všech okrajových podmínek muselo být změněno z důvodu rozdílné sestavy. Mezi betonovou výplní a ocelovým pláštěm jsou využity vazby „bonded“. Pro hrubé zachycení reálné soustavy jsou mezi ložem a saněmi vymodelovány lišty a vozíky, u nichž je pro podmínky výpočtu nastaveno chování typu „rigid bodies“ – tuhá tělesa. Jako kontakt mezi těmito tuhými součástmi je využita také vazba typu „bonded“, ale nyní s chováním kontaktu typu „assymetric“. Při modelování okrajových podmínek není využita vazba typu „remote displacement“ z důvodu náročnosti a následné havárie výpočtu, který tato vazba způsobovala.



Obr. 104) Okrajové podmínky na podélné sestavě koncepční varianty V

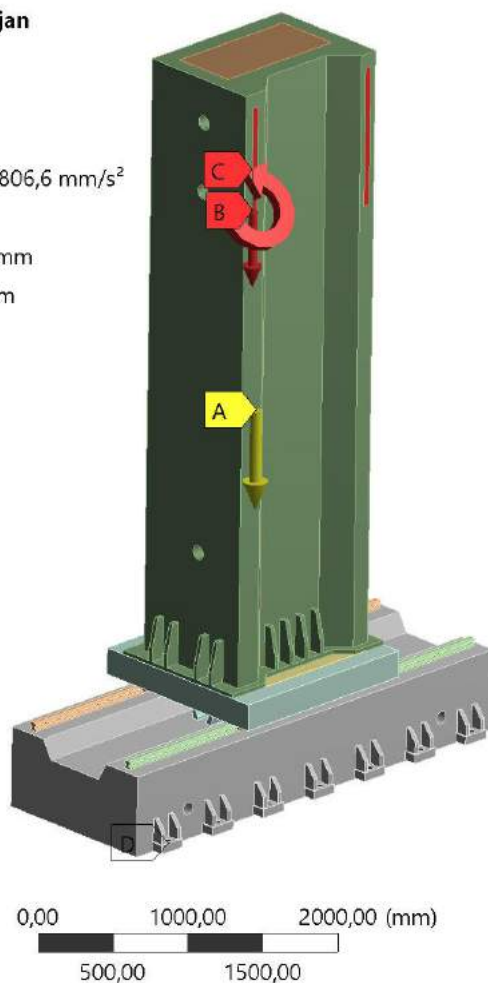
S: Static Structural vVV_stojan

Static Structural

Time: 1, s

26.4.2018 21:27

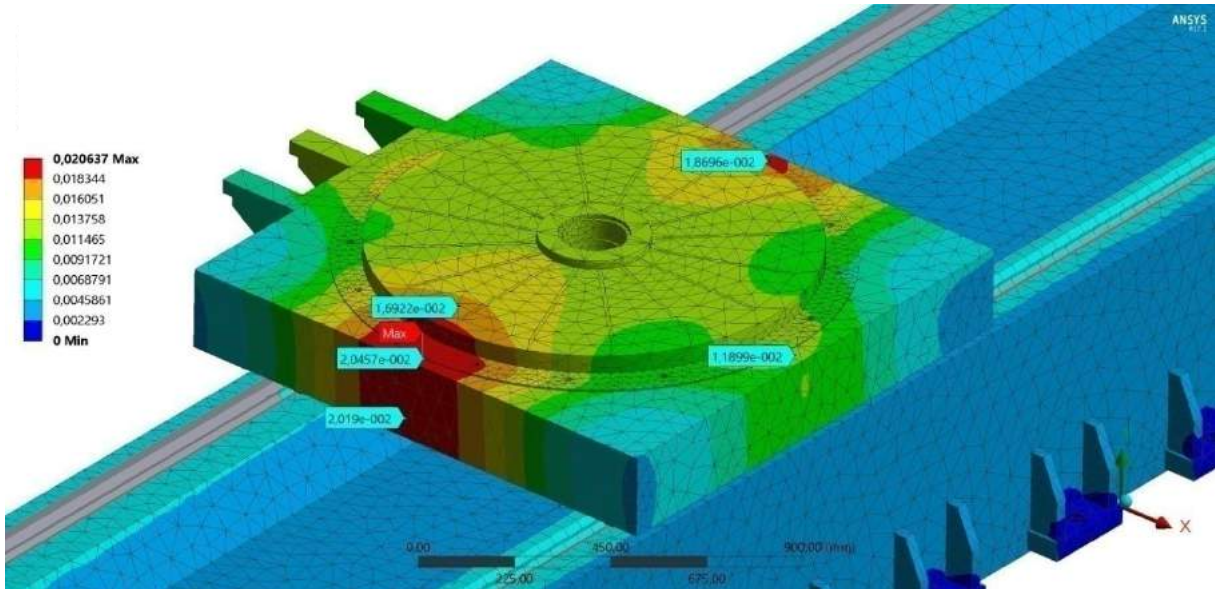
- A** Standard Earth Gravity: 9806,6 mm/s²
- B** Force: 49050 N
- C** Moment: 6,908e+006 N-mm
- D** Cylindrical Support: 0, mm



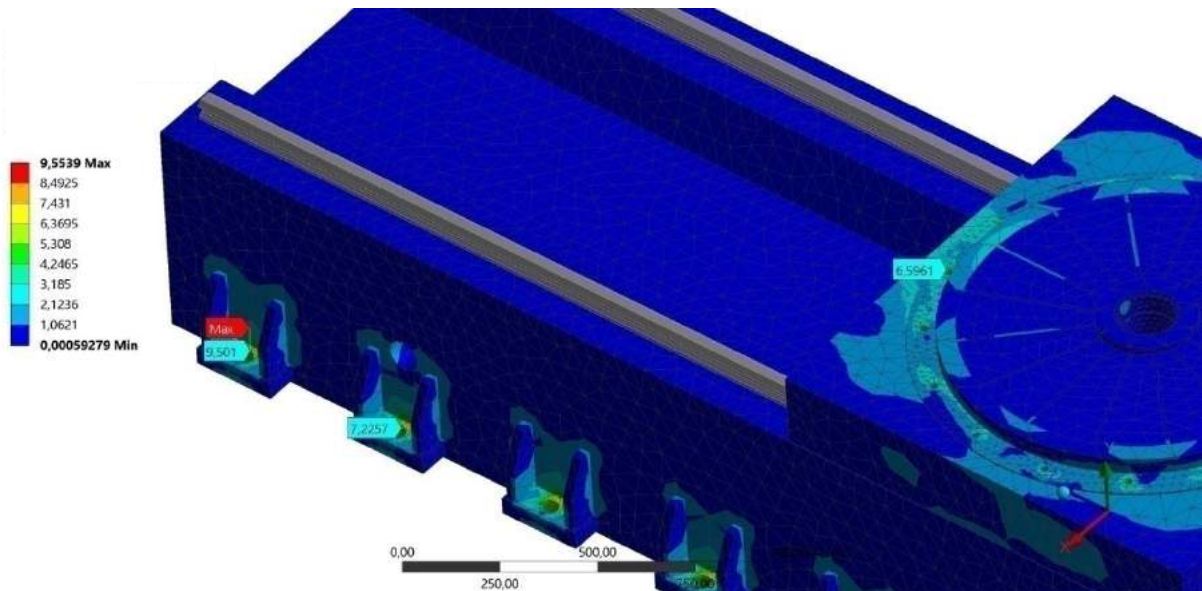
Obr. 105) Okrajové podmínky na příčné sestavě koncepční varianty V

7.4.4 Výsledky výpočtů varianty V

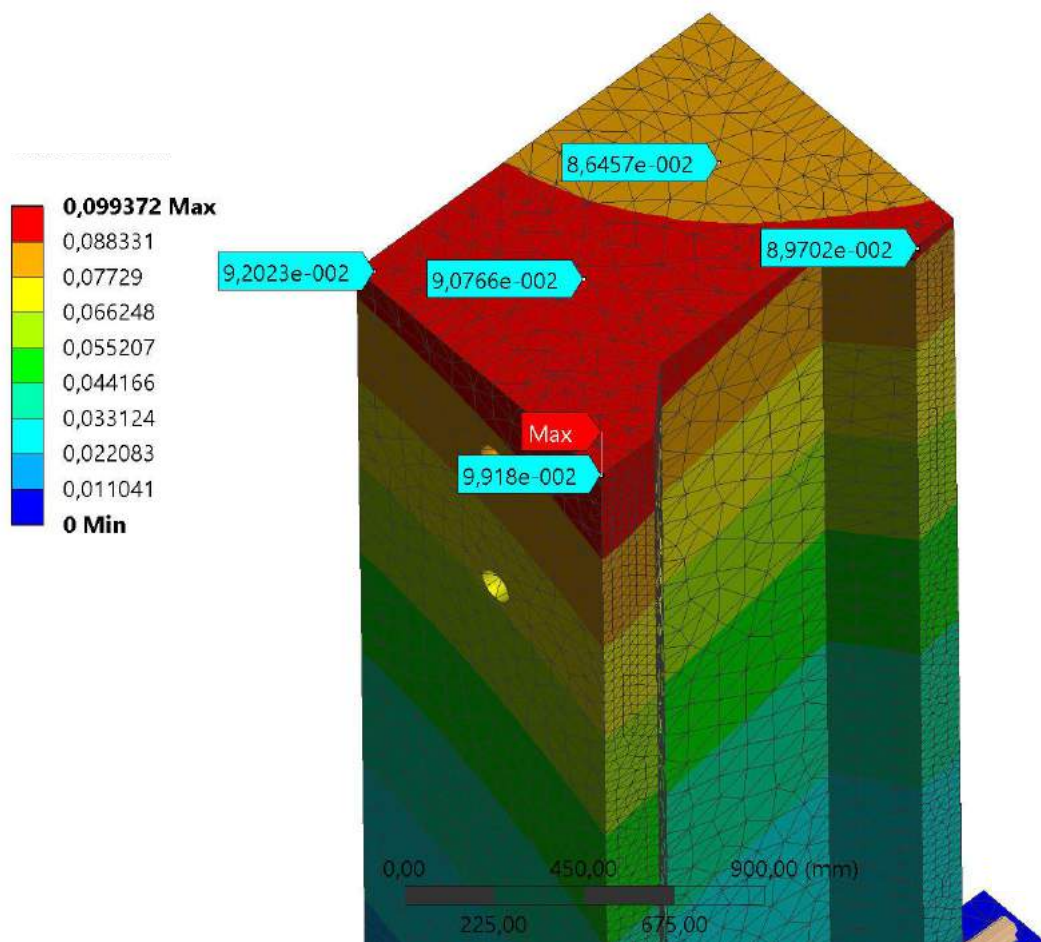
Obrázky 106, 107, 108 a 109 zobrazují výsledky výpočtů varianty V. Maximální napětí se s hodnotou 9,55 MPa nachází v místě šroubového spoje lože podélné sestavy (obrázek 107). Hodnota maximální deformace se nachází v horní části stojanu (obrázek 108) a má hodnotu 0,0994 mm. Těchto hodnot sestavy opět dosáhnou při nejhorsím možném stavu zatěžování stroje - hrubování, největší možný obrobek a vyložení.



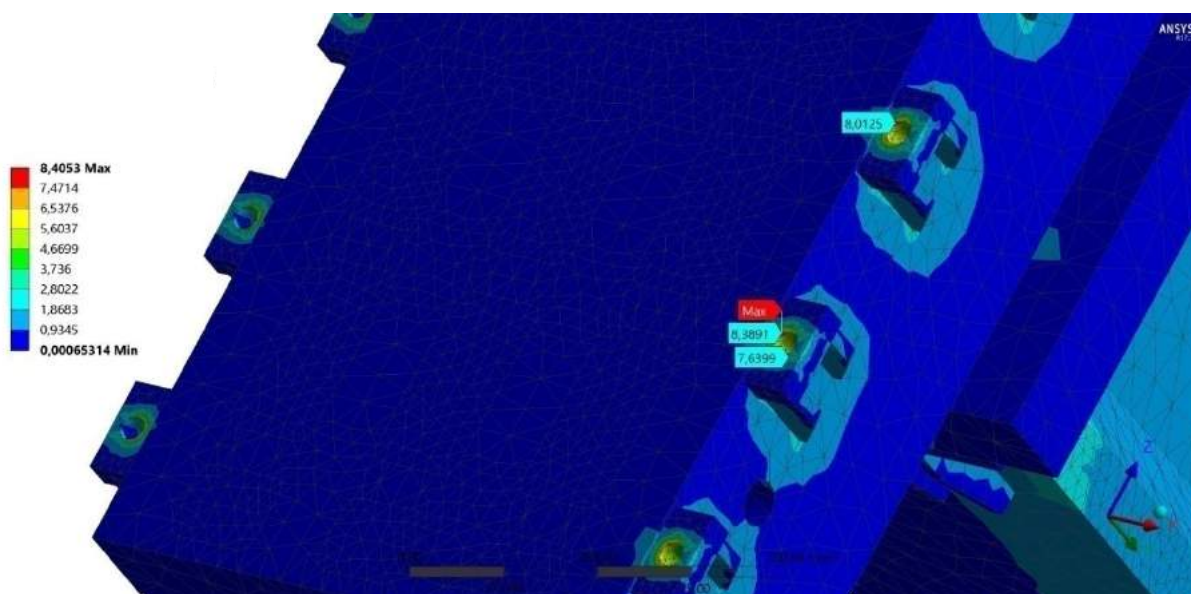
Obr. 106) Maximální deformace na podélné sestavě koncepční varianty V



Obr. 107) Maximální napětí na podélné sestavě koncepční varianty V



Obr. 108) Maximální deformace na příčné sestavě koncepční varianty V



Obr. 109) Maximální napětí na příčné sestavě koncepční varianty V

7.5 Přehled výsledků analýz současné konstrukce a všech koncepčních variant

Tabulky 25 a 26 a grafy 110 a 111 ukazují výsledky výpočtů deformací a napětí všech koncepčních variant (včetně variant II, III, IV, VI, VII, VIII a IX). Pro názornost jsou do tabulek i grafů zahrnuty i výsledky výpočtů současného řešení stroje. Grafické znázornění výsledků tvoří příloha 6.

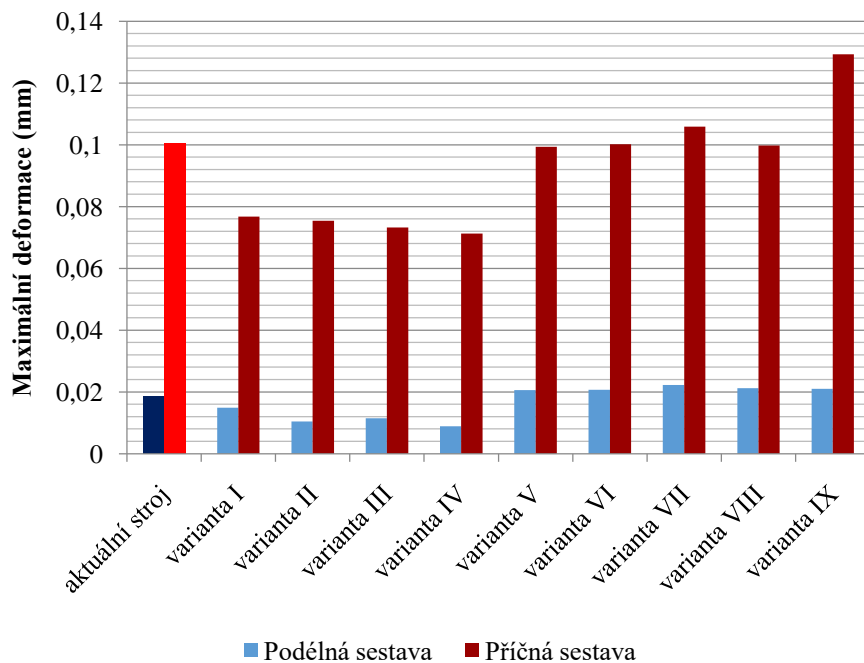
Postup a nastavení výpočtů jsou maximálně zjednodušeny. Systematický přístup k tvorbě sítí modelů a okrajových podmínek na modelu je aplikován tak, aby byly zachovány dobré výsledky, které je možné mezi sebou porovnávat a současně aby bylo možné využít maximální potenciál dostupné výpočetní techniky při přijatelném času výpočtu.

Tab 25) Tabulka maximálních deformací a napětí podélných sestav

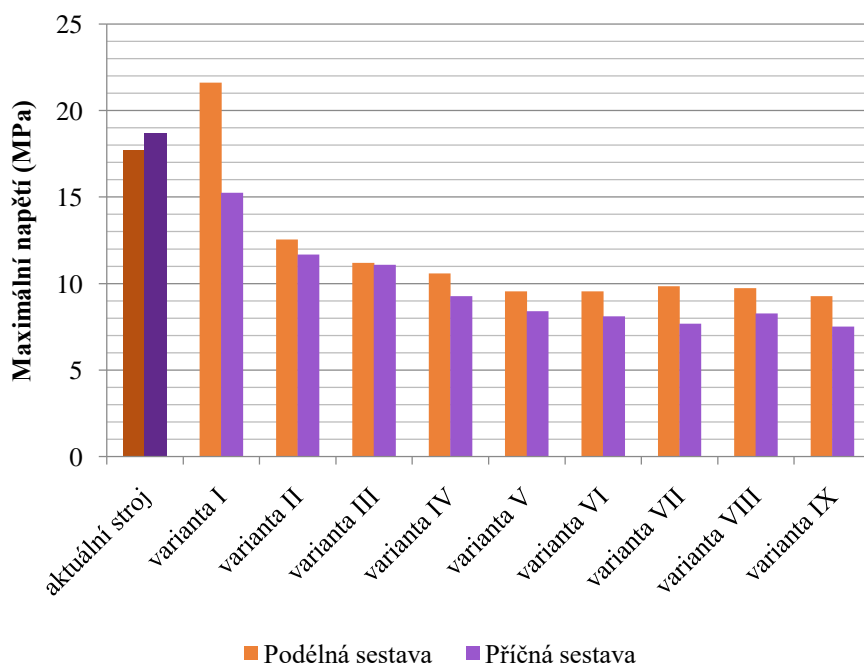
Varianta	Maximální deformace (mm)	Maximální napětí (MPa)
současná konstrukce	0,0187	17,7
vI	0,0149	21,62
vII	0,0105	12,54
vIII	0,0115	11,2
vIV	0,0089	10,59
vV	0,0206	9,55
vVI	0,0207	9,54
vVII	0,0223	9,85
vVIII	0,0212	9,74
vIX	0,0210	9,28

Tab 26) Tabulka maximálních deformací a napětí příčných sestav

Varianta	Maximální deformace (mm)	Maximální napětí (MPa)
současná konstrukce	0,1006	18,73
vI	0,0768	15,25
vII	0,0754	11,673
vIII	0,0733	11,09
vIV	0,0713	9,28
vV	0,0994	8,41
vVI	0,1002	8,1
vVII	0,1059	7,68
vVIII	0,0998	8,28
vIX	0,1293	7,52



Obr. 110) Graf maximálních deformací



Obr. 111) Graf maximálních napětí

8 VÝBĚR OPTIMÁLNÍ KONSTRUKČNÍ VARIANTY

8.1 Výběr optimální varianty řešení

Pro výběr optimální varianty řešení konstrukce stroje bude použita vícekritériální metoda PATTERN – „planning assistance through technical evaluations of relevance numbers“ Jedná se o metodu, při níž jsou jednotlivá kritéria hodnocena v páru, pro něž se následně stanovuje váha významnosti [56].

Skládá se z následujících kroků:

- výběr hodnotících kritérií a jejich tendencí;
- stanovení váhy významnosti hodnotících kritérií;
- stanovení indexů změn kritérií pro výběr vhodné varianty;
- stanovení pořadí jednotlivých variant.

