



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

POROVNÁNÍ NOSNÝCH STRUKTUR OBRÁBĚCÍCH STROJŮ Z TRADIČNÍHO A NETRADIČNÍHO MATERIÁLU

COMPARISON OF MACHINE TOOL STRUCTURES FROM TRADITIONAL AND NON-TRADITIONAL
MATERIALS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Antonín Tichý

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Ondřej Merenus

BRNO 2019

Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky
Student:	Bc. Antonín Tichý
Studijní program:	Strojní inženýrství
Studijní obor:	Výrobní stroje, systémy a roboty
Vedoucí práce:	Ing. Ondřej Merenus
Akademický rok:	2018/19

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:

Porovnání nosných struktur obráběcích strojů z tradičního a netradičního materiálu

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Úkolem práce je porovnání fyzikálních vlastností a popsání chování nosné struktury obráběcího stroje vyrobené z tradičního a netradičního materiálu. V první části student provede rešerši v oblasti frézovacích obráběcích strojů a materiálů, ze kterých jsou nosné struktury dnes vyráběny. V praktické části bude provedena volba nejvhodnějšího kinematického uspořádání rámové konstrukce dle vstupních požadavků a volba vhodného tradičního a netradičního materiálu. Práce by měla vykazovat prvky systémového přístupu a hodnocení by mělo být provedeno s vysokou mírou objektivity. Samozřejmostí je využití moderních nástrojů, které jsou při návrhu nosných struktur používány.

Cíle diplomové práce:

Rešerše současného stavu techniky.
Systematická volba nosné struktury a materiálu.
Vyhodnocení navrhovaných konstrukcí.
Závěr a doporučení.

Seznam doporučené literatury:

MAREK, Jiří. Konstrukce CNC obráběcích strojů III. Praha: MM publishing, 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.

ONDRÁČEK, Emanuel a Přemysl JANÍČEK. Výpočtové modely v technické praxi. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1990.

MÖHRING, Hans-Christian, Christian BRECHER, Eberhard ABELE, Jürgen FLEISCHER a Friedrich BLEICHER. Materials in machine tool structures. CIRP Annals [online]. 2015, 64(2), 725-748 [cit. 2017-10-16]. DOI: 10.1016/j.cirp.2015.05.005. ISSN 00078506. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0007850615001444>

ONTARIO MINISTRY OF THE ENVIRONMENT, Jim BRADLEY a VHB RESEARCH & CONSULTING INC. Evaluation methods in environmental assessment. Toronto: Queen's Printer for Ontario, 1990. ISBN 0772973164.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2018/19

V Brně, dne

L. S.

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

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

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá konstrukcí nosných struktur frézovacích strojů. Úvodní část diplomové práce je věnována stručné rešerši současného stavu techniky, zejména v oblasti nosných struktur obráběcích strojů. Zde jsou rozebrány jednotlivé díly, ze kterých se rám stroje skládá, jejich vlastnosti a vlivy, které ovlivňují jejich tuhost, stálost a tím i přesnost celého stroje. Největší a nejdůležitější část se soustředí na materiály, z nichž se tyto nosné struktury vyrábějí. Hlavním cílem diplomové práce je pak praktická část, kdy na základě získaných zkušeností je řešena konstrukce nosné struktury stroje. Bylo důležité zvolit vhodné koncepční uspořádání a materiály, ze kterých je nosný rám vyroben.

ABSTRACT

The topic of this diploma thesis is compare materials in machine tool structures. The introduction part is about literature retrieval in field of constructional components in machine frames. There are describe the individual parts of machine structures their properties and influence, witch affect their static toughness, stabilty and accuracy of the whole milling machine. The most important part is focused to the materials witch constructions of machine are made from. The main of this thesis is a practical part, where is designed the own model of milling machine solved on the basis of experiences gain. The important choose was appropriate topology and materials witch the machine frame was made.

KLÍČOVÁ SLOVA

Nosná struktura, rám stroje, konvenční materiály, nekonvenční materiály, stojan, lože, dynamická tuhost, statická tuhost, frézka

KEYWORDS

Machune tool structure, machine frame, usual material, unusual material, machine bed, dynamic toughness, static toughness, milling machine

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

TICHÝ, Antonín. *Porovnání nosných struktur obráběcích strojů z tradičního a netradičního materiálu*. Brno, 2019. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/113200>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky. Vedoucí práce Ondřej Merenus.