8.1.1 Výběr hodnotících kritérií

Výběr kritérií není dopředu nijak specifikovaný a záleží vždy na názoru a odborné způsobilosti autora k posouzení podstatných vlivů, které na danou soustavu působí. Kritéria pro hodnocení navržených koncepčních variant vychází ze systému podstatných veličin působících na obráběcí stroj uvedených v kapitole 5.3 a jsou uvedené v tabulce 27 včetně tendence [56].

Tab 27) Tabulka hodnotících kritérií a tendencí změn

Zkratka kritéria	Hodnotící kritérium	Tendence změny
K1	dekrement útlumu	stoupající
K2	termomechanické vlastnosti	klesající
K3	čas	klesající
K4	složitost	klesající
K5	prostředky	klesající
K6	hmotnost	klesající
K7	maximální deformace	klesající
K8	maximální napětí	klesající
K9	náklady na kg materiálu	klesající
K10	ekologičnost výroby	stoupající

8.1.2 Párové porovnání hodnotících kritérií

Při párovém porovnání jednotlivých hodnotících kritérií vzniká určité porovnání jednotlivých kritérií mezi sebou, při čemž se tímto procesem získává pořadí kritérií dle velikosti významu (tabulka 28) [56].

Tab 28) Párové porovnání hodnotících kritérií

Kritérium	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8	K9	K10	Suma	Pořadí
K1	K1	K1	K1	K1	K1	K1	K7	K1	K1	K1	9	2.
K2		K2	K2	K2	K2	K6	K7	K2	K2	K2	7	4.
K3			K3	K3	K3	K6	K7	K3	K3	K3	6	5.
K4				K4	K5	K6	K7	K4	K9	K4	3	8.
K5					K5	K6	K7	K5	K9	K5	4	7.
K6						K6	K7	K6	K6	K6	8	3.
K7							K7	K7	K7	K7	10	1.
K8								K8	K9	K8	2	9.
K9									K9	K9	5	6.
K10										K10	1	10.

8.1.3 Stanovení váhy významnosti hodnotících kritérií

Pro stanovení významnosti jednotlivých hodnotících kritérií je třeba vyjít z tabulky 28, ze které se sestaví tabulka vah kritérií (tabulka 29). Jednotlivá kritéria zde budou seřazena dle pořadí v tabulce 27 [56].

Následně se přiřadí jednotlivým kritériím hodnoty síly jejich vztahu dle stupnice:

- 1 – blízký vztah;
- 2 – střední vztah;
- 3 – vzdálený vztah.

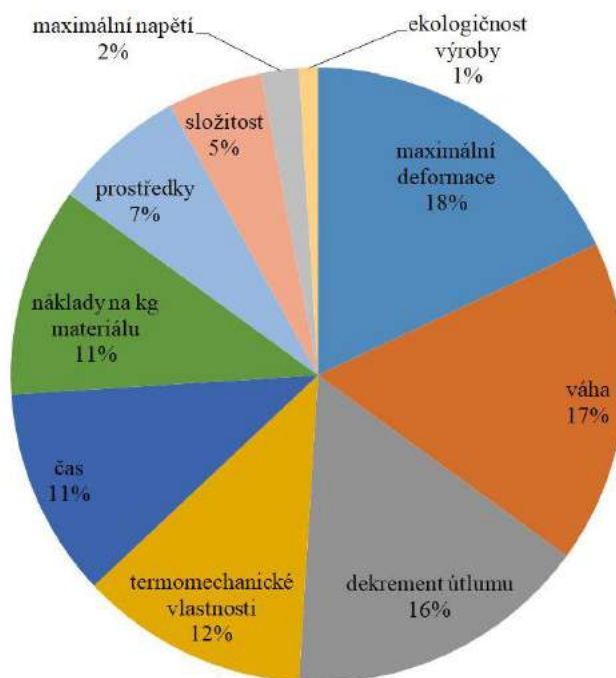
Následně se určí bodové hodnoty významnosti BHV_j pro všechna kritéria a vypočítá se váha významnosti q_j dle následujícího vztahu:

$$q_j = \frac{BHV_j}{\sum_{j=1}^m BHV_j} \quad (11)$$

Tab 29) Tabulka vah kritérií

Kritérium	K7	K1	K6	K2	K3	K9	K5	K4	K8	K10	Suma (BHV _j)	Váha (q _j)
K7	1	1	3	2	1	1	1	2	2	1	15	18%
K1		1	3	1	2	1	1	2	1	1	13	16%
K6			1	2	2	3	2	1	1	2	14	17%
K2				1	1	1	1	3	2	1	10	12%
K3					1	1	2	3	1	1	9	11%
K9						1	2	2	1	2	8	11%
K5							1	1	2	2	6	7%
K4								1	2	1	4	5%
K8									1	1	2	2%
K10										1	1	1%
Suma											82	100%

Váhy významnosti vztažené ke kritériím jsou vyobrazeny v grafu 112.



Obr. 112) Graf vah kritérií

8.1.4 Pořadí koncepčních variant

Pořadí koncepčních variant se stanovuje pomocí indexů změn kritérií. Kritéria se stoupající a klesající tendencí se vypočítají zvláště a následně je stanoven jejich vážený index spolu s pořadím. Indexy změn kritérií jsou v tabulkách 30 a 31 zaznačeny tučným písmem.

Výpočet indexů změn kritérií se stoupající tendencí

$$I_{jx} = \frac{H_{jx}}{H_{j_min}} \quad (12)$$

Výpočet indexů změn kritérií s klesající tendencí

$$I_{jx} = \frac{H_{j_max}}{H_{jx}} \quad (13)$$

kde H_{jx} – hodnota j-tého kritéria x-tého prvku; H_{j_max} – největší hodnota j-tého kritéria; H_{j_min} – nejmenší hodnota j-tého kritéria.

Výpočet vážených indexů

$$I_{jx_v} = I_{jx} \cdot q_j \quad (14)$$

kde q_j – váha významnosti j-tého hodnotícího kritéria.

Výpočet pořadí

Součtem vážených indexů se stanoví relativní úroveň i-té varianty j-tého prvku:

$$S_x = \sum_{j=1}^k I_{jx_v}$$

Pro hodnocení kritérií variant je zvolena následující stupnice:

1 – Nízká; 2 – Střední; 3 – Vysoká; 4 – Velmi vysoká; 5 – Mimořádně vysoká.

Tab 30) Tabulka stanovení pořadí koncepčních variant – část 1

Kritérium	Váha	Varianta konstrukce									
		současná konstrukce		varianta I		varianta II		varianta III		varianta IV	
K1	16%	$\frac{2}{1}$	0,16	$\frac{5}{2,5}$	0,40	$\frac{5}{2,5}$	0,4	$\frac{5}{2,5}$	0,4	$\frac{5}{2,5}$	0,40
K2	12%	$\frac{4}{1}$	0,12	$\frac{2}{2}$	0,24	$\frac{2}{2}$	0,24	$\frac{2}{2}$	0,24	$\frac{2}{2}$	0,24
K3	11%	$\frac{3}{1,33}$	0,15	$\frac{4}{1}$	0,11	$\frac{4}{1}$	0,11	$\frac{4}{1}$	0,11	$\frac{4}{1}$	0,11
K4	5%	$\frac{4}{1}$	0,05	$\frac{4}{1}$	0,05	$\frac{3}{1,33}$	0,07	$\frac{2}{2}$	0,10	$\frac{3}{1,33}$	0,07
K5	7%	$\frac{2}{1,5}$	0,11	$\frac{3}{1}$	0,07	$\frac{3}{1}$	0,07	$\frac{3}{1}$	0,07	$\frac{3}{1}$	0,07
K6	17%	$\frac{2}{2,5}$	0,43	$\frac{4}{1,25}$	0,21	$\frac{5}{1}$	0,17	$\frac{5}{1}$	0,17	$\frac{5}{1}$	0,17
K7	18%	$\frac{4}{1,25}$	0,23	$\frac{2}{2,5}$	0,45	$\frac{2}{2,5}$	0,45	$\frac{2}{2,5}$	0,45	$\frac{2}{2,5}$	0,45
K8	2%	$\frac{4}{1,25}$	0,03	$\frac{5}{1}$	0,02	$\frac{3}{1,66}$	0,03	$\frac{3}{1,66}$	0,03	$\frac{2}{2,5}$	0,05
K9	11%	$\frac{3}{1,66}$	0,18	$\frac{4}{1,25}$	0,14	$\frac{5}{1}$	0,11	$\frac{4}{1,25}$	0,14	$\frac{5}{1}$	0,11
K10	1%	$\frac{2}{2}$	0,02	$\frac{1}{1}$	0,01	$\frac{1}{1}$	0,01	$\frac{1}{1}$	0,01	$\frac{1}{1}$	0,01
Celkem S_x	100%	1,46		1,70		1,66		1,72		1,68	
Relativní technická úroveň		146%		170%		166%		172%		168%	
Pořadí z konstrukčního hlediska		10.		7.		9.		6.		8.	

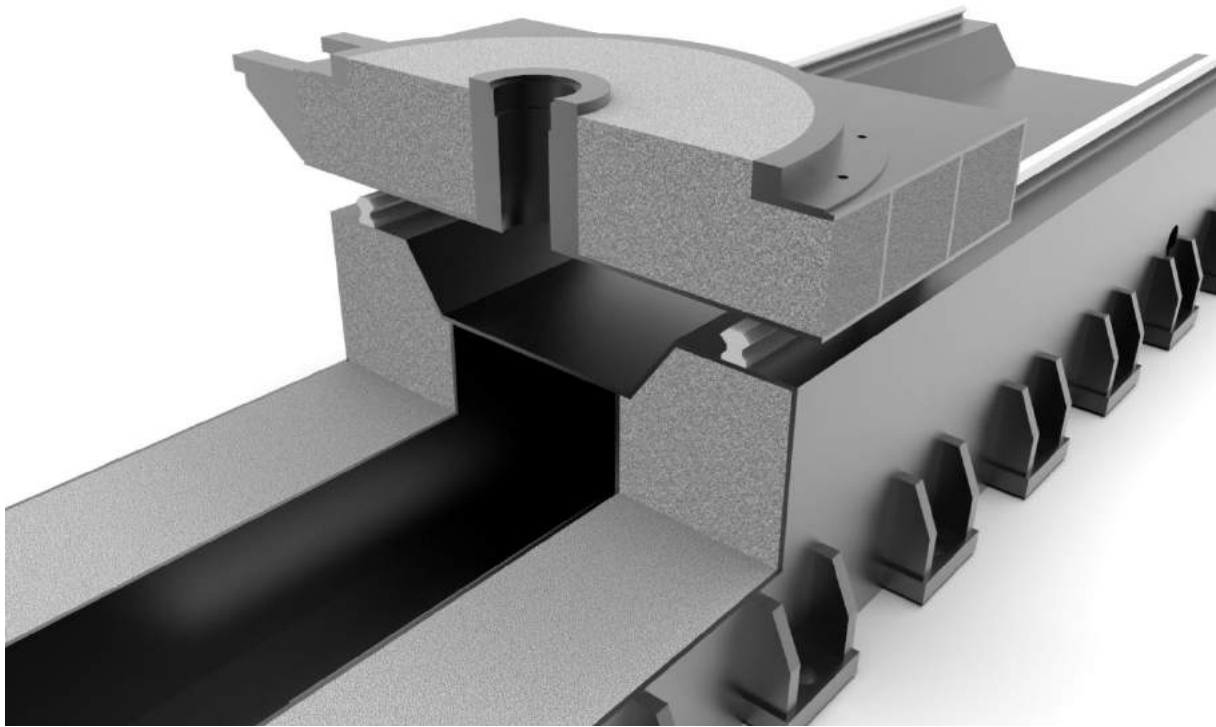
Tab 31) Tabulka stanovení pořadí koncepčních variant – část 2

Kritérium	Váha	Varianta konstrukce									
		varianta V		varianta VI		varianta VII		varianta VIII		varianta IX	
K1	16%	$\frac{5}{2,5}$	0,40	$\frac{5}{2,5}$	0,40	$\frac{5}{2,5}$	0,40	$\frac{5}{2,5}$	0,40	$\frac{5}{2,5}$	0,40
K2	12%	$\frac{2}{2}$	0,24	$\frac{2}{2}$	0,24	$\frac{2}{2}$	0,24	$\frac{2}{2}$	0,24	$\frac{2}{2}$	0,24
K3	11%	$\frac{4}{1}$	0,11	$\frac{2}{2}$	0,22	$\frac{1}{4}$	0,44	$\frac{2}{2}$	0,22	$\frac{2}{2}$	0,22
K4	5%	$\frac{3}{1,33}$	0,07	$\frac{2}{2}$	0,10	$\frac{1}{4}$	0,20	$\frac{2}{2}$	0,10	$\frac{2}{2}$	0,10
K5	7%	$\frac{1}{3}$	0,21	$\frac{1}{3}$	0,21	$\frac{1}{3}$	0,21	$\frac{1}{3}$	0,21	$\frac{1}{3}$	0,21
K6	17%	$\frac{3}{1,66}$	0,28	$\frac{3}{1,66}$	0,28	$\frac{2}{2,5}$	0,43	$\frac{3}{1,66}$	0,28	$\frac{1}{5}$	0,85
K7	18%	$\frac{4}{1,25}$	0,23	$\frac{4}{1,25}$	0,23	$\frac{4}{1,25}$	0,23	$\frac{4}{1,25}$	0,23	$\frac{5}{1}$	0,18
K8	2%	$\frac{1}{5}$	0,10	$\frac{1}{5}$	0,10	$\frac{1}{5}$	0,10	$\frac{1}{5}$	0,10	$\frac{1}{5}$	0,10
K9	11%	$\frac{3}{1,66}$	0,18	$\frac{2}{2,5}$	0,28	$\frac{2}{2,5}$	0,28	$\frac{2}{2,5}$	0,28	$\frac{1}{5}$	0,55
K10	1%	$\frac{3}{3}$	0,03	$\frac{3}{3}$	0,03	$\frac{4}{4}$	0,04	$\frac{3}{3}$	0,03	$\frac{3}{3}$	0,03
Celkem S_x	100%	1,85		2,08		2,56		2,08		2,88	
Relativní technická úroveň		185%		208%		256%		208%		288%	
Pořadí z konstrukčního hlediska		5.		3. – 4.		2.		3. – 4.		1.	

8.1.5 Vyhodnocení výběru optimální varianty

Metoda PATTERN a její výsledky v podobě tabulek 30 a 31 ukazují na značné výhody kombinace kovového a betonového materiálu. Varianty I až IV vykazují lepší technicko-ekonomické vlastnosti v porovnání se současným litinovým řešením, nevýhodou je však značná hmotnost, kterou není možné z důvodu nižších pevnostních vlastností šedé litiny redukovat oproti oceli. Také tuhost součástí i přes vysokou objemovou vyplněnost neroste, spíše stagnuje. Ocelové varianty však nevýhodu nižších pevnostních vlastností eliminují a díky tomu lze konstrukci značně ztenčit a více vyplnit betonovým materiálem, což přináší požadovaný výsledek snížení hmotnosti a s tím související snížení nákladů na materiál. Pevnostní výpočty ukazují, že i ztenčená ocelová konstrukce odolává zatížení stejně nebo o zanedbatelnou míru méně než současná konstrukce.

Jako vhodná koncepční varianta ke konstrukci je vybrána varianta s označením IX (obrázek 113). Následující kapitoly se budou zabývat podrobněji detailní konstrukcí této varianty.



Obr. 113) Detail vybrané varianty IX ke konstrukci

9 KONSTRUKČNÍ NÁVRH SOUČÁSTÍ

V následujících kapitolách bude podrobněji rozebrána vybraná koncepční varianta, zejména její konstrukční řešení pro výrobu a samotná výroba.

9.1 Konstrukční zásady sendvičových konstrukcí s ocelovým pláštěm

Správná funkce sendvičových konstrukcí závisí na řadě zásad, které jsou kombinací požadavků na ocelové svařence a betonové výplně, případně proces vyplňování. Zásady ocelových svařenců jsou známy a lze je převzít z literatury i pro sendvičové konstrukce [57].

Pro sendvičové struktury platí tedy následující zásady:

- volit materiál se zaručenou svařitelností pro vnější plášť;
- minimalizace složitých tvarových prvků vnějšího pláště (maximální využití válcových trubek a obdélníkových plátů);
- využívat souměrnosti konstrukce – komponenta je symetricky zatěžována od statické i termomechanické zátěže;
- ideální pozice svarů pro jednoduché a rychlé svaření;
- nehromadit svary několika částí v jednom místě;
- vnější plášť musí být nepropustný – tvoří formu vnitřní výplně;
- není vhodné vylévat otevřené konstrukce vnějších plášťů (průřez by měl tvořit uzavřený obrazec)
- součásti musí mít připraveny otvory pro nalití;
- otvory pro nalití výplně musí být umístěny z opačné strany, než je plánována montáž vedení;
- správně zvolená směs betonové výplně – smrštitelnost, nasákavost vody, soudržnost s vnější součástí;
- u plošných zálitků musí být spodní plochy zešikmeny – eliminuje zadržování vzduchových bublin ve směsi;
- vhodně zavedený způsob odvodu vzduchových bublin při zhutňování z celé konstrukce – vyvarovat se míst s možností jejich zadržení;
- vhodně zvolit a umístit přepravní prvky;
- v sestavě dílů zavést vhodný tepelný management – nesmí docházet k místnímu tepelnému přetěžování pláště a jeho vnitřní výplně;
- majoritní zatížení přesunout z rohů součástí dále do ploch;
- správně zvolená doba a intenzita zhutňování – příliš krátká a slabá znamená velkou pórovitost betonu (nedostatečné vyloučení vzduchových bublin), příliš dlouhá a silná způsobuje odloučení plniva a pojiva, výsledný beton je nehomogenní a dochází u něj k rapidnímu snížení soudržnosti a pevnostních vlastností.

Aby konstrukce plnila dlouhodobě svoji funkci je třeba tyto požadavky při konstrukci dodržet.

9.1.1 Vazba mezi ocelovým pláštěm a betonovou výplní

Speciální zásadu při tvorbě sendvičových struktur tvoří vazba mezi ocelovým svařencem a betonovou výplní. Primární spojení vytváří chemická vazba mezi materiály. Na základě zkušeností však tato vazba vzhledem k vibracím a rozdílné roztažnosti oceli a betonu nevydrží

a vnitřní výplň se odlepí od pláště, což má za následek snížení pevnostních vlastností a zvýšený hluk.

V praxi se tomuto problému čelí několika následujícími způsoby:

- rozmístěním kotev;
- přivařením tvarových prvků do vnitřní struktury pláště;
- tryskáním vnitřních ploch ocelového pláště.

Kotvy fungují na principu tvarového zámku mezi betonovou výplní a ocelovým pláštěm (obrázek 114). Mezi kotvou a výplní také vzniká dodatečné tření, které zabraňuje uvolnění kotvy z betonového materiálu. Přivařením tvarově složitějších ocelových prvků (například ploché plechy, armovací tyče, protiběžně ohýbané plechy) vznikají v konstrukci nerovnosti, za které zatéká beton, který vytváří mechanickou vazbu zabraňující kompletní výplni v pohybu. Pro odstranění nečistot z povrchu a odhalení čistého kovu je před vylitím na vnitřní povrchy používána technologie tryskání (někdy zvaná také pískování), která pomáhá udržet vazbu ocel-beton.



Obr. 114) Pohled na vnitřní prostory součástí určené k vyplnění [53]

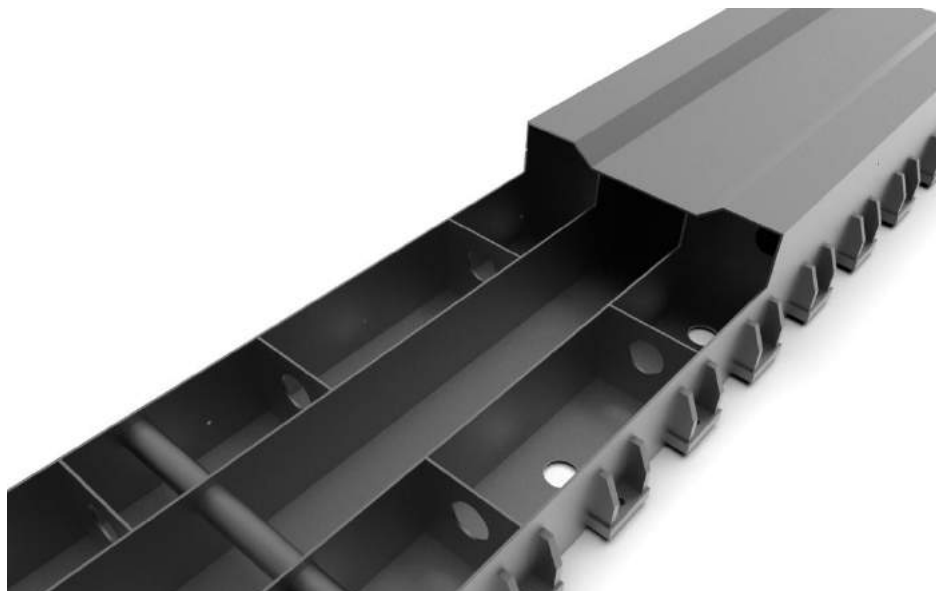
9.2 Konstrukční návrh součástí

Konstrukční návrhy sendvičových součástí, které jsou tématem této práce, se skládají z následujících prvků:

- vnější pláště s vnitřním žebrováním;
- betonová výplň;
- kryty výplně;
- lineární vedení;
- stavitelné podložky;
- vazební a transportní prvky;
- uložení kuličkových šroubů;
- vedení elektroinstalace a hydraulických nebo pneumatických vedení;
- odměřovací pravítka.

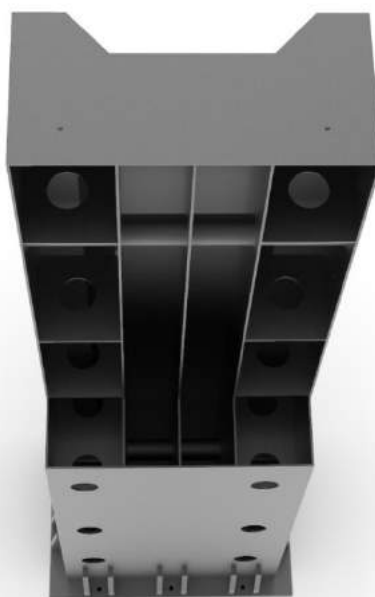
9.2.1 Vnější ocelové pláště

Základ konstrukce tvoří modely z kapitoly 6.2.10. Základní konstrukce pláště lože podélného i příčného a také stojanu je přizpůsobena podmínkám výroby a k vnitřním prostorům vyplňovaným betonem jsou přidány tvarové prvky pro zatečení betonu (obrázek 115). Podélná žebra jsou přesunuta blíže k sobě, aby se na hranách s horní deskou vytvořil dostatek prostoru pro svary. Horní částí loží a stojanu jsou vedeny prohlubně, které umožňují montáž ložiskových pouzder a umístění kuličkového šroubu, které na rovnou plochu není možné.



Obr. 115) Podélné lože po úpravách

Vzhledem k nutné podmínce vylévat prostory pod zatěžovanými plochami jako první, je nutná úprava stojanu. Pro konstrukci byla zacelena horní plocha a vytvořeny otvory pro nalévání na opačné straně než je vedení (obrázek 116).



Obr. 116) Stojan po úpravách

9.2.2 Vazební a transportní prvky – stojan a lože

Veškeré vazební a transportní prvky použité na konstrukci musí zajistit bezpečnou vazbu pláště a betonu, popřípadě bezpečný transport součástí. Zároveň však musí být redukován počet druhů prvků na minimum z důvodu výroby a nákladů na pořízení těchto prvků.

Pro zajištění vazby mezi pláštěm a výplní jsou zvoleny kotvy se závitem a krátkým vlnitým kruhovým profilem z produkce společnosti Friedrich Schroeder s označením 14×180 (obrázek 117). U všech součástí je pro správnou funkčnost tohoto typu kotev esenciální, aby byly vzdáleny minimálně 180 mm od všech hran/ploch součástí. Kotvy s vlnitým kruhovým profilem jsou standardně využívány jako transportní, v tomto případě jsou však použity jako vazební prvky z důvodů vysoké únosnosti (zajištění dostatečné vazby mezi pláštěm a výplní), snadné dostupnosti (existuje již řada výrobců) a snadné montáže. Ta je provedena pomocí šroubového spoje za vnější plášť [47].



Obr. 117) Transportní a vazební prvky aplikované na všechny součásti

K transportu obou loží a stojanu slouží duté tyče přivařené ke vnějšímu plášti. Při přepravě se tímto prvkem ze strany součásti protáhne dlouhá tyč, která je uchycena na přepravním jeřábu (obrázek 117). Tento princip je použit i na výchozí litinové variantě rámu.

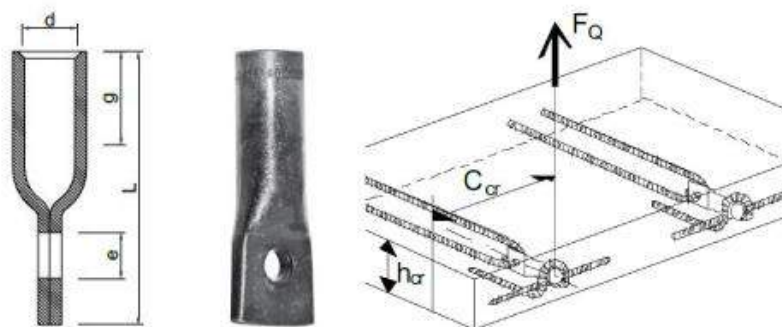
9.2.3 Vazební a transportní prvky - saně

U saní tento princip vzhledem k prostorovým omezením není možné aplikovat. Vazba mezi saněmi a stojanem u příčné sestavy, a mezi saněmi a ložiskem s ozubeným věncem u podélné sestavy, je realizována závitovými kotvami s plochými deskami z produkce společnosti Friedrich Schroeder s označením 24×54 (obrázek 118 – horní strana saní). Minimální vzdálenost od ostatních prvků konstrukce je stanovena výrobcem na 40 mm. Rozmístění vazebních kotev společně s transportními kotvami a tvarovými prvky zajistí dostatečnou vazbu mezi betonovou výplní a ocelovým pláštěm [47].



Obr. 118) Vazební kotvy aplikované na saních

Transport těmito kotvami nelze vzhledem k směru působící síly (obrázek 118 a 119) realizovat. Z tohoto důvodu byly pro transport vybrány závitové kotvy s lisovaným koncem spojený s armovacími tyčemi. Tento prvek zajistí vhodné rozložení zatížení do betonové výplně. Velikostně je zvolena kotva s označením 16×79 a minimální vzdáleností od ostatních konstrukčních částí 40 mm [47].



Obr. 119) Transportní kotvy pro saně

U všech kotevních a vazebních prvků byl při dimenzování brán v potaz i způsob jejich zatěžování a s tím související nosnost těchto prvků. Všechny prvky jsou navrženy s dostatečnou bezpečností, aby nedošlo k jejich porušení, případně porušení betonové výplně.

9.2.4 Kryty výplně

Betonový materiál Durfill uvnitř plášťů musí být krytý před vlivy vnějšího prostředí. Jedná se zejména o vlhkost, která nepříznivě ovlivňuje vlastnosti betonového materiálu. Absorpce vody do betonu pak může způsobovat snižování pevnosti a soudržnosti výplně. Nálitkové otvory jsou u všech součástí zakryty lepenými plastovými krytkami, aby bylo zabráněno kontaktu vody s vnitřní betonovou výplní (obrázek 120).

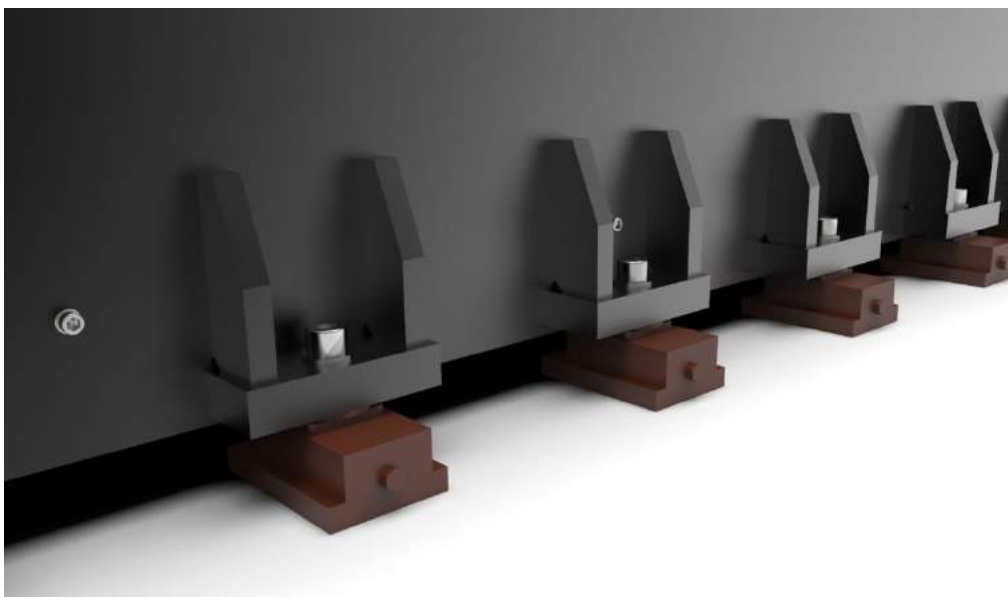


Obr. 120) Plastové kryty nálitkových otvorů

Další variantou krytí povrchů betonové výplně jsou hydrofobní nátěry, například na epoxidové bázi. Tyto nátěry mohou být levnější a jednodušší k výrobě a aplikaci. Problémové je jejich využití u sendvičových konstrukcí, kdy mohou po určité době popraskat a stát se nefunkčními.

9.2.5 Stavitelné podložky

Pro ustavení stroje jsou vybrány stavitelné podložky z produkce společnosti BWF Fixatorenbau Bertuch, konkrétně se jedná o řadu RK (obrázek 121). Na podložkách často může záviset tuhost celého rámu, proto je dobré při dimenzování uvažovat nejhorší možný stav s určitou rezervou tak, aby byly vybrány dostatečně tuhé podložky. S přihlédnutím k ostatním připojeným součástem a zatěžujícím silám jsou pro obě lože předběžně voleny podložky RKIII s tuhostí $8000 \text{ N} \cdot \mu\text{m}^{-1}$ a minimální nosností podložky 40 kN. Podélná sestava obsahuje dohromady 22 podložek na obou stranách lože, k příčnému loži je pak přimontováno celkem 14 podložek. Únosnost je vzhledem k zatížení na obou sestavách dostatečná.



Obr. 121) Stavitelné podložky BWF RKIII

9.2.6 Lineární vedení

Lineární vedení realizuje pohyb saní po ložích. Na těchto součástech, stejně jako na stavitelných podložkách, značně závisí tuhost celého rámu. Vzhledem k požadavku na nízkou dynamiku pohonu a bezpečnou funkci jsou ke konstrukci vybrána lineární vedení realizovaná pomocí vozíků s válečkovitými valivými elementy s označením RGW z produkce společnosti HIWIN. Tato vedení zajišťují vyšší únosnost za současné nižší schopnosti dynamického pohybu než kuličková provedení. Pro výpočet statické únosnosti vedení je využito firemní literatury HIWIN. Pro každé saně jsou využity 4 vozíky z dané řady [58].

9.2.7 Lineární vedení – podélná sestava

Základní hodnoty zatížení vedení na podélné sestavě vyplývají z kapitoly 7.1.3:

$$F_{g_pod} = (m_{obr} + m_{dslov}) \cdot g = 220725 \text{ (N)} \quad (15)$$

$$M_{k_pod_X} = F_{C_X} \cdot r_{pod_X} = 2000 \cdot 2,5 \text{ (Nm)} = 5000 \text{ (Nm)} \quad (16)$$

$$M_{k_pod_Y} = F_{C_Y} \cdot r_{pod_Y} = 7000 \cdot 1,0 \text{ (Nm)} = 7000 \text{ (Nm)} \quad (17)$$

$$M_{k_pod_Z} = F_{C_Z} \cdot r_{pod_Z} = 20000 \cdot 1,5 \text{ (Nm)} = 30000 \text{ (Nm)} \quad (18)$$

Na základě těchto hodnot je z katalogu vybrán vozík s označením RGW_65HC (obrázek 122), který je podroben dalšímu výpočtu. Vozík má při předeprnutí maximální tuhost $3178 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-1}$.

Zátěž od hmotností působící na vozíky příčné sestavy

$$W_{pod} = F_{g_pod} + m_{pod_sani} \cdot g = 220725 + 1400 \cdot 9,81 \text{ (N)} = 234459 \text{ (N)} \quad (19)$$

Pohybová a jiné síly

$$F_{poh_pod} = F_{C_Y} = 7000 \text{ (N)} \quad (20)$$

Vzdálenosti a_{pod} , b_{pod} , c_{pod} , d_{pod} (hodnoty odečteny z modelů, popis viz příloha 7)

$$a_{pod} = 0 \text{ (mm)} \quad (21)$$

$$b_{pod} = 1000 \text{ (mm)} \quad (22)$$

$$c_{pod} = 950 \text{ (mm)} \quad (23)$$

$$d_{pod} = 805 \text{ (mm)} \quad (24)$$

Ekvivalentní zatížení jednoho vozíku P

$$P_{pod} = \frac{W_{pod}}{4} + \frac{F_{poh_pod}}{4} + \frac{F_{poh_pod} \cdot a_{pod}}{2 \cdot c_{pod}} + \frac{F_{poh_pod} \cdot b_{pod}}{2 \cdot d_{pod}} = 60800 \text{ (N)} \quad (25)$$

kde W_{pod} je hmotnost zátěže, F_{poh_pod} pohybová a jiné síly, a_{pod} , b_{pod} vzdálenosti působitě sil od těžiště, c_{pod} rozteč kolejníc, d_{pod} rozteč vozíků.

Statická konstrukční bezpečnost

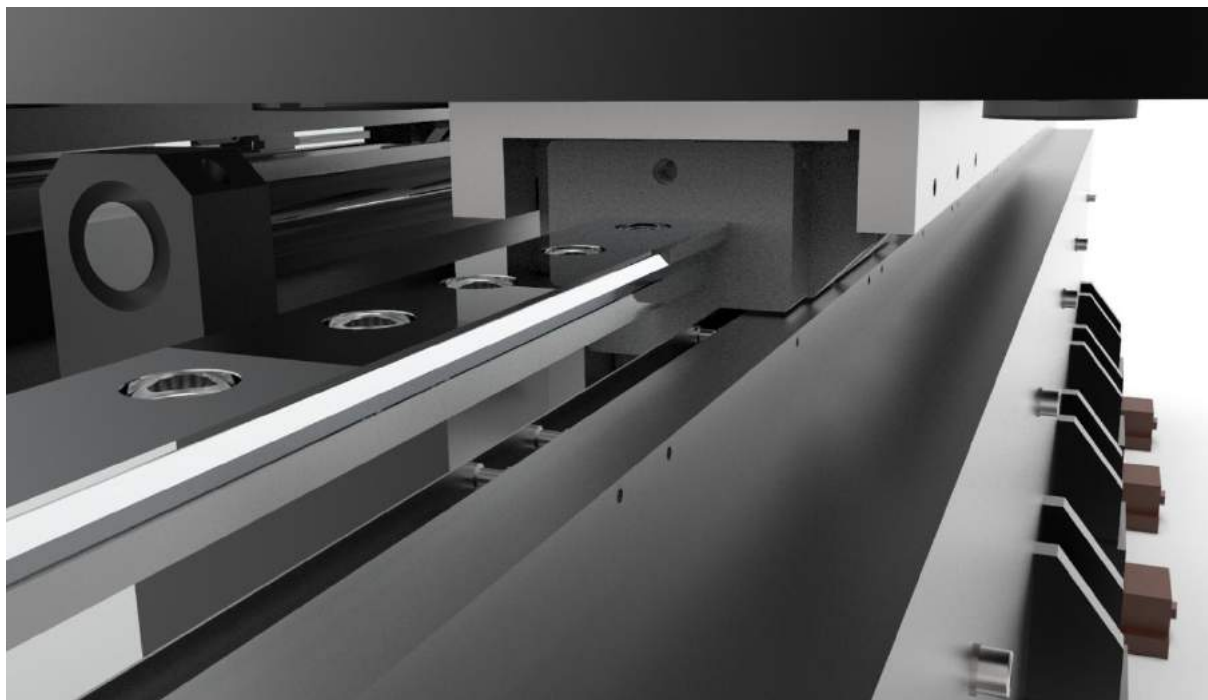
$$f_{SL_pod} = \frac{C_0}{P_{pod}} = \frac{572700}{60800} = 9,4 \quad (26)$$

$$f_{SM_pod} = \frac{M_0}{M_{pod}} = \frac{M_0}{\frac{M_{k_pod_Z}}{2}} = \frac{22170}{17500} = 1,27 \quad (27)$$

Jmenovitá životnost vedení

$$L_{pod} = \left(\frac{C_{dyn}}{P_{pod}}\right)^{10/3} \cdot 100 = 15358 \text{ (km)} \quad (28)$$

Hodnota přípustné statické bezpečnosti při normálním zatížení (bez rázů a vibrací) se pohybuje v rozmezí 1,25 až 3,00. Tato hodnota je dodržena.



Obr. 122) Vedení HIWIN RGW_65HC

9.2.8 Lineární vedení – příčná sestava

Základní hodnoty zatížení vedení na příčné sestavě vyplývají z kapitoly 7.1.3:

$$F_{g_pric} = (m_{sv} + m_v) \cdot g = 49050 \text{ (N)} \quad (29)$$

$$M_{k_pric_X} = F_{C_X} \cdot r_{pric_X} = 2000 \cdot 0,3 \text{ (Nm)} = 600 \text{ (Nm)} \quad (30)$$

$$M_{k_pric_Y} = F_{C_Y} \cdot r_{pric_Y} = 7000 \cdot 0,8 \text{ (Nm)} = 5600 \text{ (Nm)} \quad (31)$$

$$M_{k_pric_Z} = F_{C_Z} \cdot r_{pric_Z} = 20000 \cdot 0,2 \text{ (Nm)} = 4000 \text{ (Nm)} \quad (32)$$

Na základě těchto hodnot je z katalogu vybrán vozík s označením RGW_65HC (obrázek 122), který je podroben dalšímu výpočtu. Vozík má při předepnutí maximální tuhost $3178 \text{ N} \cdot \mu\text{m}^{-1}$. Identický typ je použitý na podélné sestavě.