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji panu Ing. Ondřeji Merenusovi za odborné vedení, trpělivost, ochotu, laskavost a cenné rady, které mi poskytl během psaní mé diplomové práce. Děkuji také mé rodině a přítelkyni, kteří mě podporovali při studiu na VUT a zpracování mé diplomové práce

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

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

V Brně dne 24.5. 2019

.....

Tichý Antonín

OBSAH

1	ÚVOD.....	15
2	SOUČASNÝ STAV POZNÁNÍ	17
2.1	Rozdělení OS	17
2.2	Nosné struktury OS.....	18
2.2.1	Soustružnické stroje.....	19
2.2.2	Frézovací stroje.....	22
2.3	Konstrukční možnosti nosných soustav	24
2.3.1	Kinematiky sériového uspořádání CNC obráběcích center na nerotační součásti	24
2.3.2	Konstrukční uspořádání prvků nosných soustav	26
2.3.3	Metody návrhu nosných struktur	27
2.4	Obráběcí stroj jako systém a jako soustava	29
2.5	Systémový rozbor vlivů působící na CNC obráběcí stroj.....	30
2.6	Dynamika OS.....	31
2.6.1	Kmitání vlastní (volné).....	32
2.6.2	Kmitání buzené (vynucené).....	32
2.6.3	Kmitání samobuzené	33
2.6.4	Kmitání způsobené trhavými pohyby (Slip Stick)	34
2.7	Materiály nosných struktur	34
2.7.1	Svařence z konstrukční oceli	35
2.7.2	Litiny	36
2.7.3	Kompozitní materiály	37
2.7.4	Hybridní struktury	39
2.7.5	Přírodní materiály	40
2.7.6	Keramické materiály.....	41
3	SHRNUTÍ SOUČASNÉHO STAVU.....	43
4	PRAKTICKÁ ČÁST	45
4.1	Základní koncepce stroje	45
4.2	Varianta A – Litina	48
4.3	Varianta B – Ocel	50
4.4	Varianta C – Ocelová skořepina + beton	52
4.5	Varianta D – Beton	54
4.6	Hmotnostní a ekonomické zhodnocení.....	56
4.7	Technicko-ekonomická hodnotová analýza.....	56
4.7.1	Vlastní technicko-ekonomická analýza – PATTERN	57
5	ZHODNOCENÍ A DISKUZE	61
6	ZÁVĚR.....	63
7	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	65
8	SEZNAM ZKRATEK, SYMBOLŮ, OBRÁZKŮ A TABULEK.....	69
8.1	Seznam zkratk	69
8.2	Seznam obrázků.....	70
8.3	Seznam tabulek	71
9	SEZNAM PŘÍLOH.....	73

1 ÚVOD

Trend moderního strojírenství se nese ve znamení dynamického rozvoje všech typů obráběcích strojů, zejména pak zvyšování pružnosti stroje a stupně automatizace. Společně s požadavkem na vysokou variabilitu a produktivitu stroje roste důraz na spolehlivost, hospodárnost výroby a ekonomičnost.

Náročnost zákazníků s ještě náročnějšími požadavky nutí výrobce obráběcích strojů k neustálému vývoji a zdokonalování konstrukcí. Důsledkem toho se začaly zkoumat nové, alternativní materiály pro stavbu strojů, které by dokázaly nahradit doposud nejpoužívanější oceli a litiny. Lepších vlastností stroje lze dosáhnout buď volbou vhodnější konstrukce stroje nebo právě použitím jiných materiálů, které vykazují lepší mechanické vlastnosti než běžně používané konvenční materiály.

Nekonvenční materiály sice nezaznamenali rapidní nástup ve stavbě nosných soustav OS, díky svým dobrým vlastnostem se ale v moderních konstrukcích začínají objevovat stále častěji. Nelze ale opomenout jejich velkou nevýhodu, a to ekonomickou náročnost při jejich zpracování a obrábění jakož to i vysoké pořizovací náklady a rychlost dodání. I když nástup těchto materiálů je pozvolný rozhodně v sobě skrývají velký potenciál a můžeme s jistotou očekávat jejich velké uplatnění v budoucnu, a to nejen ve strojírenském průmyslu.