Zátěž od hmotností působící na vozíky příčné sestavy

$$\begin{aligned} W_{pric} &= F_{g_pric} + (m_{stojan} + m_{pric_sani}) \cdot g = \\ &= 49050 + (7565 + 1087) \cdot 9,81 \text{ (N)} = 133926 \text{ (N)} \end{aligned} \quad (33)$$

Pohybová a jiné síly

$$F_{poh_pric} = F_{C_Y} = 7000 \text{ (N)} \quad (34)$$

Vzdálenosti a_{pric} , b_{pric} , c_{pric} , d_{pric} (hodnoty odečteny z modelů, popis viz příloha 7)

$$a_{pric} = 200 \text{ (mm)} \quad (35)$$

$$b_{pric} = 800 \text{ (mm)} \quad (36)$$

$$c_{pric} = 900 \text{ (mm)} \quad (37)$$

$$d_{pric} = 905 \text{ (mm)} \quad (38)$$

Ekvivalentní zatížení jednoho vozíku P

$$P_{pric} = \frac{W_{pric}}{4} + \frac{F_{poh_pric}}{4} + \frac{F_{poh_pric} \cdot a_{pric}}{2 \cdot c_{pric}} + \frac{F_{poh_pric} \cdot b_{pric}}{2 \cdot d_{pric}} = 39103 (N) \quad (39)$$

kde W_{pric} hmotnost zátěže, F_{poh_pric} pohybová a jiné síly, a_{pric} , b_{pric} vzdálenosti působíště sil od těžiště, c_{pric} rozteč kolejnic, d_{pric} rozteč vozíků.

Statická konstrukční bezpečnost

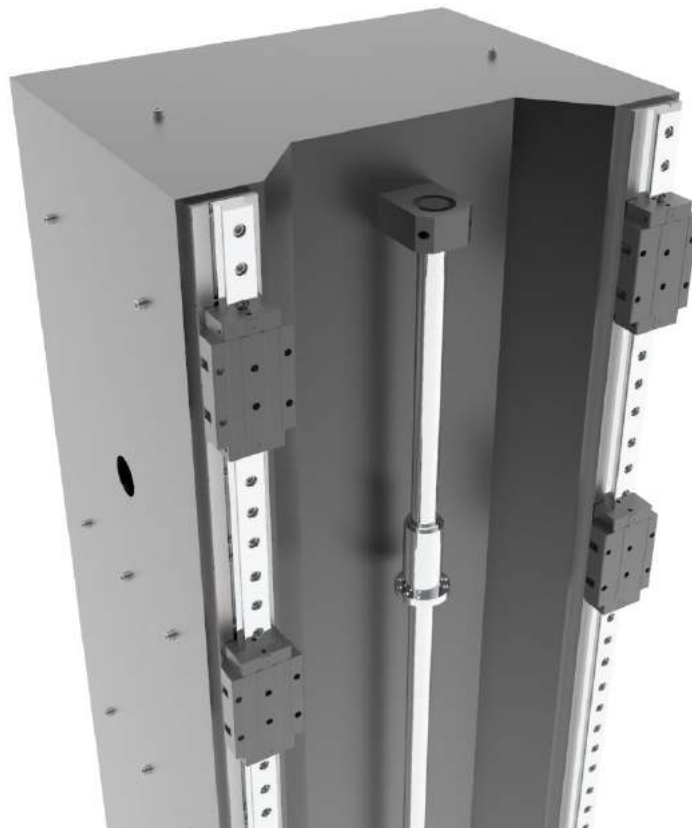
$$f_{SL_pric} = \frac{C_0}{P_{pric}} = \frac{572700}{39103} = 14,7 \quad (40)$$

$$f_{SM_pric} = \frac{M_0}{M_{pric}} = \frac{M_0}{\frac{M_{k_pric_Y}}{2}} = \frac{22170}{2800} = 7,9 \quad (41)$$

Jmenovitá životnost vedení

$$L_{pric} = \left(\frac{C_{dyn}}{P_{pric}}\right)^{10/3} \cdot 100 = 66884 (km) \quad (42)$$

Vozíky jsou u příčné sestavy předdimenzovány, nicméně hmotnost sestavy se ještě v průběhu realizace bude měnit, s čímž se bude měnit také zatížení působící na vedení. Pro potřeby detailního výpočtu také nejsou k dispozici potřebná data vřeteníku, saní vřeteníku a dalších navazujících součástí. V rámci těchto nedostatků a faktu, že je z výrobního i ekonomického hlediska výhodnější mít pro obě sestavy stejný typ vedení, je model RGW_65HC použit pro oba typy sestav. Pro vedení saní vřeteníku a vřeteníku je využit také model RGW_65HC z výše zmíněných důvodů (obrázek 123).



Obr. 123) Vedení RGW_65HC na stojanu

9.2.9 Lineární vedení - montáž

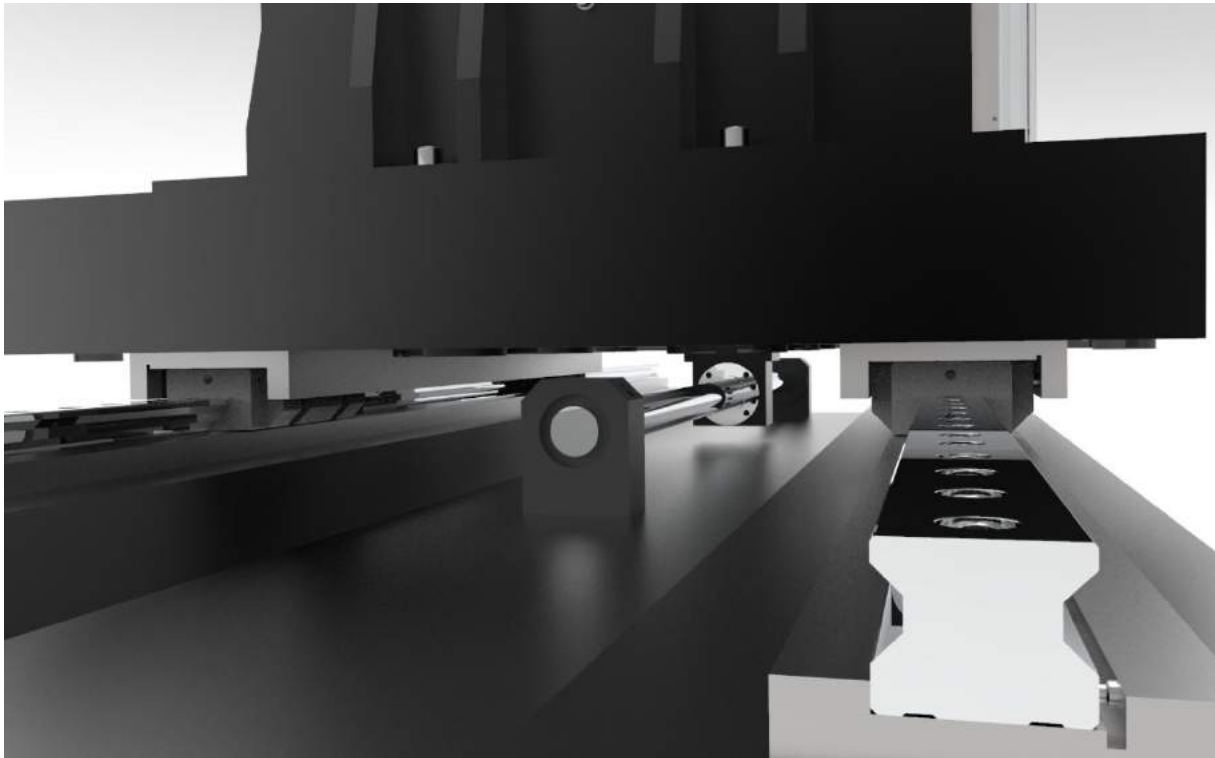
Montáž vedení na oba typy sestav je provedena skrze broušené lišty s referenčními hranami, které budou přivařeny k ložím a saním. Postup montáže je následovný:

- plochy na lištách připojených k ložím a saním, které jsou určeny k montáži, se nejprve očistí;
- následně se přiloží a přitlačí kolejnice vedení k referenční hraně;
- přitáhnutí šroubů M14 na kolejnici;
- na opačné straně se jeden po druhém přitáhnou přitlačné šrouby M8, které přitlačují kolejnici k referenční hraně.

Montáž lineárních vozíků probíhá obdobným způsobem.

9.2.10 Uložení kuličkových šroubů

Vzhledem k vysoké závislosti na ostatních konstrukčních skupinách bude technologie kuličkových šroubů a jejich uložení v rámu podrobněji řešena až při realizaci stroje. Do sestav jsou zavedeny pouze hrubé modely kuličkových šroubů a matic (obrázek 123 a 124).



Obr. 124) Uložení kuličkového šroubu a matice

9.2.11 Vedení elektroinstalace a pneumatických/hydraulických vedení

Vedení elektroinstalace, popřípadě hydraulických a pneumatických prvků je u loží umožněno otvory v předních a zadních stěnách (obrázek 125). U ostatních dílů je třeba vyřešit problematiku vedení separátně při kompletním návrhu stroje. Sendvičové struktury umožňují v případě potřeby navrhnout a zavést do konstrukce PVC potrubí. Skrze toto potrubí systémy mohou být dále vedeny všechny prvky elektroinstalace a zmiňovaných pneumatických či hydraulických vedení.



Obr. 125) Otvory pro vedení

9.2.12 Umístění vibračních motorů

Pro dosažení optimálních vlastností (zejména pevnostních) betonové výplně uvnitř součástí je vhodné směs během vytvrzování podrobit procesu zhutňování. Prakticky jde o „setřásání“ směsi, aby bylo dosaženo snížení pórovitosti betonu. Tohoto „setřásání“ lze dosáhnout mimo jiné například vibrováním pomocí vibračních motorů. Důležité je při tomto procesu dosáhnout co nejstálějšího kmitání v celém průřezu materiálu. S rostoucím objemem hmoty dochází k útlumu vibrační energie. Vibrační techniky pro zhutňování již existuje ve stavebnictví celá řada. Tyto produkty lze využít i při aplikaci sendvičových struktur ve stavbě obráběcích strojů. Jedná se o následující technické prostředky:

- ponorná vibrační technika (obrázek 126);
- povrchová nebo nepřímá vibrační technika;
- vibrační soustavy (vibrační stolice, jádra a štíty).

Pro aplikaci je vybrán velmi rozšířený způsob – ponorné vibrační techniky. Tento způsob je vhodný zejména kvůli jeho příznivým pořizovacím nákladům a jednoduché obsluze. Na konstrukci součástí nejsou kladeny kvůli připojení motorů speciální požadavky. Směs betonu má na počátku tuhnutí tekutou konzistenci, díky které lze hlavice vibrátorů zasunout do konstrukčních součástí skrze náliťkové otvory.



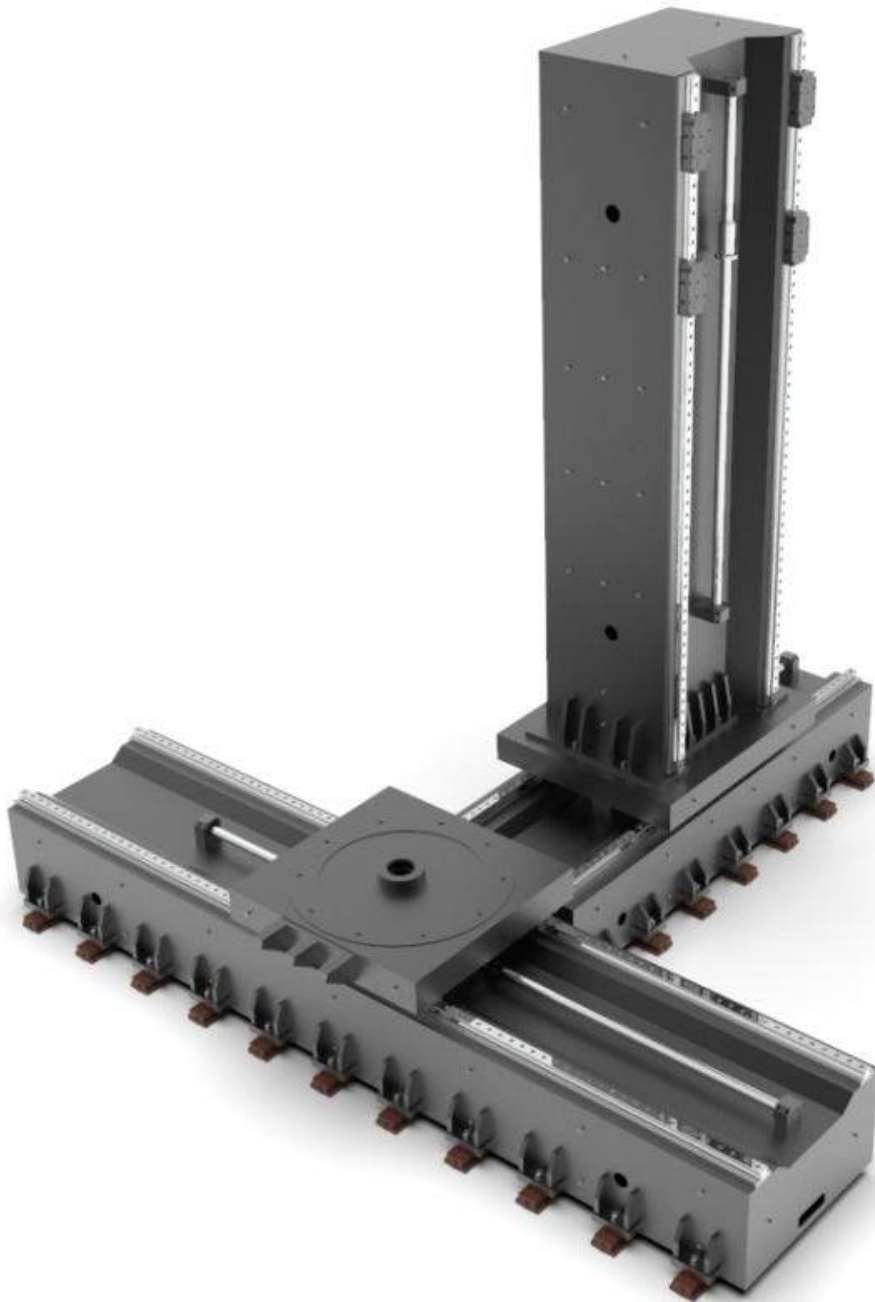
Obr. 126) Příklad vysokofrekvenčního ponorného vibrátoru [59]

9.2.13 Krytování a odměřování

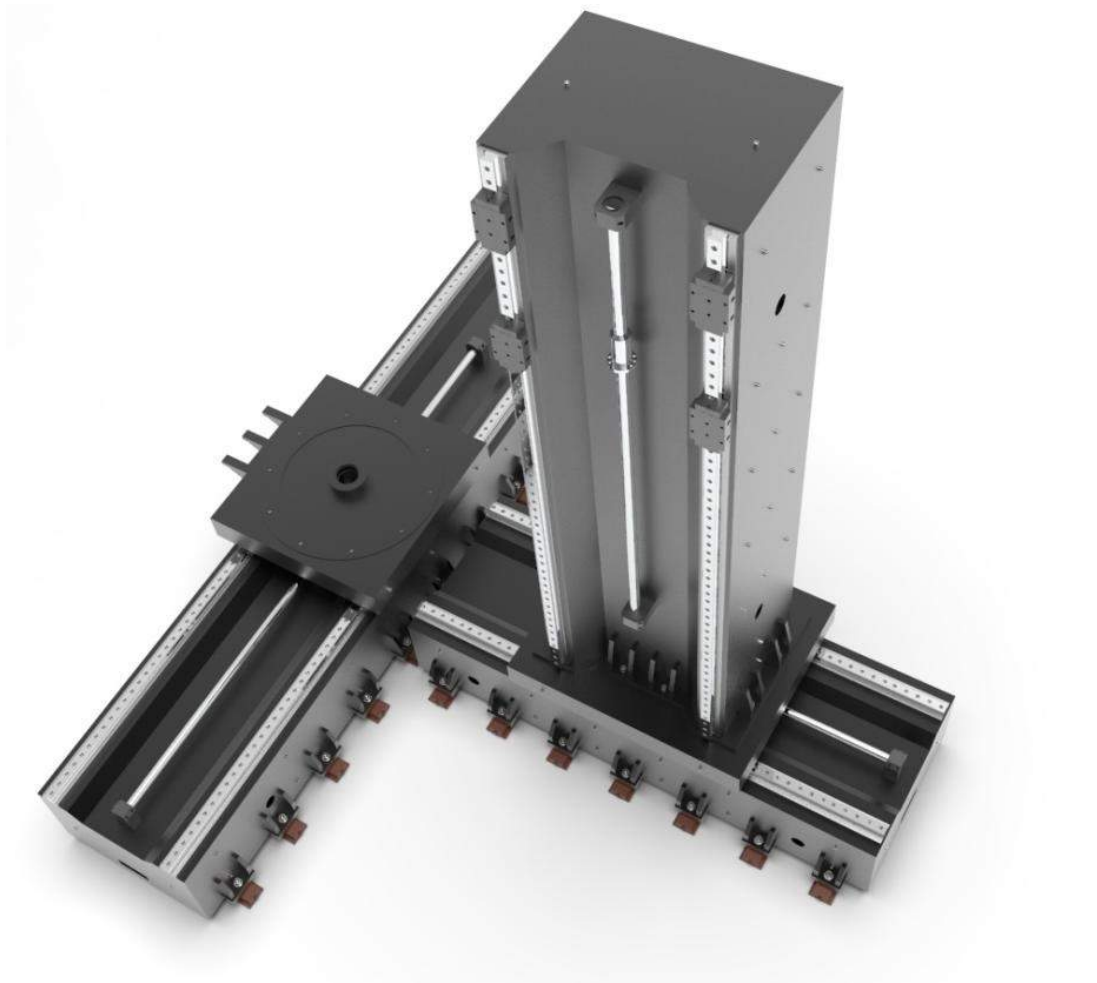
Z dalších skupin, které je třeba v souvislosti s rámovou konstrukcí vyřešit jsou krytování a odměřování. Obě jsou ale opět velmi závislé na konečné podobě celého stroje a provedení a uspořádání jednotlivých navazujících součástí. Z tohoto důvodu není v práci podrobněji řešena jejich problematika.

9.2.14 Celková navržená sestava

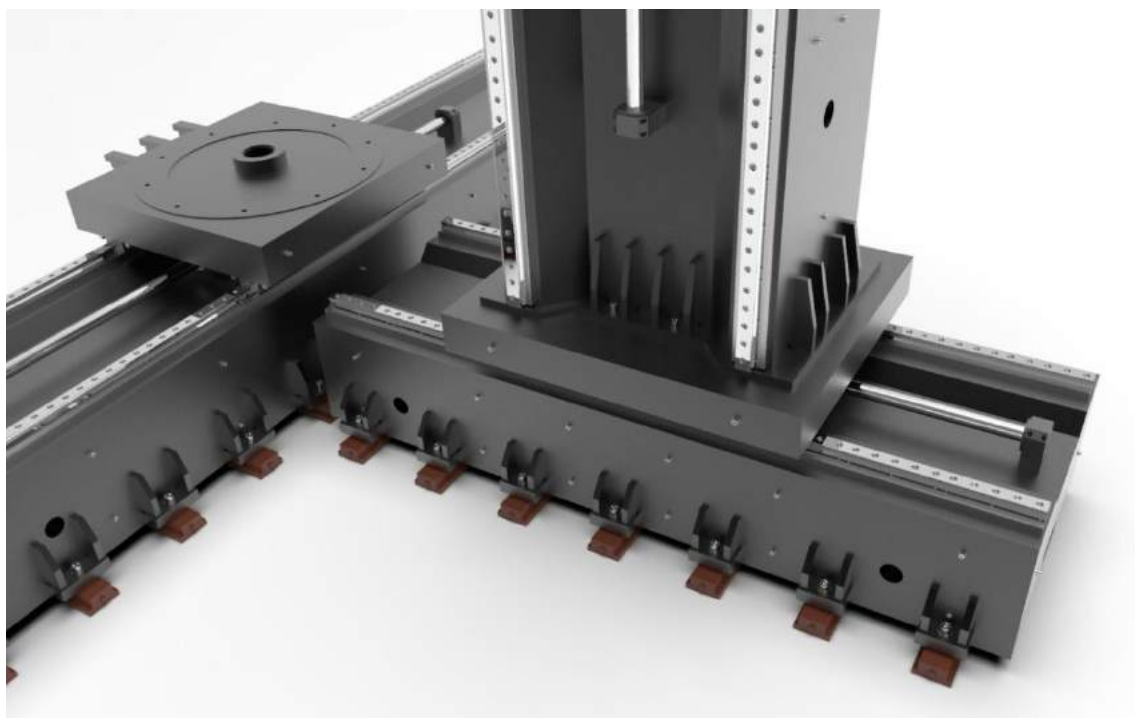
Na obrázcích 127 až 129 jsou pohledy na celkovou navrženou sestavu rámu stroje WFT 13 CNC s aplikovanými sendvičovými materiály. Navržená struktura bez dodatečných součástí (šrouby, vedení, atd.) váží celkem 23 206 kg, z toho podélná sestava 9479 kg a příčná sestava 13727 kg. Původní sestava vážila 27 221 kg (podélná sestava 11123 kg a příčná 16098 kg)



Obr. 127) Celková sendvičová sestava rámu stroje WFT 13 CNC – přední pohled



Obr. 128) Celková sendvičová sestava rámu stroje WFT 13 CNC – horní pohled



Obr. 129) Celková sendvičová sestava rámu stroje WFT 13 CNC - detail

9.3 Výroba dílů

Tato kapitola přiblíží výrobu sendvičových dílů společně s některými zásadami, které je při výrobě těchto struktur vhodné dodržovat.

9.3.1 Výroba ocelových svařenců

Výroba ocelových svařenců probíhá standardním způsobem:

- svaření vnějších desek s výjimkou spodní;
- svaření vnitřních tvarových prvků (žeber);
- montáž kotev;
- přivaření spodní desky ke konstrukci.

Před přivařením spodních desek a tedy zkompletování svařenců je třeba dbát důraz na kontrolu vnitřních částí – správné svaření a počet tvarových prvků („žeber“), dostatečné utažení a správný počet kotvicích prvků. Výsledná svařená součást musí být před obráběním žihána pro odstranění vnitřního pnutí.

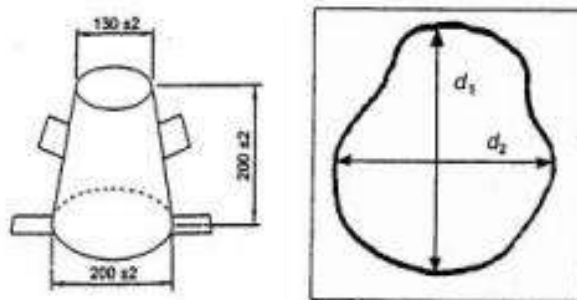
9.3.2 Aplikace betonu

Aplikace probíhá v následující posloupnosti:

- výroba betonové směsi (mísení komponent);
- test konzistence směsi zkouškou rozlití;
- umístění svařenců nálitkovými otvory vzhůru;
- vylití přibližně poloviny součásti;
- zhutnění;
- vylití druhé poloviny součásti;
- přivaření spodní desky ke konstrukci.

Pro ideální výslednou směs je vhodné nejprve využít suchého míchání (suchých částí směsi) po dobu minimálně 4 minut v závislosti na velikosti výrobní dávky a následně dostatečně promíchat tuto směs s vodou ve vhodném poměru.

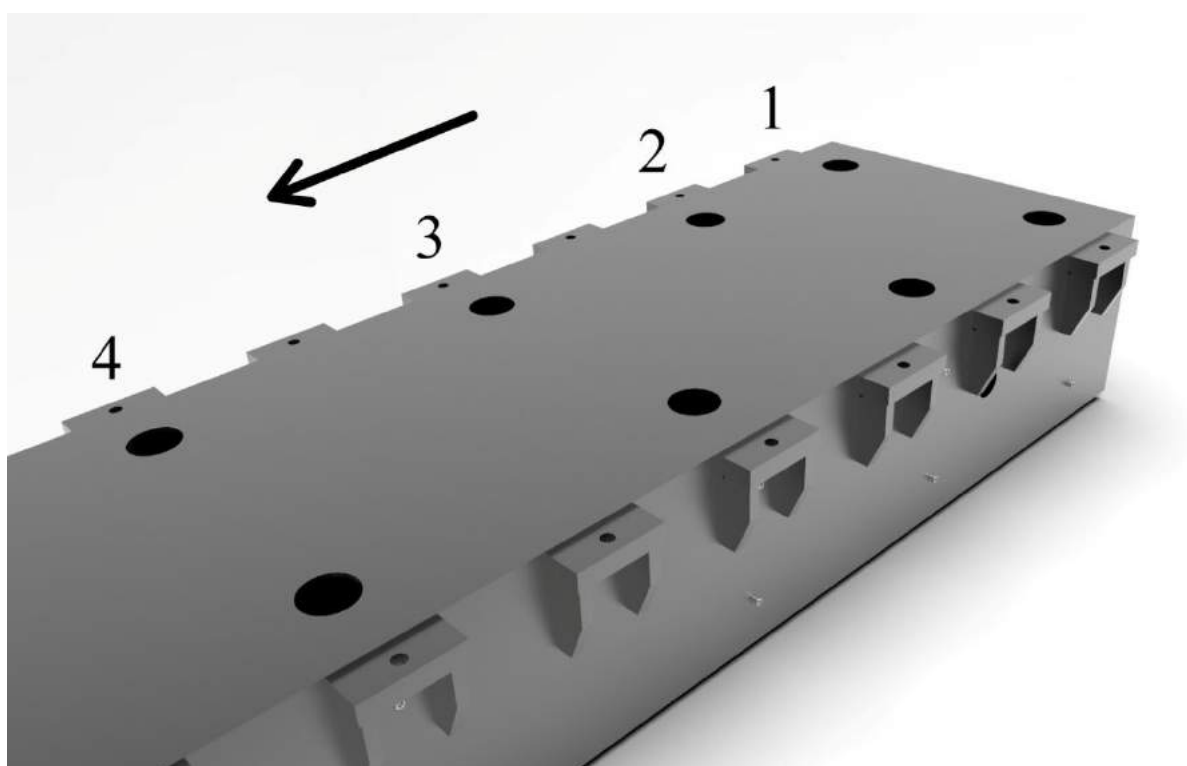
Před samotným začátkem vylévání konstrukce je proveden test konzistence směsi zkouška rozlití kužele dle ČSN EN 12350-5 (obrázek 130). Během zkoušky je směs vyplněna kuželová forma s otevřeným čelem, která je přitlačena na vodorovném povrchu. Po nadzdvihnutí formy se betonová směs rozlije po podkladu. Na základě rozměrů rozlitého obrazce se stanovuje dle ČSN EN 206+A1 konzistence směsi (obrázek 130). Pro podrobnější informace o namíchané směsi lze provést zkoušky chemického složení pomocí rozboru.



Obr. 130) Zkouška konzistence betonu rozlitím – forma a rozlití [60]

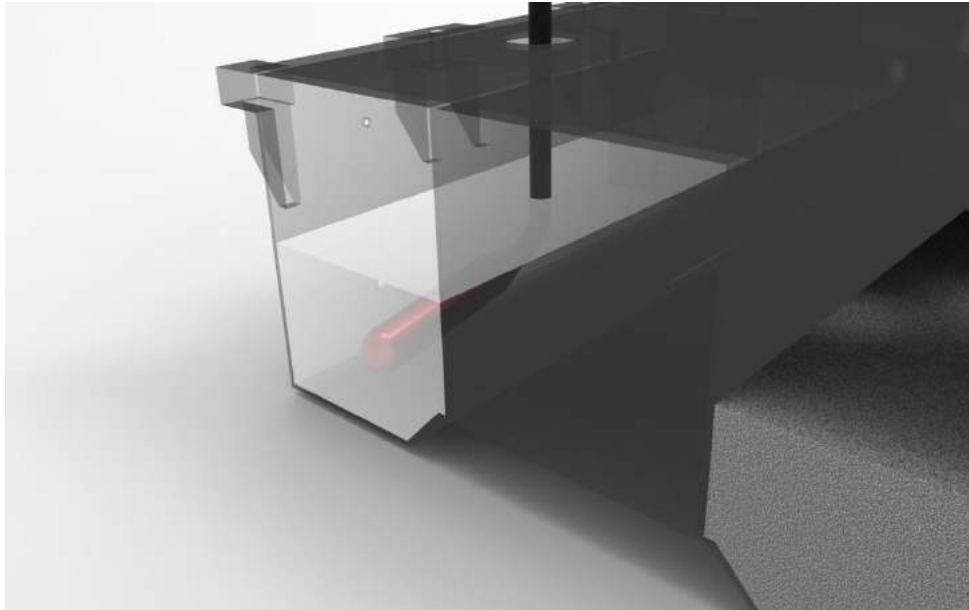
Pro správnou funkci konstrukce je důležité mít součásti otočené nálitkovými otvory směrem nahoru (obrázek 131), aby byla zajištěna co nejlepší soudržnost betonu a svařence pod vedením, případně pod kotvami držícími další součásti (desku stolu, stojan a vřeteník atd.).

Vylévání je doporučeno začít od krajních nálitkových otvorů a postupovat směrem k prostředním – od 1. ke 4. otvoru (obrázek 131). V této fázi je esenciální využití všech nálitkových otvorů, jelikož vnitřní struktura navržených součástí může v určitém případě i přes vytvořené otvory ve tvarových prvcích zabraňovat přelévání směsi betonu z jednoho okna do druhého. Vylévání je vhodné v polovině naplnění součásti zastavit, směs ztuhnout a pokračovat dále ve vylévání. Tímto způsobem je dosaženo konzistentních vlastností v celém objemu betonové výplně. Pro vyplňování jsou využívány otvory o průměru 130 mm, otvory o průměru 50 mm nacházející se na obou saních slouží pouze pro odvětrávání ztuhované směsi.



Obr. 131) Postup odlévání řad nálitkových otvorů a umístění součásti otvory vzhůru

Ztuhnutí je prováděno ponorným vibračním zařízením. Hlavice je postupně vsunuta ideálně pod úhlem 10° do všech nálitkových otvorů (obrázek 132). Zde je třeba klást důraz na to, aby se hlavice nedotýkala ocelového svařence, neboť svými vibracemi může negativně ovlivnit strukturu součásti (zejména svary), ale také samotný přístroj se může poškodit. Proces vylévání a ztuhování může být vykonáván i dvěma pracovníky naráz, z nichž jeden strukturu vylévá a druhý za ním v příslušném nálitkovém otvoru směs ztuhuje.



Obr. 132) Proces zhutňování

Správné zhutnění směsi se pozná dle následujících bodů:

- beton se již více v součásti neusazuje;
- ze směsi nevystupují vzduchové bubliny;
- zvuk ponořené hlavice vibračního zařízení se již nemění.

Po kompletním naplnění a zhutnění vnitřních prostor součásti je vhodné nálitkové otvory přikrýt volně položeným plátnem. V průběhu vytvrzování tak může probíhat reakce mezi cementem a vodou a zároveň je zabráněno vnikání vody z vnějšího prostředí do výplně.

Po dokončení vylévání vyráběných součástí jsou ze směsi vytvořeny zkušební vzorky v podobě betonových válců nebo kvádrů, na nichž lze provést potřebné testy kontroly kvality. Transport hotových součástí je možný s jistou mírou opatrnosti již po 1 dni vytvrzování. Finálních vlastností pak betonová směs dosáhne po 28 dnech od vylití.

9.4 Komentář k výkresové dokumentaci

K výslednému návrhu nosné struktury stroje WFT 13 CNC je zhotovena výkresová dokumentace v podobě:

- výkresu sestavení celé kompletní sestavy;
- výkresu sestavení podélné sestavy;
- výkresu sestavení příčné sestavy;
- výkresu svařence příčných saní;
- příslušných kusovníků.

Výkresová dokumentace je přiložena v příloze 1.

10 EKONOMICKO-TECHNICKÉ ZHODNOCENÍ

Ekonomická stránka výroby dílů z netradičních materiálů je jednou z těch, které nutí výrobce tyto materiály zavádět do svého portfolia. Platí zde rovnice úspěšná spolčenost je štíhlá společnost. Tuto štíhlost lze hledat ve všech procesech společnosti a nejínan je tomu u konstrukčního oddělení. Na konstrukci stroje lze výrazně ušetřit díky novým přístupům, mezi něž patří i změna stávajícího konstrukčního materiálu a s ní spojené změny celého výrobního procesu rámu.

Výsledné náklady na výrobu nosné soustavy se skládají z následujících celků:

- náklady na materiál;
- náklady na dodatečné prvky konstrukce;
- náklady spojené s výrobní technologií a jejím příslušenstvím;
- náklady na opracování;
- náklady na montáž;
- náklady na vývoj.

Náklady na materiál

Kalkulaci nákladů na použitý materiál nosné soustavy stroje WFT 13 CNC lze provést pomocí odhadů cen materiálu na základě tabulky 8. U cen je pro kalkulaci volena střední hodnota. Kalkulace je provedena v tabulce 32.

Tab 32) Kalkulace odhadovaných nákladů na materiály konstrukcí

Součást	Současné řešení	Sendvičové řešení	
	WFT 13 CNC (€)	WFT 13-B CNC (€)	
	Plášť	Plášť	Výplň
Lože podélné (€)	8883	4005	3165
Saně podélné (€)	2240	828	433
Lože příčné (€)	5613	2327	1647
Saně příčné (€)	2306	657	458
Stojan (€)	8179	4077	3082
Celkem skupina (€)	27221	11894	8784
Celkem (€)	27221	20678	

Náklady na dodatečné prvky konstrukce

Do kalkulace nákladů vstupují i prvky, které jsou pro funkčnost nové konstrukce nezbytné, zároveň se však neobjevují v předchozím řešení. U sendvičových struktur se jedná především o armovací tyče nebo kotvy, které jsou dodávány většinou dodavatelským způsobem. Cenové kalkulace těchto prvků nejsou volně dostupné.

Náklady na výrobní technologii a její příslušenství

Základní využívané výrobní technologie jsou odlévání a svařování. V případě sendvičových struktur se tyto technologie kombinují. Neodlévá se však litina, ale betonový materiál.

Při výrobě odlitků jsou využívány buď kovové, nebo dřevěné formy (v závislosti na počtu vyráběných kusů v sérii). Ceny těchto forem se pohybují v řádech desítek až stovek tisíc eur, které je třeba brát v potaz při výsledné kalkulaci.

Výroba svařenců obnáší náklady na potřebné svařovací vybavení a proškolenou obsluhu (v případě vlastní výroby), které jsou ale v porovnání s náklady na odlitky několikanásobně nižší. Pracnost svařovaných konstrukcí je však větší a tak je třeba zvážit, která strana nákladů převáží.

Dodatečné příslušenství potřebné k výrobě sendvičových konstrukcí tvoří vibrační zařízení, míchačky betonu a případně licí pánve. Zde však záleží, jaký způsob bude společností zvolen – vlastní nebo dodavatelský. V případě dodavatelského výrobci nabízejí dodání sil s plnicí aparaturou.

Náklady na opracování a montáž

Zde se započítávají náklady na dodatečné úpravy součástí. U opracování se jedná zejména o obrábění a opracování stykových ploch (broušení nebo zaškrabávání). Náklady na montáž jsou u různých typů materiálů a kombinací velmi podobné.

10.1 Shrnutí ekonomicko-technického zhodnocení

Na základě předchozích odstavců je patrné, že ekonomicko-technické zhodnocení je komplexní disciplína a proto jednoznačné tvrzení, že konstrukce je či není výhodnější je značně složité a bez detailnějšího konstrukčního návrhu ani není možné. Jsou zde představeny některé z nákladů, které přímo souvisí s výrobou. Kompletaci rámu a celého stroje však také ovlivňují další náklady jako například náklady na nakupované komponenty, náklady na vývoj (vývojové vzorky atd.), správní a odbytové režie a další.

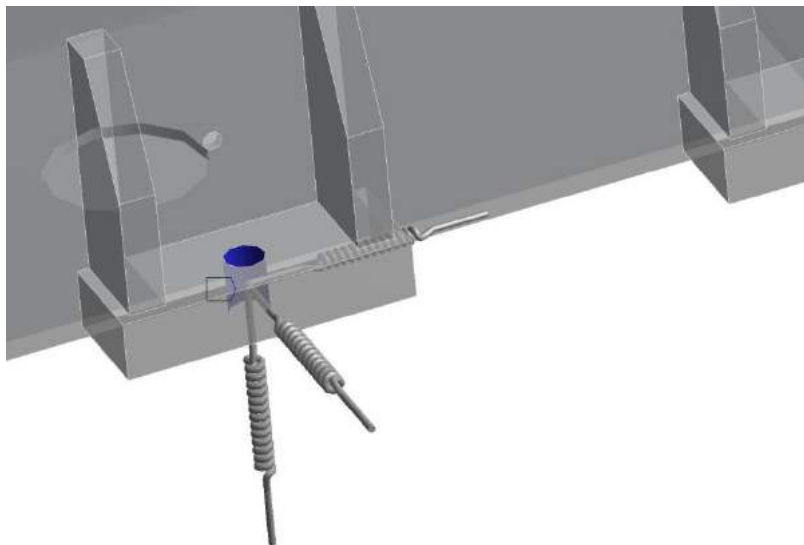
Pokud by rozhodnutí mělo vzniknout na základě nákladů spojených s materiálem a technických vlastností výsledné konstrukce, je z tabulky 32 patrné, že sendvičovými konstrukcemi lze ušetřit značnou část nákladů i při započítání dodatečných prvků konstrukce a navržená soustava je tak vhodná k realizaci.

11 DISKUZE

V této části jsou zdůrazněny pasáže, u nichž může být jistá polemika nad zvolenými postupy a obsahem. Jde o vysvětlení voleb a určitých volených postupů.

Při návrhu koncepčních variant, které se liší v použitém materiálu a hlavně ve způsobu žebrování bylo toto žebrování voleno na základě běžných přístupů k žebrování odlitků a svařenců a na základě literatury. Jiné možné způsoby žebrování jsou uvedeny na obrázku 22.

Ve výpočtové části koncepčních variant byly zanedbány poddajnosti u stavitelných podložek a vedení. Tyto zjednodušující podmínky jsou standardně využívány. Kvůli přiblížení výpočtů reálné konstrukci by bylo vhodné poddajnosti těchto prvků brát v potaz. V prostředí ANSYS je možné poddajnosti řešit buď připojením pružin o určité tuhosti, nebo nastavením kontaktní tuhosti styčných plochy u lineárního vedení. Tím lze zachytit poddajné chování stavitelných podložek a lineárního vedení (obrázek 133). Na druhou stranu postup zadávání přesnějších okrajových podmínek je značně časově náročný. Taktéž síť prvků zde byla nastavena jako značně hrubá – zejména na ostrých přechodech může docházet k výpočtovým nepřesnostem. Síť byla však zvolena nejjemnější možná vzhledem k dostupnému výpočtovému hardwaru a času výpočtu.



Obr. 133) Pružné elementy simulující poddajné stavitelné podložky

Nepřilnutí betonové výplně snižuje v praxi pevnostní vlastnosti sendvičových součástí a proto je pro lepší zachycení reálného chování na základě osobních zkušeností a měření vhodné ve výpočtech snížit modul pružnosti z 32 GPa na 28 GPa.

Metoda PATTERN je značně závislá na zkušenostech hodnotitele. Hodnocení variant pomocí určitých kritérií (např. čas výroby) je voleno na základě odhadu a reálná data k těmto kritériím nemusí být vždy k dispozici.

Z ekonomického hlediska je potřeba konstrukci podrobit detailnějšímu zkoumání tak, aby bylo potvrzeno nastíněné tvrzení, že sendvičové konstrukce mohou ušetřit značnou část nákladů. Mimo spočítaných nákladů na čistý materiál je třeba vyčíslit další nastíněné kapitoly – nakupované komponenty, opracování, náklady na technologii, její příslušenství a na dopravu hotových součástí. Taktéž zde bylo zanedbáno hodnocení vzhledem k počtu kusů v sérii, které může ovlivnit výslednou ekonomickou bilanci.