Úvodní část diplomové práce je věnována stručné rešerši současného stavu techniky, zejména v oblasti nosných struktur OS. Zde jsou rozebrány jednotlivé díly, ze kterých se rám stroje skládá, jejich vlastnosti a vlivy, které ovlivňují jejich tuhost, stálost a tím i přesnost celého stroje. Největší a nejdůležitější část se soustředí na materiály, z nichž se tyto nosné struktury vyrábějí.

Hlavním cílem diplomové práce je pak praktická část, kdy na základě získaných zkušeností je navržen výpočtový model nosné struktury. Z tohoto modelu vychází čtyři varianty, kdy v každé variantě je uvažováno s jiným stavebním materiálem. Tyto jednotlivé varianty jsou podrobeny pevnostní analýze. Výsledkem je porovnání nosných struktur z různých materiálů, s důrazem na jejich tuhost, deformaci, hmotnost a ekonomickou náročnost na výrobu.

2 SOUČASNÝ STAV POZNÁNÍ

Obráběcí stroj je vnímán jako technicky složitý funkční celek skládající se z velkého množství prvků ve společné interakci. Tyto prvky (lože, sloupy, stojany, příčníky, saně, suporty, smýkadla a také vřeteníky) společně se spojovacími elementy (vedení, pohony a jiné) tvoří nosnou strukturu (rám) stroje. Jednotlivé části rámu, pohyblivé i nepohyblivé, kterými prochází tok zatěžujících sil od řezného procesu, se vzájemně ovlivňují (vnitřní vlivy) a zároveň na ně působí vnější vlivy okolí. [1][2][3][15][16]

Na rámy obráběcích strojů jsou kladeny zdaleka největší požadavky z hlediska tuhosti, dynamické stability a tepelné odolnosti, neboť ve vlastnostech těchto součástí se odráží přesnost celého stroje. Tyto vlastnosti ovlivňuje převážně materiál a jeho základní fyzikální vlastnosti. Nejčastěji používanými materiály v konstrukci těchto dílů jsou především kvůli dostupnosti a dokonalému poznání mechanických vlastností materiály na bázi Fe-C – oceli a litiny. [1][2][7]

S rozvojem strojírenství přichází na trh alternativní materiály, které díky svým lepším vlastnostem začínají v konstrukci nosných rámu nahrazovat běžně používané materiály konvenční. Nahrazování probíhá sice pozvolným způsobem, což je přisuzováno zejména vysokým pořizovacím nákladům, náročnosti zpracování a horší obrobiteľnosti. Nejčastěji se můžeme setkat s různými druhy polymerních a cementových betonů a přírodní žulou. Významnými se ukázaly částicové a vláknové kompozity, díky své nízké hmotnosti poměrově k dobrým mechanickým vlastnostem. Využití nekonvenčních materiálů můžeme očekávat stále ve větším měřítku. [12][37][21]

V následujících kapitolách jsou provedené stručné rešerše v oblasti rozdělení OS dle různých kritérií, nosných struktur, dynamické stability stroje a materiálů používaných v konstrukci obráběcích strojů.

2.1 Rozdělení OS

CNC obráběcí stroje se běžně dělí dle několika kritérií. Nejčastější dělení je dle typu převládající pracovní operace na soustružnické, frézovací, vrtací, brousící a vyvrtávací (jednoprofesionální stroje), obráběcí centra na rotační a nerotační obrobky a multifunkční obráběcí centra. [12]

Méně časté ale důležité rozdělení, které výrazně ovlivňuje vlastnosti stroje je dělení dle kinematického uspořádání struktur. Současné obráběcí stroje jsou poměrně konzervativně konstruovány s jednoduchou sériovou kinematikou (třemi lineárními pohyblivými osami, případně přídatnými osami rotačními). Nové kinematické struktury upouští od sériové kinematiky a přichází s novou myšlenkou použití kinematiky paralelní, která se pyšní poměrně lehkou konstrukcí a dosahuje dynamičtějšího pohybu. [24]