12 ZÁVĚR

Konkurenceschopnost je pro každý podnik alfou a omegou. Aby byl podnik konkurenceschopný, musí neustále klást důraz, mimo jiné, na vývoj nových přístupů v návrhu a konstrukci. Tento vývoj se ani konstrukčním oddělením obráběcích strojů nevyhýbá. Na základě tohoto požadavku vznikla práce Využití netradičních materiálů ve stavbě horizontálních obráběcích strojů, která shrnula dostupné poznatky o využívání nových materiálů.

V úvodních kapitolách se práce zaměřila obecně na rozbor současného stavu poznání v kategorii horizontálních vyvrtávacích strojů. Byly zde popsány typy konstrukcí strojů, stavba jejich nosné soustavy, požadavky na ni kladené a přehled nových i zavedených materiálů využívaných na jejich konstrukci.

Systémovým rozbohem navazuje práce na předcházející kapitoly. Inženýři při konstrukci stroje často stojí před rozhodnutím, jaký materiál je pro konstrukci vhodný. Proto tato kapitola pomocí bodovací metody porovnávala chování materiálů ve vztahu k působícím vlivům na stroj. Z tohoto výběru vyšla vítězně kombinace kovového pláště a betonového materiálu.

Na systémový rozbor je navázána druhá hlavní část, a sice aplikace této materiálové kombinace do konstrukce stroje WFT 13 CNC z produkce společnosti Fermat. K současnému řešení nosné soustavy stroje bylo vytvořeno celkem 9 modelů sestav rámu s odlišnými materiály použitými na vnější kovový plášť (šedá litina a ocel) a odlišným způsobem jejich vnitřního žebrování. Všechny modelové sestavy byly zváženy pro potřeby následného výběru vhodné varianty. Metodou konečných prvků proběhla analýza koncepčních variant i současného řešení stroje s cílem získat údaje o deformacích a napětí na jednotlivých součástech.

Doporučení vhodné varianty k finální konstrukci proběhlo s využitím metody PATTERN, která umožnila jejich porovnání na základě zvolených kritérií a k nim vypočítaných vah. Mezi hodnotící kritéria s nejvyššími váhami byly vybrány deformace a hmotnost. S výrazným náskokem před ostatními variantami byla na základě výběru zvolena k finální konstrukci 9. varianta. Tuto variantu tvoří ocelový plášť a dvě podélná žebra, přičemž ze tří vzniklých vnitřních prostorů jsou betonovým materiálem vylity pouze dva krajní prostory. Prostřední část konstrukce tvoří prázdné okno.

Zpracováním finální podoby konstrukce se zabývala poslední část práce. Do konstrukce byly zavedeny nezbytné součásti pro její funkci, byl proveden ověřovací pevnostní výpočet konstrukce a navržen postup výroby dílů.

Tak jako start rakety SpaceX zmiňovaný již v úvodu, může být vnímána i výroba sendvičových konstrukcí pro obráběcí stroje. Nejdůležitějším cílem diplomové práce bylo otevřít téma aplikace nových materiálů do konstrukcí obráběcích strojů, zejména aplikace betonů do konstrukce rámových struktur. Shrnuty byly podstatné informace a práce může být vnímána jako určitý návod, využitelný při jejich návrhu. Jejich problematika je již poměrně stará, nicméně k masivní aplikaci prozatím stále nedošlo. Je to zejména z důvodů neznalosti jejich chování, návrhu, simulací a následné stavby a také na druhé straně nedůvěře zákazníků v tyto konstrukce. Jak ale práce ukázala, výborné mechanické vlastnosti, nízké pořizovací náklady a v celku snadná a rychlá výroba mohou tato negativa v budoucnu převážit. Aktuální

konstrukci lze aplikací kombinace ocelového pláště a betonové výplně na bázi cementu hrubým odhadem zlevnit přibližně o třetinu původní ceny. Toto zlevnění znamená nemalé úspory při výrobě a z toho vyplývající větší zisk pro podnik.

V návaznosti na tuto diplomovou práci by bylo vhodné dopracovat kompletní konstrukci celého stroje, která je však značně složitá a jejíž tvorba přesahuje rámec této práce. U hotového prototypu stroje je třeba ověřit příslušnými zkouškami jeho funkčnost. Po kompletním návrhu je vhodné také detailněji zpracovat ekonomické hodnocení konstrukce nosné soustavy a celého stroje.

13 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] SZONDY, David. Falcon Heavy vs. the classic Saturn V. *New atlas* [online]. 2018, [cit. 2018-02-08]. Dostupné z: <https://newatlas.com/falcon-heavy-saturn-v>
- [2] BARNETT, Amanda a WATTLES Jackie. SpaceX Falcon Heavy: How it stacks up with other massive rockets. *CNNMoney* [online]. 2018, [cit. 2018-02-08]. Dostupné z: <http://money.cnn.com/2018/02/06/technology/future/biggest-rockets-falcon-heavy-comparison/index.html>
- [3] COLLEPARDI, Mario. *Moderní beton*. Praha: Pro Českou komoru autorizovaných inženýrů a techniků činných ve výstavbě (ČKAIT) vydalo Informační centrum ČKAIT, 2009. 342 s. ISBN 978-80-87093-75-7.
- [4] DVOŘÁK, Roman. Strojář každým coulem. *MM publishing* [online]. 2010, [cit. 2018-02-08]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/strojar-kazdym-coulem.html>
- [5] MAREK, Jiří. *Konstrukce CNC obráběcích strojů III*. 3. vyd. Praha: MM publishing, 2014. MM speciál. ISBN 978-80-260-6780-1.
- [6] Společnost FERMAT Group, a.s., listinný firemní katalog. Brno, 2017.
- [7] ZENKER, Petr. Strojírenská skupina Fermat měla loni rekordní obrat. Daří se jí i v USA. *Hospodářské noviny* [online]. 2016, [cit. 2018-02-09]. Dostupné z: <http://archiv.ihned.cz/c1-65276570-strojirenska-skupina-fermat-mela-loni-rekordni-obrat-dari-se-ji-i-v-usa.html>
- [8] Fermatmachinetool [online]. 2017, [cit. 2018-02-09]. Dostupné z: http://www.fermatmachinetool.com/media/Katalog_brusky_ENG_WEB.pdf
- [9] Výrobní program TOS VARNSDORF a.s. [online]. 2018, [cit. 2018-02-12]. Dostupné z: <https://www.tosvarnsdorf.cz/files/machines/tos-varnsdorf-vyrobní-program-cz.pdf>
- [10] BORSKÝ, Václav. *Základy stavby obráběcích strojů*. 2. vyd. Brno: VUT, 1991. ISBN 80-214-0361-6.
- [11] SMOLÍK, Jan. Trendy po EMO Milano 2015. In *Sborník k odbornému semináři*. Praha: Společnost pro obráběcí stroje. 2016. 242 s. ISBN 978-80-904077-8-7.
- [12] BORSKÝ, Václav. *Jednoúčelové a víceúčelové obráběcí stroje*. 2. vyd, Brno: VUT, 1990. ISBN 80-214-0175-3.
- [13] SVOBODA, Ondřej a BACH, Pavel. Je zaškrabávání nezastupitelná metoda?. *MM publishing* [online]. 1 vyd. 2016, [cit. 2018-02-16]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/je-zaskrabavani-nezastupitelna-metoda.html>
- [14] SVOBODA, Ondřej a BACH, Pavel. Je zaškrabávání nezastupitelná metoda?. *MM publishing* [online]. 2 vyd. 2016, [cit. 2018-02-16]. Dostupné z: <http://www.digitovarna.cz/clanek-84/je-zaskrabavani-nezastupitelna-metoda-12775.html>
- [15] planlauf GmbH [online]. 2017, [cit. 2018-02-18]. Dostupné z: <https://www.planlauf.com/en/measurement/diagnosis-of-chatter-marks/>
- [16] VANĚK, J. Beton a přírodní žula při výrobě loží a rámu obráběcích strojů. *MM publishing* [online]. 2003, [cit. 2018-02-18]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/beton-a-prirodni-zula-pri-vyrobe-lozi-a-ramu-obrabcich-stroju.html>
- [17] SVOBODA, Pavel, BRANDEJS, Jan a Jiří DVOŘÁČEK. *Základy konstruování*. 5. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2013. ISBN 978-80-7204-839-7.

- [18] BRENÍK, Přemysl, PÍČ, Josef. *Obráběcí stroje - konstrukce a výpočty*. 2. vyd. Praha: SNTL, 1986. 573 s. ISBN 04-235-86.
- [19] Vertical machining centers [online]. 2018, [cit. 2018-02-25]. Dostupné z: http://www.baykal.com.tr/docs/fileorg_katalog_20140613155854.pdf
- [20] SMOLÍK, Jan, LYSÁK, Pavel, HOVORKA, Jiří, DIVIŠ, Ivan, LAŠOVÁ, Václava. Stavba nosných soustav. In *článek ve sborníku k bloku přednášek: Obráběcí stroje a technologie na EMO Milano 2009*. Praha: Společnost pro obráběcí stroje a ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Výzkumné centrum pro strojírenskou a výrobní technologii a techniku. 2010. ISBN 978-80-904077-2-5.
- [21] Esterer Gießerei GmbH [online]. 2017, [cit. 2018-03-03]. Dostupné z: <https://www.esterer-giesserei.de/cz/sluzby/materialy/>
- [22] DAĐOUREK, K. *Kompozitní materiály – druhy a jejich využití*. 1. vyd. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2007. ISBN 978-80-7372-279-1.
- [23] MRÁZ, Petr a TALÁCKO, Jaroslav. *Konstrukce strojů s kompozitními materiály*. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2006. ISBN 80-01-03540-9.
- [24] Compo Tech PLUS, spol. s r.o. [online]. 2018, [cit. 2018-03-10]. Dostupné z: <http://www.compotech.com/cs/project/kompozitni-hridele-vreten/>
- [25] KŘÍŽ, Antonín. *Prášková metalurgie* [přednáška]. Plzeň: ZČU Plzeň. 2005. In: Studijní opory [online]. [cit. 2018-03-13]. Dostupné z: http://www.ateam.zcu.cz/praskova_metalurgie.pdf
- [26] RAMPF Holding GmbH & Co KG. [online]. 2017, [cit. 2018-03-13]. Dostupné z: http://www.rampf-group.com.cn/uploads/media/RAMPF-MachineSystems_EPUMENT_GB.pdf
- [27] THOME Präzision GmbH [online]. 2017, [cit. 2018-03-13]. Dostupné z: <http://www.thome-praezision.de/deu/praezisionsgranitteile-messplatten.html>
- [28] Společnost IZM Polycast GmbH & Co. KG, PDF interní firemní katalog. Praha, 2014.
- [29] RAMPF Holding GmbH & Co KG. [online]. 2017, [cit. 2018-03-13]. Dostupné z: http://www.rampf-gruppe.de/uploads/media/2010-05-06_RCN_EPUFILL_GB.pdf
- [30] BAMBERG, Eberhard. Principles of Rapid Machine Design. Boston, 2000. 212 s. Dizertační práce na Massachusetts Institute of Technology. Vedoucí dizertační práce prof. Alexander H. Slocum
- [31] MACHUTA, Jiří. Výrobky z hliníkové pěny. MM publishing [online]. 2007, [cit. 2018-03-18]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/vyrobky-z-hlinikove-peny.html>
- [32] MINSTER, Jiří. Polymerní betony [přednáška]. Praha: Ústav teoretické a aplikované mechaniky AV ČR. 2011. In: Seminář [online]. [cit. 2018-03-18]. Dostupné z: http://www.csm-kompozity.wz.cz/polymerni_betony.pdf
- [33] CEMEX Czech Republic, s.r.o. [online]. 2018, [cit. 2018-03-18]. Dostupné z: http://www.cemex.cz/UserFiles/dokumenty/Ceniky%20Beton/Cenik_CEMEX_betonarna_Brno.pdf
- [34] PTÁČEK, Luděk. *Nauka o mateirálu II*. 2. vyd. Brno: CERM, 2002. ISBN 80-7204-248-3.
- [35] ROUČKA, Jaromír. *Metalurgie litin*. 1. vyd. Brno: PC-DIR Real, s.r.o., 1998. ISBN 80-214-1263-1.

- [36] Compo Tech PLUS, spol. s r.o. [online]. 2018, [cit. 2018-03-18]. Dostupné z: <http://www.compotech.com/wp-content/uploads/2017/09/Machine-Energy-Comparison.xlsx>
- [37] BURKHARDT+WEBER Fertigungssysteme GmbH [online]. 2018, [cit. 2018-03-18]. Dostupné z: <http://burkhardt-weber.com/products/mcx-roller-guided-machining-centres/>
- [38] MAREK, Jiří. Nastal čas změnit přístup, nastal čas změn. *MM publishing* [online]. 2016, [cit. 2018-03-18]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/nastal-cas-zmenit-pristup-nastal-cas-zmen.html>
- [39] TOS Kuřim – OS, a.s. [online]. 2018, [cit. 2018-03-18]. Dostupné z: <http://www.toskurim.com/cz/produktove-portfolio/horizontalni-obrabeci-centra/15-tos-fut>
- [40] Společnost Reiden Technik AG, PDF interní firemní katalog. Brno, 2017.
- [41] Společnost Demmeler Maschinenbau GmbH & Co. KG, PDF interní firemní katalog. Brno, 2017.
- [42] durcrete GmbH [online]. 2018, [cit. 2018-03-20]. Dostupné z: http://durcrete.de/wp-content/uploads/2015/06/downloads-durfill_Prospekt_E_0615.pdf
- [43] BaseTek LLC [online]. 2018, [cit. 2018-03-24]. Dostupné z: http://www.basetek.com/sites/default/files/BaseTek%20General%20Brochure%20GB-15_0.pdf
- [44] auratronic [online]. 2017, [cit. 2018-03-24]. Dostupné z: http://p438830.webspaceconfig.de/wp-content/uploads/2015/06/auratronic_flyer_at-500_sbz-neu.pdf
- [45] BaseTek LLC [online]. 2018, [cit. 2018-03-24]. Dostupné z: <http://www.basetek.com/zanite-plus-polymer-composite>
- [46] SCHNEEBERGER AG [online]. 2018, [cit. 2018-03-24]. Dostupné z: <https://www.schneeberger.com/en/products/mineral-casting/#corecompetences>
- [47] Friedrich Schroeder GmbH & Co. KG [online]. 2018, [cit. 2018-03-24]. Dostupné z: http://schroeder-neuenrade.de/index.php?option=com_dropfiles&task=frontfile.download&&id=108&catid=40
- [48] JANÍČEK, Přemysl a MAREK, Jiří. *Expertní inženýrství v systémovém pojetí*. Praha: Grada, 2013. Expert (Grada). ISBN 978-80-247-4127-7.
- [49] ČSN 42 2430. Litina 42 2430 s lupínkovým grafitem. Praha: ÚNMZ, září 1990.
- [50] DROZDA, Jiří, HASNÍKOVÁ, Hana, JIRSÁK, Václav, MAŠOVÁ, Eva. *Příručka ANSYS Workbench*. 1. vyd. Praha: Česká technika - nakladatelství ČVUT, 2012. ISBN 978-80-01-05175-7.
- [51] ČSN 41 1523. Ocel 11 523. Praha: ÚNMZ, květen 1994.
- [52] LEINVEBER, Jan, ŘASA, Jaroslav, VÁVRA, Pavel. *Strojnické tabulky*. 3. vyd. Praha: Scientia, 1999. ISBN 80-7183-164-6.
- [53] SAGMEISTER, Bernhard. *Maschinenteile aus zementgebundenem Beton*. 1. vyd. Berlín: Beuth Verlag GmbH, 2017. ISBN 978-3-410-27186-4
- [54] durcrete GmbH [online]. 2018, [cit. 2018-03-29]. Dostupné z: http://durcrete.de/wp-content/uploads/2017/11/durfill_Materialdata_E_Status_11_2017.pdf
- [55] durcrete GmbH [online]. 2018, [cit. 2018-03-29]. Dostupné z: http://durcrete.de/wp-content/uploads/2017/05/durfill-60-Pricelist-E-05_2017.pdf

- [56] MERENUS, Ondřej. *Multifunkční obráběcí centrum pro rotační i nerotační obrobky*. Brno, 2014. Diplomová práce na VUT v Brně. Vedoucí diplomové práce prof. Jiří Marek
- [57] KOLÍBAL, Zdeněk, KNOFLÍČEK, Radek, BLECHA, Petr, VAVŘÍK, Ivan. *Technologičnost konstrukce a retrofitting výrobních strojů*. 1. vyd. Brno: VUTIUM. 2010. ISBN 978-80-214-3765-4.
- [58] HIWIN s.r.o. [online]. 2018, [cit. 2018-05-13]. Dostupné z: http://www.hiwin.cz/media/files/01_linearni_vedeni_2018.pdf
- [59] STAVO-SHOP.CZ [online]. 2018, [cit. 2018-05-10]. Dostupné z: <https://www.stavo-shop.cz/av-585-t-vysokofrekvencni-ponorny-vibrator-s-prumerem-hlavice-58-mm>
- [60] ČSN EN 12350-5 (731301). Zkoušení čerstvého betonu - Část 5: Zkouška rozlitím. Praha: ÚNMZ, říjen 2009.