Obráběcí stroje jsou také konstruovány v různých variantách a velikostech. Od kompaktních a malých strojů pro obrábění součástek vážících jen několik gramů až po několika metrové stroje pro několika tunové obrobky. Tato skutečnost dává vzniknout dalšímu velmi důležitému členění, a sice dělení dle velikosti stroje na malé, střední a velké. Každý výrobce může mít tyto

hranice definované jinak nebo jsou pro něj důležité rozdílné parametry, a proto se rozdělení strojů podle velikosti podrobně nevěnuje žádná literatura. Z hlediska použití materiálů nosných struktur, teplotní stálosti či přesnosti stroje je však velmi důležité určit do jaké kategorie bude stroj spadat. Z těchto důvodů se v této práci budou stroje řadit do velikostní kategorie dle parametrů uvedených v Tabulce 1). [12][21]

Tab. 1) Velikostní kategorie CNC obráběcích strojů

Velikost	X, Y, Z [mm]	Hmotnost obrobku[kg]	Přesnost polohování [μm]
MALÉ	<1000	<1000	2-10
STŘEDNÍ	1000–4000	1000 – 10 000	10-25
VELKÉ	>4000	>10 0000	>25

Dalším dělením OS může být také dle zpracovávaného materiálu na stroje na kovy, dřevo, plast a jiné. Dle výkonu práce můžeme stroje rozdělit také na stroje hrubovací s výkonným elektromotorem a přesné stroje na dokončovací práce. [19]

V této diplomové práci bude využito rozdělení především dle velikosti stroje, dle typu převládající operace a dle obráběného materiálu.

2.2 Nosné struktury OS

Základním celkem každého obráběcího stroje je rám (nosná struktura). Rám je poměrně složitá soustava pohyblivě a nepohyblivě spojených těles a částí, kterými prochází a uzavírá se tok zatěžujících sil vznikajících řezným procesem mezi obrobkem a nástrojem. Na rámy obráběcích strojů jsou kladeny zdaleka největší požadavky z hlediska tuhosti, pro zachycení řezných a setrvačných sil (kromě statické tuhosti se na celkové deformaci podílí počet a tuhost spojů, styková tuhost kontaktních ploch a vlivy odlehčovacích otvorů), dynamické stability (tlumení vibrací, rázů a chvění vznikající při obrábění, při zrychlování a zpomalování pohybujících se částí stroje), odolnosti proti opotřebení vodících ploch apod.

Mezi základní části rámu patří: lože, stojany, příčníky, smykadla a vřeteníky. Především na vlastnostech těchto částí závisí v konečném důsledku výrobní přesnost stroje. U velkých strojů je pak deformace způsobena především samotnou vahou jednotlivých částí stroje, která musí být při návrhu zohledněna případně kompenzována. [15][16][29]

Při konstrukci rámu musí konstruktér respektovat všeobecně platné požadavky:

- › kvalitní materiál rámu;
- › dobrá statická tuhost;
- › vyhovující dynamická a tepelná stabilita;
- › umožnění dobrého odvodu třísek;
- › jednoduchá a efektivní výroba;
- › malá hmotnost;
- › snadná manipulovatelnost;
- › dobré uložení na základ. [7]

2.2.1 Soustružnické stroje

CNC soustružnické stroje a obráběcí centra na rotační součásti můžeme rozdělit na stroje vodorovné a svislé (karusely). Mezi základní části rámu těchto strojů patří především lože. U karuselů a obráběcích center na rotační součásti pak i stojany a příčníky. [1][2][19]

Základní skladba vodorovného soustruhu je zobrazena na Obr. 1.

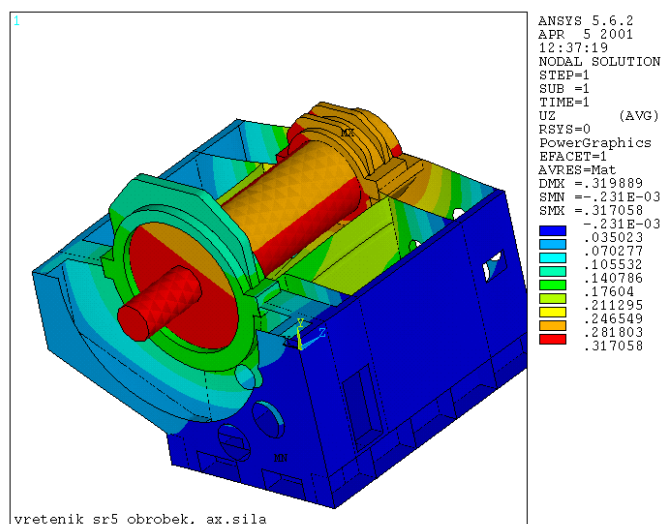


Obr. 1) Univerzální CNC hrotový soustruh bez krytován – MASTURN 550i [18]

Lože je základní nosná část stroje skříňového tvaru, nepohyblivá připevněná k základně stroje. Délka lože zpravidla výrazně převládá nad výškou. Lože musí vykazovat vysokou tuhost, aby nedošlo k prohnutí vahou ostatních částí a krutu zatěžujícími silami vznikajícím řezným procesem. K dosažení dostatečné tuhosti v ohybu a kroucení se docílí vhodným profilem lože, pokud možno uzavřeným a vyztuženým žebry. Důležitá je také dynamická stabilita a schopnost pohlcovat všechny formy vibrací. Tvar lože musí umožňovat dobrý odvod třísek, aby nedocházelo k jejich hromadění a tím teplotní dilataci, která ovlivňuje přesnost stroje. [12][25][27]

Nejčastěji se lože vyrábí z litiny nebo jako svařované konstrukce. Novinkou ale není ani provedení z kompozitních materiálů nebo přírodní žuly. Stavební materiály rámu budou více rozebrány v kapitole 2.7 Materiály nosných struktur. Lože je vhodné navrhovat v kompaktní velikosti a s nižší hmotností, ne však tak, aby to ovlivňovalo požadované statické a dynamické vlastnosti. U vodorovných soustruhů se konstruuje lože buď vodorovné nebo šikmé. [12][25][27]

Vřeteník, koník a suporty mají skříňový charakter a slouží k umístění pohonných a posuvových systémů stroje a pracovních vřeten. Vřeteník plní funkci uložení pracovního vřetene, přenáší se na něj radiální i axiální síly vznikající řezným procesem a hmotností obroku. Vřeteník výrazně ovlivňuje kvalitu celého stroje, musí být dostatečně tuhý a tlumit vibrace, proto bývá vhodně žebrován. V žebrech bývají umístěny ložiska. Pevnostní posouzení skříňových členů se provádí metodou konečných prvků (MKP) – viz Obr. 2. U modernějších strojů může být naproti hlavnímu vřetenu protivřeteno, které je s ním synchronně poháněno. [25][26][27][28]

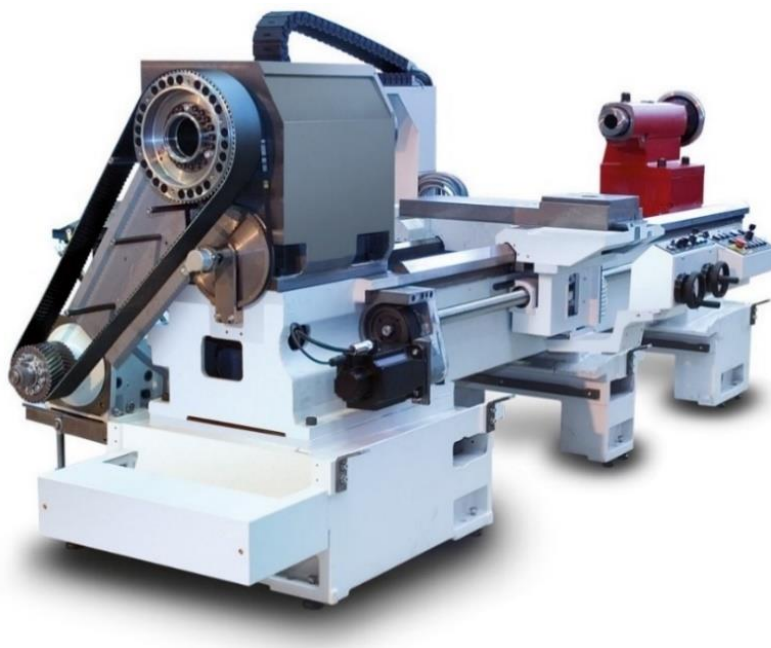


Obr. 2) MKP – vřeteník [28]