14 SEZNAM ZKRATEK, SYMBOLŮ, OBRÁZKŮ A TABULEK

14.1 Seznam zkratk a symbolů

a_{pod}	mm	vzdálenost zatěžující síly F_{poh_pod} od těžiště v podélném směru
a_{pric}	mm	vzdálenost zatěžující síly F_{poh_pric} od těžiště v příčném směru
BHV_j	-	bodová hodnota významnosti
b_{pod}	mm	vzdálenost zatěžující síly F_{poh_pod} od těžiště v příčném směru
b_{pric}	mm	vzdálenost zatěžující síly F_{poh_pric} od těžiště v příčném směru
C_{pod}	mm	rozteč kolejnic na podélné sestavě
C_{pric}	mm	rozteč kolejnic na příčné sestavě
C_{dyn}	N	dynamická únosnost vozíků vedení
C_0	N	statická únosnost vozíků vedení
d_{pod}	mm	rozteč vozíků na podélné sestavě
d_{pric}	mm	rozteč vozíků na příčné sestavě
f_{SL_pod}	-	statická konstrukční bezpečnost na podélné sestavě
f_{SL_pric}	-	statická konstrukční bezpečnost na příčné sestavě
f_{SM_pod}	-	faktor statické bezpečnosti pro zatěžování krutem na podélné sestavě
f_{SM_pric}	-	faktor statické bezpečnosti pro zatěžování krutem na příčné sestavě
F_{C_X}	N	řezná síla působící ve směru osy X
F_{C_Y}	N	řezná síla působící ve směru osy Y
F_{C_Z}	N	řezná síla působící ve směru osy Z
F_{g_pod}	N	gravitační síla od hmotností součástí na podélné sestavě
F_{g_pric}	N	gravitační síla od hmotností součástí na příčné sestavě
F_{poh_pod}	N	pohybová síla působící na podélné sestavě
F_{poh_pric}	N	pohybová síla působící na příčné sestavě
g	$m \cdot s^{-2}$	tíhové zrychlení
H_{j_max}	-	největší hodnota kritéria
H_{j_min}	-	nejmenší hodnota kritéria
H_{jx}	-	hodnota kritéria
I_{jx}	-	index změny
I_{jx_v}	-	vážený index změny
L_{pod}	km	jmenovitá životnost vedení na podélné sestavě
L_{pric}	km	jmenovitá životnost vedení na příčné sestavě
m_{dslov}	kg	hmotnost desky stolu a ložiska s ozubeným věncem
$M_{k_pod_X}$	Nm	zatěžující moment od obrábění v ose X na podélné sestavě
$M_{k_pod_Y}$	Nm	zatěžující moment od obrábění v ose Y na podélné sestavě
$M_{k_pod_Z}$	Nm	zatěžující moment od obrábění v ose Z na podélné sestavě
$M_{k_pric_X}$	Nm	zatěžující moment od obrábění v ose X na příčné sestavě
$M_{k_pric_Y}$	Nm	zatěžující moment od obrábění v ose Y na příčné sestavě

$M_{k_pric_Z}$	Nm	zatěžující moment od obrábění v ose Z na příčné sestavě
m_{obr}	kg	hmotnost obrobku
M_{pod}	Nm	ekvivalentní statický moment na podélné sestavě
m_{pod_sani}	kg	hmotnost saní stolu (podélných)
M_{pric}	Nm	ekvivalentní statický moment na příčné sestavě
m_{pric_sani}	kg	hmotnost saní stojanu (příčných)
m_{stojan}	kg	hmotnost stojanu
m_{sv}	kg	hmotnost saní vřeteníku
m_v	kg	hmotnost vřeteníku
M_0	Nm	přípustný statický moment na vozících vedení
P_{pod}	N	ekvivalentní statické pracovní zatížení na podélné sestavě
P_{pric}	N	ekvivalentní statické pracovní zatížení na příčné sestavě
q_j	-	váha významnosti
r_{pod_X}	mm	rameno působení síly F_{C_X} na podélné sestavě
r_{pod_Y}	mm	rameno působení síly F_{C_Y} na podélné sestavě
r_{pod_Z}	mm	rameno působení síly F_{C_Z} na podélné sestavě
r_{pric_X}	mm	rameno působení síly F_{C_X} na příčné sestavě
r_{pric_Y}	mm	rameno působení síly F_{C_Y} na příčné sestavě
r_{pric_Z}	mm	rameno působení síly F_{C_Z} na příčné sestavě
S_x	-	relativní technická úroveň (součet vážených indexů změn)
W_{pod}	N	zátěž působící na vozíky lineárního vedení na podélné sestavě
W_{pric}	N	zátěž působící na vozíky lineárního vedení na příčné sestavě

14.2 Seznam obrázků

Obr. 1) Velikosti jednotlivých raket: Falcon Heavy vlevo, Saturn V třetí zleva [2].....	17
Obr. 2) Postup v práci	19
Obr. 3) Továrna na výrobu obráběcích strojů v Lipníku nad Bečvou [6]	21
Obr. 4) Výrobní hala společnosti Fermat v Brně [8].....	22
Obr. 5) Diagram portfolia společnosti Fermat	22
Obr. 6) Horizontální vyvrtávací centrum modulární koncepce[8]	23
Obr. 7) Frézovací hlavy konstrukce Fermat [8]	23
Obr. 8) Technologické operace horizontálních vyvrtávacích strojů [5].....	25
Obr. 9) Typy horizontálních vyvrtávacích strojů – zleva stolové, křížové a deskové [9].....	25
Obr. 10) Horizontální vyvrtávací stroje Fermat – stolové [8].....	26
Obr. 11) Horizontální vyvrtávací Fermat - deskové [8].....	27
Obr. 12) Otevřená (vlevo) a uzavřená (vpravo) nosná soustava [5]	29
Obr. 13) Definice statické deformace [12].....	30
Obr. 14) 4 druhy zatížení a statických tuhostí [10]	30
Obr. 15) Konkrétní situace a vztahy jejich statické tuhosti [10]	30
Obr. 16) Typy povrchový nerovností pro vznik stykové deformace [10].....	31
Obr. 17) Stopy po obrábění při samobuzeném kmitání [15].....	32
Obr. 18) Příčiny vzniku kmitání v obráběcích strojích [10].....	33
Obr. 19) Dělení teplotních vlivů na obráběcí stroje [5]	34

Obr. 20) Prvky nosné soustavy obráběcích strojů [5]	35
Obr. 21) Typy profilů a žebrování rámových součástí [5]	36
Obr. 22) Teoretické možnosti žebrování rámu [5]	36
Obr. 23) Možnosti uložení strojů na základ [5]	37
Obr. 24) 3 typy konstrukce přírubových spojů [5]	37
Obr. 25) Základní materiály využívané na rámy obráběcích strojů [5]	38
Obr. 26) Svařované lože společnosti Baykal [19]	40
Obr. 27) Svařovaný portál stroje společnosti Benazzato S.r.l. [20]	40
Obr. 28) Lože stroje WFT 13 CNC společnosti Fermat [6]	42
Obr. 29) Stojan stroje WHN(Q) 13 CNC společnosti TOS Varnsdorf [9]	42
Obr. 30) Struktura tvárné a šedé litiny [21]	42
Obr. 31) Typy kompozitů – zleva částicový, vločkový a vláknový [22]	43
Obr. 32) Vřeteník z vláknového kompozitu od společnosti Compotech [24]	43
Obr. 33) Mikrostruktura slinutého karbidu WC+Co [25]	44
Obr. 34) Řez betonem [3]	45
Obr. 35) Složky běžného betonu [3]	45
Obr. 36) Disperzní systémy dle velikosti pórovitosti materiálu [23]	46
Obr. 37) Polymerbeton EPUMENT – zleva čerstvá a vytvrzená směs [26]	47
Obr. 38) Struktura Granitu a zalité závitové pouzdro [27]	48
Obr. 39) Kombinace ocelového svařence s betonovou výplní společnosti Rampf [29]	49
Obr. 40) Struktura a velikost pórů různých typů hliníkových pěn [31]	50
Obr. 41) Technologie EPUFILL [29]	51
Obr. 42) Lože stroje TOS FUT [38]	52
Obr. 43) Struktura COMBItec na stojanu stroje WRD 170 [9]	52
Obr. 44) Litinové lože vylité betonovou směsí [40]	53
Obr. 45) Struktura součástí s technologií Dem-Tec [41]	53
Obr. 46) Lože stroje AT-500 SBZ ve fázi před vylitím [42]	54
Obr. 47) Základ stroje vyplněný materiálem Zanite Plus [43]	54
Obr. 48) Proces výroby betonových dílů	56
Obr. 49) Ocelová forma pro odlévání polymerbetonu [46]	57
Obr. 50) Převážná kotva společnosti Friedrich Schroeder [47]	57
Obr. 51) Znázornění zkoumaného systému	59
Obr. 52) Přehled podstatných veličin	61
Obr. 53) Prvky stroje WFT 13 CNC [6]	63
Obr. 54) Hlavní uzly nosné struktury stroje WFT 13 CNC	64
Obr. 55) Model podélného lože stolu stroje WFT 13 CNC	66
Obr. 56) Pohled na vnitřní žebrování podélného lože stroje WFT 13 CNC	66
Obr. 57) Model saní stolu stroje WFT 13 CNC – horní strana	67
Obr. 58) Model saní stolu stroje WFT 13 CNC – spodní strana	68
Obr. 59) Model příčného lože stojanu stroje WFT 13 CNC	69
Obr. 60) Pohled na vnitřní žebrování příčného lože stroje WFT 13 CNC	69
Obr. 61) Model saní stojanu stroje WFT 13 CNC – horní pohled	70
Obr. 62) Model saní stojanu stroje WFT 13 CNC – spodní pohled	70
Obr. 63) Model stojanu stroje WFT 13 CNC	71
Obr. 64) Struktura koncepčních variant	73
Obr. 65) Částečný řez modelem příčné sestavy - varianta I	74
Obr. 66) Částečný řez modelem podélné sestavy - varianta I	75

Obr. 67) Částečný řez modelem podélné sestavy – varianta II	75
Obr. 68) Částečný řez modelem příčné sestavy – varianta II.....	76
Obr. 69) Částečný řez modelem podélné sestavy – varianta III.....	76
Obr. 70) Částečný řez modelem příčné sestavy – varianta III	77
Obr. 71) Částečný řez modelem podélné sestavy – varianta IV	77
Obr. 72) Částečný řez modelem příčné sestavy – varianta IV	78
Obr. 73) Částečný řez modelem podélné sestavy – varianta V	78
Obr. 74) Částečný řez modelem příčné sestavy – varianta V	79
Obr. 75) Částečný řez modelem podélné sestavy – varianta VI	79
Obr. 76) Částečný řez modelem příčné sestavy – varianta VI.....	80
Obr. 77) Částečný řez modelem podélné sestavy – varianta VII.....	80
Obr. 78) Částečný řez modelem příčné sestavy – varianta VII.....	81
Obr. 79) Částečný řez modelem podélné sestavy – varianta VIII.....	81
Obr. 80) Částečný řez modelem příčné sestavy – varianta VIII	82
Obr. 81) Částečný řez modelem podélné sestavy – varianta IX	82
Obr. 82) Částečný řez modelem příčné sestavy – varianta IX	83
Obr. 83) Graf porovnání hmotností celkových sestav koncepčních variant	84
Obr. 84) Náklady na celkové sestavy rámu.....	85
Obr. 85) Detail sítě prvků na příčné sestavě současného stroje	88
Obr. 86) Detail sítě prvků na podélné sestavě současného stroje	88
Obr. 87) Síly od obrábění působící na soustavu.....	89
Obr. 88) Okrajové podmínky na podélné sestavě současného stroje.....	90
Obr. 89) Okrajové podmínky na příčné sestavě současného stroje.....	91
Obr. 90) Deformace na výchozí podélné sestavě současného stroje – horní pohled	91
Obr. 91) Deformace na výchozí podélné sestavě současného stroje – spodní pohled	92
Obr. 92) Maximální napětí na výchozí podélné sestavě současného stroje	92
Obr. 93) Maximální deformace na výchozí příčné sestavě současného stroje.....	92
Obr. 94) Napětí na výchozí příčné sestavě současného stroje	93
Obr. 95) Detail sítě prvků na podélné sestavě koncepční varianty I.....	94
Obr. 96) Síť prvků na příčné sestavě koncepční varianty I.....	94
Obr. 97) Maximální deformace na podélné sestavě koncepční varianty I.....	95
Obr. 98) Maximální napětí na podélné sestavě koncepční varianty I	95
Obr. 99) Maximální deformace na příčné sestavě koncepční varianty I.....	96
Obr. 100) Maximální napětí na příčné sestavě koncepční varianty I.....	96
Obr. 101) Detail sítě prvků na podélné sestavě koncepční varianty V – horní pohled.....	97
Obr. 102) Detail sítě prvků na podélné sestavě koncepční varianty V – dolní pohled	98
Obr. 103) Detail sítě prvků na příčné sestavě koncepční varianty V – horní pohled.....	98
Obr. 104) Okrajové podmínky na podélné sestavě koncepční varianty V	99
Obr. 105) Okrajové podmínky na příčné sestavě koncepční varianty V	99
Obr. 106) Maximální deformace na podélné sestavě koncepční varianty V.....	100
Obr. 107) Maximální napětí na podélné sestavě koncepční varianty V.....	100
Obr. 108) Maximální deformace na příčné sestavě koncepční varianty V	101
Obr. 109) Maximální napětí na příčné sestavě koncepční varianty V	101
Obr. 110) Graf maximálních deformací	103
Obr. 111) Graf maximálních napětí	103
Obr. 112) Graf vah kritérií	107
Obr. 113) Detail vybrané varianty IX ke konstrukci.....	110

Obr. 114) Pohled na vnitřní prostory součástí určené k vyplnění [53]	112
Obr. 115) Podélné lože po úpravách	113
Obr. 116) Stojan po úpravách	113
Obr. 117) Transportní a vazební prvky aplikované na všechny součásti.....	114
Obr. 118) Vazební kotvy aplikované na saních	115
Obr. 119) Transportní kotvy pro saně	115
Obr. 120) Plastové kryty nálitkových otvorů	116
Obr. 121) Stavitelné podložky BWF RKIII	116
Obr. 122) Vedení HIWIN RGW_65HC.....	118
Obr. 123) Vedení RGW_65HC na stojanu.....	119
Obr. 124) Uložení kuličkového šroubu a matice.....	120
Obr. 125) Otvory pro vedení	121
Obr. 126) Příklad vysokofrekvenčního ponorného vibrátoru [59].....	121
Obr. 127) Celková sendvičová sestava rámu stroje WFT 13 CNC – přední pohled.....	122
Obr. 128) Celková sendvičová sestava rámu stroje WFT 13 CNC – horní pohled	123
Obr. 129) Celková sendvičová sestava rámu stroje WFT 13 CNC - detail.....	123
Obr. 130) Zkouška konzistence betonu rozlitím – forma a rozlití [60].....	124
Obr. 131) Postup odlévání řad nálitkových otvorů a umístění součásti otvory vzhůru	125
Obr. 132) Proces zhutňování	126
Obr. 133) Pružné elementy simulující poddajné stavitelné podložky.....	129

14.3 Seznam tabulek

Tab 1) Přehled technických parametrů vyvrtávacích strojů Fermat [6].....	28
Tab 2) Závislost mezi fyzikálními a technicko-provozními vlastnostmi materiálů [10]	39
Tab 3) Výhody a nevýhody ocelových svařenců [5] [10] [12]	39
Tab 4) Výhody a nevýhody litin – šedá/tvárná litina [5] [12] [18]	41
Tab 5) Výhody a nevýhody cementového betonu (hydrobetonu) [16]	46
Tab 6) Výhody a nevýhody polymerbetonů [9] [23]	47
Tab 7) Výhody a nevýhody vysokohodnotných betonů [5].....	48
Tab 8) Orientační porovnání technických vlastností materiálů pro nosné prvky [21] [23] [27] [32] [33] [34][35] [36].....	50
Tab 9) Porovnání teplotních a dynamických vlastností materiálů pro nosné prvky [23] [27] [32]	51
Tab 10) Porovnání vlastností strojů s kombinovanými materiály [9] [37] [39] [40] [44]	55
Tab 11) Kritéria podstatných veličin.....	62
Tab 12) Výběrová tabulka vhodného materiálu	62
Tab 13) Vlastnosti litiny s lupínkovým grafitem EN-GJL-300 – ČSN 42 2430 [49].....	65
Tab 14) Parametry podélného lože.....	66
Tab 15) Parametry saní stolu (podélných)	67
Tab 16) Parametry příčného lože	68
Tab 17) Vlastnosti saní stojanu (příčných)	70
Tab 18) Vlastnosti stojanu.....	71
Tab 19) Tabulka porovnání hmotností celkových sestav	83
Tab 20) Porovnání hmotností a nákladů.....	84
Tab 21) Porovnání hmotností modelů součástí před a po úpravách.....	87
Tab 22) Hmotnosti nespécifikovaných součástí a obrobku	90

Tab 23) Vlastnosti a parametry betonu Durcrete Durfill [54] [55]	93
Tab 24) Vlastnosti oceli 11 523 [51] [52]	97
Tab 25) Tabulka maximálních deformací a napětí podélných sestav	102
Tab 26) Tabulka maximálních deformací a napětí příčných sestav	102
Tab 27) Tabulka hodnotících kritérií a tendencí změn.....	105
Tab 28) Párové porovnání hodnotících kritérií	106
Tab 29) Tabulka vah kritérií.....	106
Tab 30) Tabulka stanovení pořadí koncepčních variant – část 1	108
Tab 31) Tabulka stanovení pořadí koncepčních variant – část 2	109
Tab 32) Kalkulace odhadovaných nákladů na materiály konstrukcí	127

15 SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1 - Výkresová dokumentace stroje.....	145
Příloha 2 - 3D modely navržené nosné struktury	145
Příloha 3 - Parametry betonových materiálů využívaných pro odlévání do svařovaných konstrukcí – část 1	145
Příloha 4 - Parametry betonových materiálů využívaných pro odlévání do svařovaných konstrukcí – část 2	145
Příloha 5 - Katalogový list Durcrete Durfill [54]	146
Příloha 6 - výsledky pevnostních analýz koncepčních variant	147
Příloha 7 - Zatěžování vozíků HIWIN	150

PŘÍLOHY

Příloha 1 - Výkresová dokumentace stroje

Výkresová dokumentace je k práci přiložena v papírové i elektronické podobě.

Příloha 2 - 3D modely navržené nosné struktury

3D model je k práci přiložen v elektronické podobě.

Příloha 3 - Parametry betonových materiálů využívaných pro odlévání do svařovaných konstrukcí – část 1

Materiál	Maximální velikost zrna (mm)	Měrná hmotnost ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	Modul pružnosti (GPa)	Mez pevnosti v tlaku (MPa)	Poissonovo číslo (-)
EPUMENT 145B	16	2400	40-45	130-150	0,3
EPUMENT 140/8	8	2300	35	130	0,29
EPUMENT 140/5	5	2300	30-35	140-160	0,28
Durfill	4,5	2275	32	90	0,2
HPC beton NANODUR E80	-	2790	84,5	150	0,2
Zanite Plus	-	2200	31	124	0,25

Příloha 4 - Parametry betonových materiálů využívaných pro odlévání do svařovaných konstrukcí – část 2

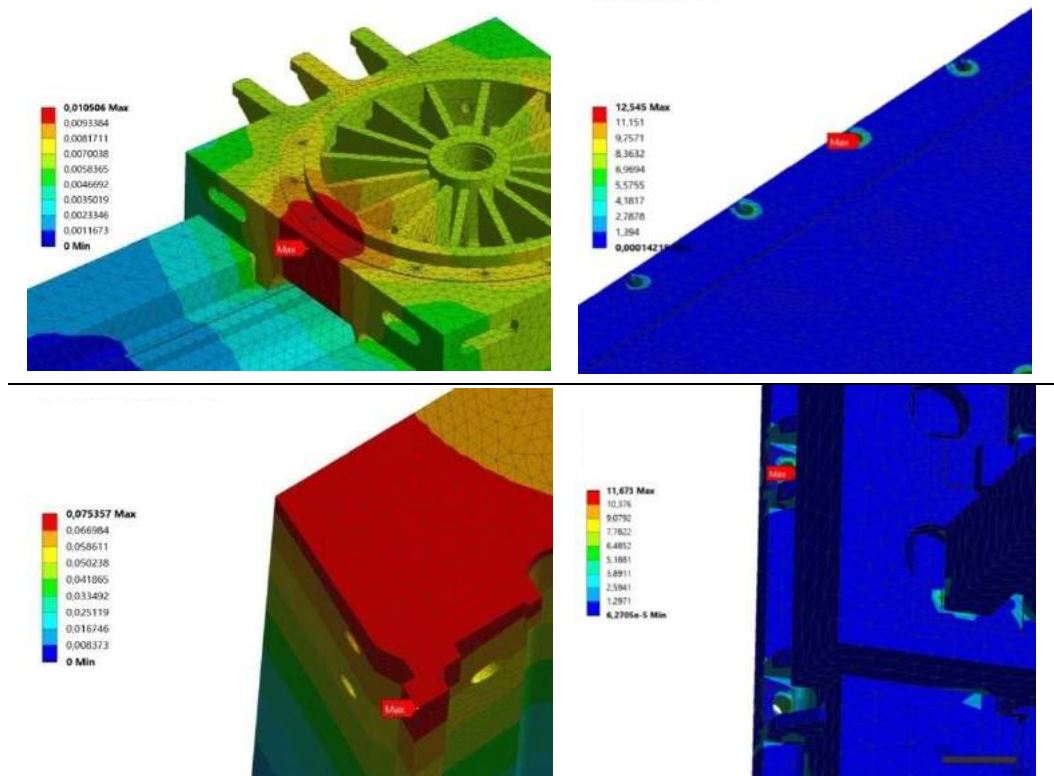
Materiál	Koeficient teplotní roztažnosti ($10^{-6}/\text{K}$)	Koeficient teplotní vodivosti (W/mK)	Měrná tepelná kapacita (KJ/kgK)	Dekrement útlumu (-)	Cena za kg (€/kg)
EPUMENT 145B	15	2,9	0,73	0,022	-
EPUMENT 140/8	17	2,8	0,8	0,03	-
EPUMENT 140/5	19,5	2,3	0,8	0,035	-
Durfill	12,4	2,7	1,05	0,035	0,54
HPC beton NANODUR E80	7	6	0,85	0,0210	0,36
Zanite Plus	14,2	-	-	-	1,54