Suport tvoří spojovací člen mezi ložem a nástrojem. Zachycuje a přenáší síly vznikající při soustružení. Skládá se ze soustavy vzájemně pohyblivě spojených saní, která umožňuje nastavení nástroje do potřebné polohy vzhledem k obrobku. Suporty musí být dostatečně tuhé v ohybu, krutu i tlaku ale také stykově tuhé ve spojení jednotlivých částí, která jsou převážně posuvná.[25][26][27][28]

Koník je posuvný po loži. Osa koníku je soustředná s osou vřetene a složí především k upínání obrobku mezi hroty. Jeho provedení má podobný vliv na tuhost stroje jako tuhost vřeteníku.

Tělesa převodových skříní plní nosnou funkci kinematických řetězců pohonu, proto jsou na ně kladeny vysoké nároky na statickou a dynamickou tuhost. Skříně musí být dostatečně tuhé, aby eliminovali chvění, které vede k nepřesnosti stroje a nárůstu nežádoucího hluku. Tyto struktury skříňového charakteru jsou zatíženy především tíhovými silami, řeznými silami a reakcemi z pohonných mechanismů. Detailní pohled na skříňový vřeteník, support, lože a koník je vidět na Obr. 3.[25][26][27][28]



Obr. 3) Stroj MASTURN Kovosvit Mas – pohled na lože, vřeteník, support a koník [18]

Soustružnické stroje se svislou osou vřetená, též nazývané karusely (Obr. 4), se používají k soustružení středních a velkých rotačních součástí, u kterých převládá průměr nad délkou. Poznávacím znakem karuselů je velká vodorovná upínací deska se svislou osou otáčení, na níž je upnut obrobek. Karusely se dále skládají z lože, jednoho nebo dvou stojanů, horní příčky spojující oba stojany v uzavřený rám a příčnicku se suportem. [19] [42]

Nejnáročnějším konstrukčním prvkem je vlastní upínací deska, zvláště pak při větších rozměrech s ohledem na její uložení a tuhost. Uložení může být valivé, kluzné (i kombinované) či hydrostatické v axiálním i radiálním směru. Toto uložení má výrazný vliv na rozměrovou a tvarovou přesnost obrobené součásti. Upínací desky jsou nejčastěji vyrobeny z ocelolitině nebo šedé litiny, z jednoho kusu nebo dělené. [12][15][19]

Lože a stojany tvoří hlavní rám stroje. Dle velikosti mohou být rámy jedno stojanové (malé, průměr stolu 1200 mm) a dvoustojanové (velké, průměr stolu až 20000 mm). Lože a stojany musí splňovat řadu hledisek, především dobrou statickou a dynamickou tuhost, s dobrým odvodem třísek a optimální hmotností. Dlouhodobá přesnost stroje závisí na odolnosti proti opotřebení vodících ploch, stálosti tvaru a tuhosti rámu. Stojany karuselů jsou zásadně uzavřeného profilu obvykle vyztužené nízkými vnitřními žebry s ohledem na to, že dutiny stojanů se často využívají k průchodu protizávaží suportů, vřeteníků apod. [12][15][19]

Příčník je buď pevný nebo se posouvá po vedení ve stojanu. Konstrukce příčnicku je skříňového uzavřeného tvaru, s vhodným žebrováním pro dosažení lepší tuhosti (žebra mohou být provedena přes celý průřez). Příčník musí být dostatečně pevný, aby nedocházelo k ohybu vlastní vahou a vahou suportu a smýkadla, který se po něm pohybuje. Příčník, se podobně jako stojany, u soustružnických strojů používají pouze v konstrukci rámu svislých soustruhů (karuselů) a obráběcích center. [12][15][19]



Obr. 4) Dvoustojanový karusel s pojízdným portálem ČKD SKDY [42]

Smýkadlo má zpravidla čtyřboký profil a slouží pro uchycení nástroje. Uložení smýkadla je hydrostatické, aby dosahovalo vysoké dynamické tuhosti a tlumení při působení velkých řezných sil. Smýkadlo je nejslabším členem celého svislého soustruhu. Např. při obrábění dlouhých válcových ploch je smýkadlo značně vyloženo a tím velmi nepříznivě namáháno. Poměrně novou konstrukcí jsou inverzní vertikální soustruhy, kdy obrábění probíhá “nad hlavou“, aby se obrobek neohříval od horkých třísek. [12][15][16][17]

2.2.2 Frézovací stroje

Frézovací stroje neboli frézky patří mezi nejuniverzálnější a nejvýkonnější obráběcí stroje. Frézky jsou určeny k obrábění rovinných ploch, tvarových a šikmých ploch, zkosených hran, frézování děr a dutin, obrábění drážek, závitů a zubů ozubených kol. Upínací plocha stolu a velikost kužele pro upnutí nástroje určuje velikost frézky. Dalšími důležitými parametry, které nás zajímají je maximální délka pohybu pracovního stolu či vřeteníku, rozsah otáček vřetena a rychlosti posuvů (možnost regulace), výkon elektromotoru vřetena a kvalitativní parametry u obrobenej plochy. Na frézovací stroje jsou kladeny vysoké požadavky na statickou a dynamickou tuhost všech částí rámu stroje a na vedení stroje. [1][2][7][8][9][10]

Frézovací stroje můžeme dělit dle osy rotace na horizontální a vertikální, přičemž některé jsou konstruovány jako konzolové, jiné jako stolové anebo portálové. Na Obr. 5 je znázorněn vertikální frézovací stroj KOVOSVIT MCV 1000 s krytováním a také bez krytování, kde jsou mimo jiné popsány hlavní části nosné struktury stroje.[1][2][7][8][9][10]



Obr. 5) Vertikální frézovací stroj KOVOSVIT MCV 1000 (s krytováním a bez krytování) [6]

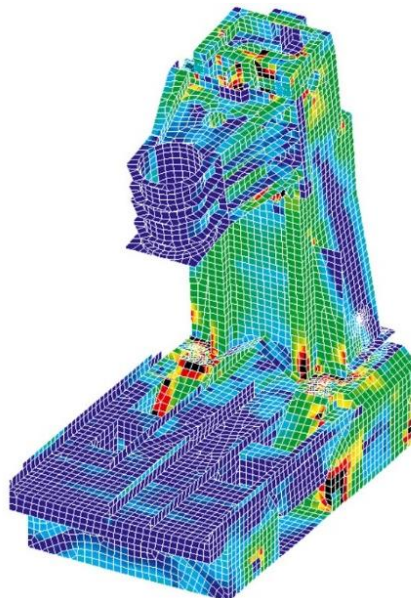
1. Lože stroje
2. Upínací plocha stolu 1 300 × 670 mm
3. Lineární valivé vedení – osa X – zdvih 1016 mm
4. Lineární valivé vedení – osa Y – zdvih 610 mm
5. Lineární valivé vedení – osa Z – zdvih 720 mm
6. Max. zatížení stolu - 1 200 kg
7. Vřeteník
8. Motor
9. Dvoustupňová převodovka

Deformace základních částí rámu (lože a stojanu) a vodících ploch frézovacího stroje, má zásadní vliv na zachování vzájemné nastavení polohy mezi nástrojem a obrobkem, je to základ charakteristiky stroje. Musí vykazovat dostatečnou tuhost, musí odolávat všem formám chvění (volné, vynucené, samobuzené) a tím zajistit výrobní přesnost stroje a jakost obrobenej plochy. Lože a stojany jsou konstruovány v různých velikostech, variantách, materiálech a různým konstrukčním uspořádáním. Všechny tyto aspekty přímo ovlivňují výsledné chování stroje. Na lože se přenáší cyklicky proměnlivé zatížení od řezného nástroje a taky váha od ostatních částí

frézky. Lože i stojan musí přenášet jak ohybové, tak i krutové zatížení, proto je vyztužujeme žebry. Dalším důležitým požadavkem na lože je dobrý odvod třísek. Při nedokonalém odstraňování se mohou horké třísky hromadit a způsobovat tepelné dilatace stroje a tím nepříznivě ovlivnit přesnost obrábění. Proto jsou v loži nezbytné skluzy, kudy mohou třísky padat do zásobních nádob umístěných v základu stroje. Požadavky na lože a stojan frézek jsou podobné jako u soustružnického stroje popsáné v kapitole 2.2.1. Soustružnické stroje [7][8][12]