Příloha 5 - Katalogový list Durcrete Durfill [54]

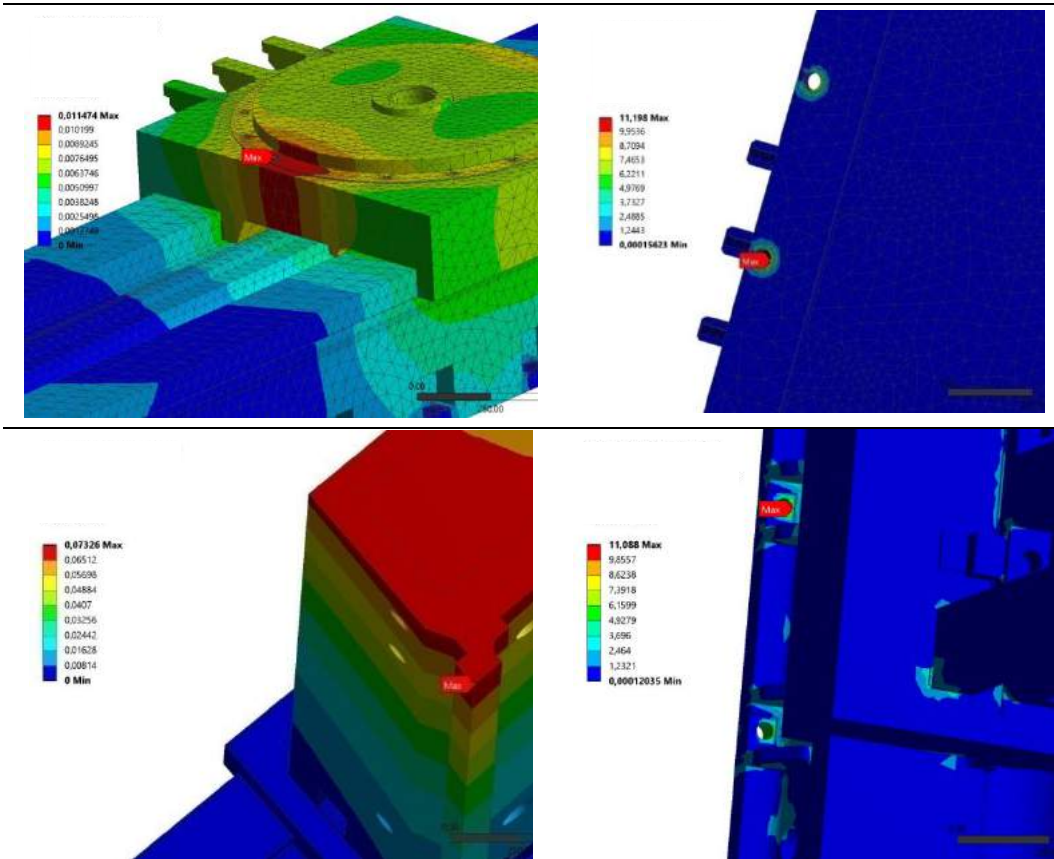
Characteristics	[]	Value	Test specifications, notes
Density	ρ_c	2,275 kg/m ³	
Compressive strength 28 d, after 3 and 7 days	f_{cm}	90 Mpa 70 / 80 MPa	DIN EN 1015, on prism, storage in accordance with the standard
Flexible tensile strength 28 d, after 3 and 7 days	f_{ctm}	10 Mpa 10 / 10 Mpa	DIN EN 1015, three-point test, on prism 40 x 40 x 160 mm, standard storage
Static modulus of elasticity	E_c	32,000 Mpa	DIN 1048 with cylinder Ø 150 x 300 mm
Dyn. modulus of elasticity	E_c	40,000 Mpa	DAfStb-Rili, ultrasonic sound
Poisson's ratio	μ	0.20	In accordance with EC-2
Logarithmic decrement	Λ	0.035 [-] (D = 0.56 %)	Test specimen 400 x 100 x 100 mm
Thermal expansion	α_T	$12.4 \cdot 10^{-6} K^{-1}$	at 20°C
Thermal conductivity	λ	2.7 W/mK	at 20°C / 65 %
Specific thermal capacity	c_p	1.05 J/gK	at 20°C
Temperature resistance		until 90°C	for modification of the characteristics at higher temp. see EC-2-2 and EC-4-2
Formwork pressure on enclosing members/form		25 kN/m ³ x h h=height in m	Fluid pressure and pressure due to swelling of the material of < 1 %.
Transportable after		12 to 16 h	Depending on ambient temperature
Recommended setting time prior to further processing		> 2 weeks	Depending on temperature and the required quality of precision processing
Maximum particle size		4.5 mm round particle	Flow inlet in member > Ø 100 mm; transport by silo trucks and blowing into stationary silos
Fibers		fiber-free	
Coating, bonding		possible	For example, with epoxy or PU-materials
Casting performance, casting height		[-]	Depending on mixer and pump; no concrete-specific limitation
Processing time		ca. 60 min	Depending on ambient temperature
Yield 1 ton of dry concrete		440 liter	Ready-to-use flowing filler-concrete
Amount of mixing water for 1 ton of dry concrete (depends on the mixer)		110-115 l/ton 250–260l/m ³ 4.4 – 4.6 ltr. per 40kg bag	Flow Table Test without shocks > 600 mm acc. to DIN EN 12350-5. Flow Table Test without shocks > 240 mm acc. to EN 1015-3 Contact us for a mixing demonstration.
Storage		for 3 months	Dry, in original packaging
Hazard rating			See Safety Data Sheet

Příloha 6 - výsledky pevnostních analýz konceptních variant

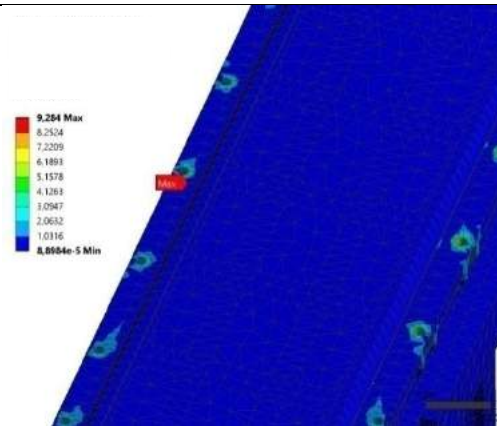
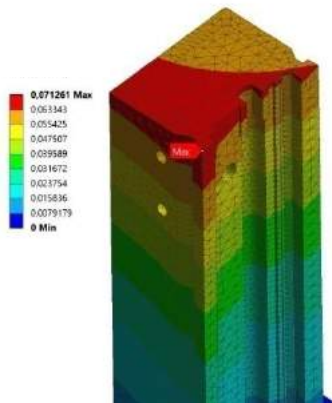
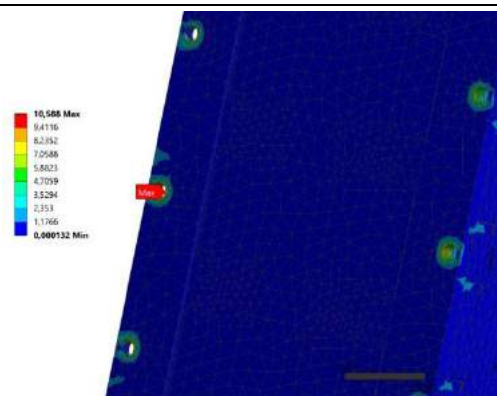
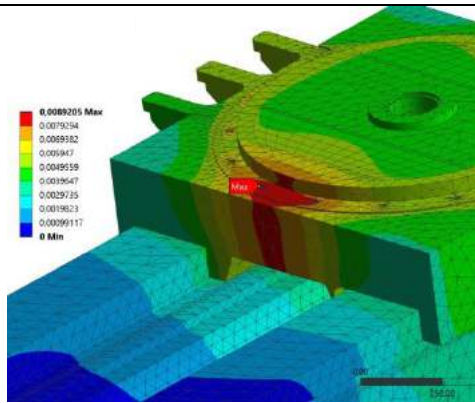
Varianta II



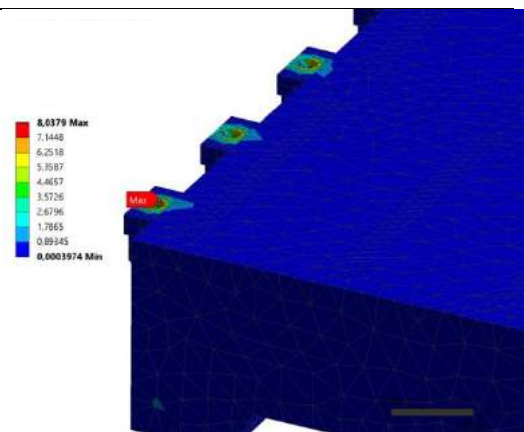
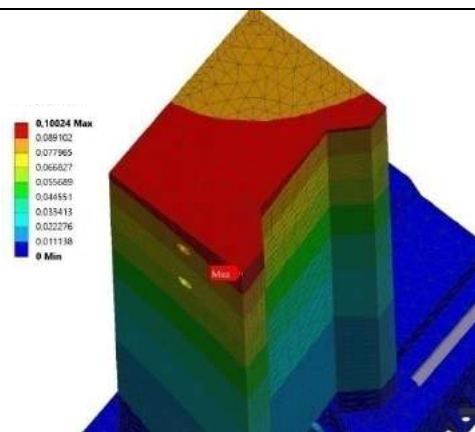
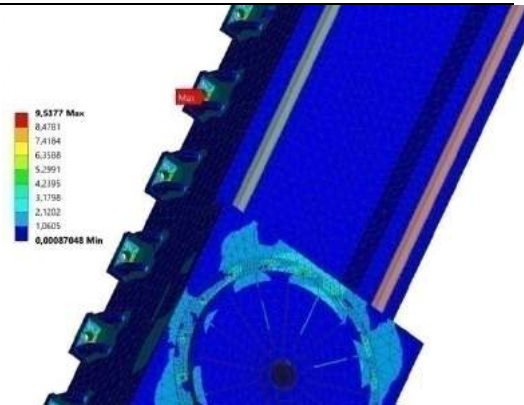
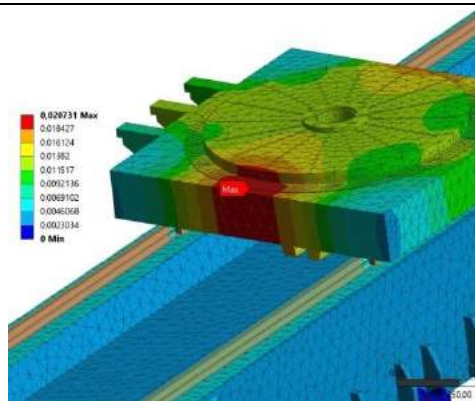
Varianta III



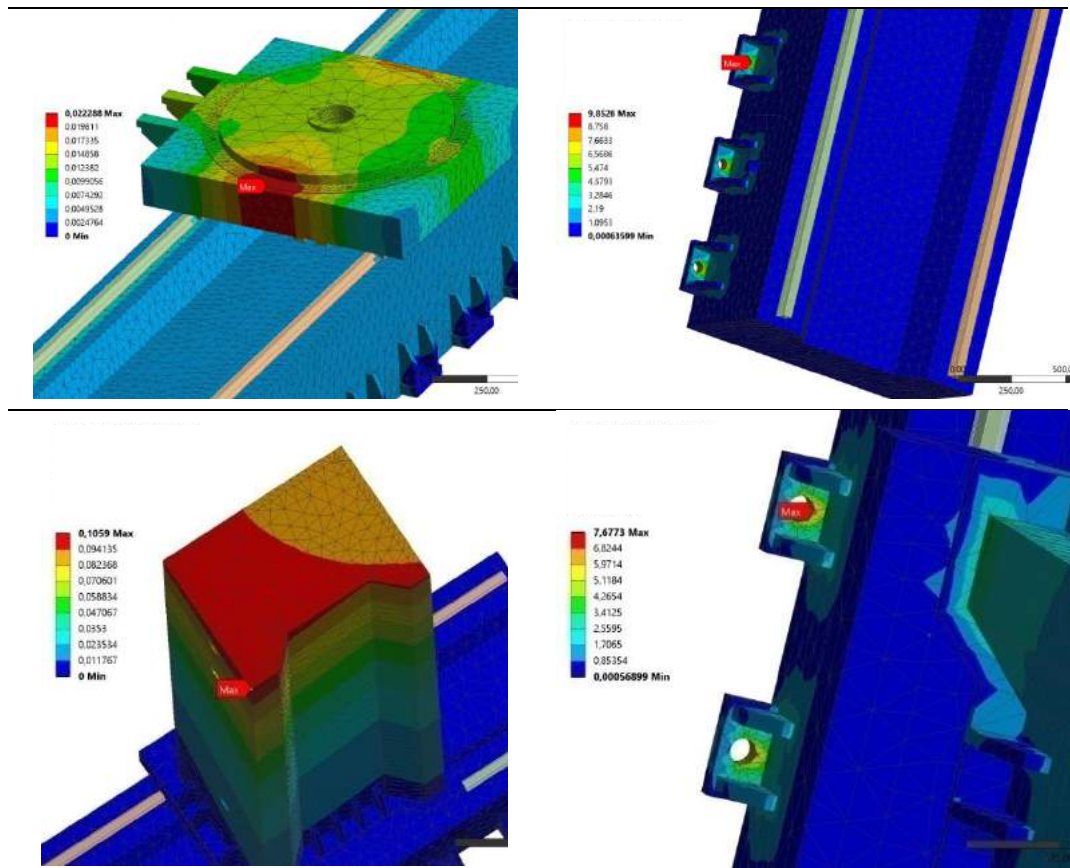
Varianta IV



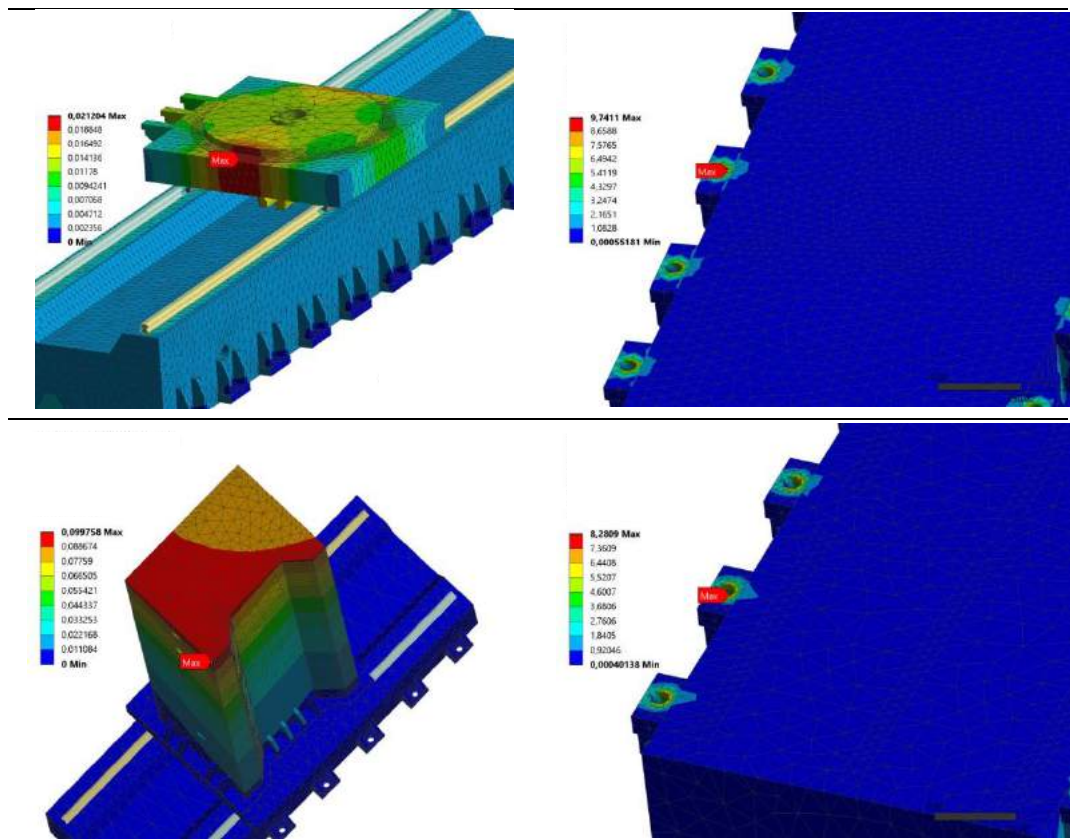
Varianta VI



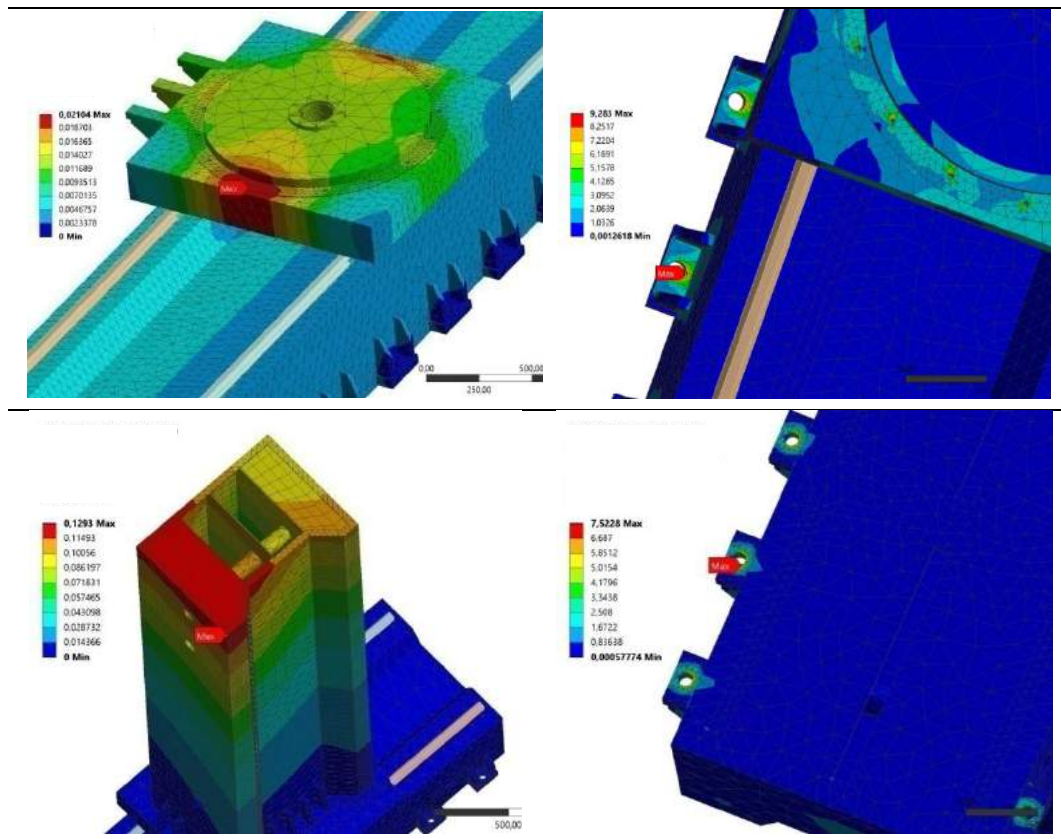
Varianta VII



Varianta VIII



Varianta IX



Příloha 7 - Zatěžování vozíků HIWIN

Příloha 7 ukazuje charakteristické rozměry a působišťe, které souvisí se stanovením zatěžování vozíků a jejich bezpečnosti [58].