Pracovní stůl nejčastěji obstarává pohyb příčný a podélný. Může být realizován jako křížový stůl uložený na konzole (konzolové frézky) nebo na loži stroje. Přes obrobek se na pracovní stůl a vedení stolu přenáší axiální i radiální zatížení od obrábění. Stůl se konstruuje jako plochá a kompaktní součást s vysokou torzní tuhostí s tlumícími účinky. Vymezení vůlí ve vedení se odráží v přesnosti obrábění. [1][2][3][7][31]

Vřeteník je nosičem pracovního vřetene, srdce stroje. Od řezného procesu se na něj přenáší jak axiální, tak radiální zatížení, od pracovního vřetene samozřejmě teplo a vibrace. Může být aplikován na vertikálních i horizontálních CNC strojích. Vřeteník může být koncipován jako pevný nebo jako vertikálně posuvný ve vedení stojanu nebo výsuvný (se smýkadlem). Všechny díly vřeteníku jsou pečlivě kontrolovány a je dbáno na nejvyšší maximální přesnost a jakost, což zajišťuje následnou vysokou geometrickou a pracovní přesnost, spolehlivost, životnost vřeteníku a minimální nároky na údržbu a obsluhu. Požadavky na skříň vřeteníku: maximální symetrie (z důvodů symetrických teplotních dilatací), minimální množství otvorů (otvory snižují tuhost) a staticky přeuročená konstrukce (zvyšuje tuhost). Vřeteník bývá neustále kontrolována podrobován provozním zkouškám, měření hluku, teploty a vibrací. Při konstrukci nosných struktur se využívá výpočtů metodou konečných prvků pro optimalizaci některých dílů z hlediska statické tuhosti a dynamických vlastností (Obr. 6.) [6][25][26][30]



Obr. 6) Optimalizace nosné struktury stroje MKP [6]

Frézovací obráběcí centra jsou konstrukčně odvozena z jednoprofesních CNC obráběcích strojů (frézek). Je pro ně charakteristická stavebnicovost, možnost pohybů ve více než jen třech osách a mohou být provedena v různých variantách. Základní rozdělení je dle osy vřetena na vodorovná a svislá obráběcí centra na nerotační součásti. Mohou být konstruovány s pevným nebo pohyblivým stojanem, s výsuvným smýkadlem nebo jako portálová obráběcí centra (horní gantry, spodní gantry, s pevným stolem a pohyblivým stojanem).[7][12][14]

2.3 Konstrukční možnosti nosných soustav

Při návrhu nosné soustavy obráběcího stroje má do jisté míry výrobce a konstruktér možnost ovlivnit spoustu faktorů, které ovlivní chování celého rámu stroje. Tyto faktory je nutné posuzovat v komplexnosti podmínek, které se mohou lišit případ od případu v návaznosti na konkrétní provozování stroje – jsou to především:

- materiály nosných dílců;
- konstrukční provedení dílců (topologie) – tvarování, žebrování, tloušťka stěn, proporce dílů;
- spoje – pevné a pohybové spojení, množství, poloha a jejich provedení. [12]


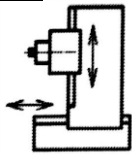

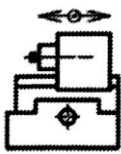
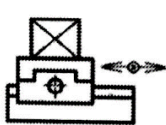
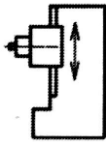
2.3.1 Kinematiky sériového uspořádání CNC obráběcích center na nerotační součásti

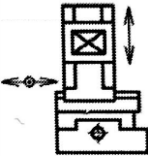

V této diplomové práci je cílem konstrukce frézovacího centra, proto se v této kapitole budeme zabývat pouze různým konstrukčním provedením CNC obráběcích strojů na nerotační součásti.

Pro základní klasifikaci koncepčních variant obráběcích center (dále OC) na nerotační součásti lze využít třídění dle rozdělení tří základních translačních pohybů mezi obrobek – nástroj (O–N). Základní pohyby mohou být doplněny dalšími rotačními, popř. translačními pohyby.

Nejčastější koncepční varianty OC s vodorovným vřetenem používané v praxi bude rozebrány v Tab. 2. [12]


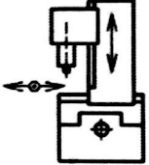

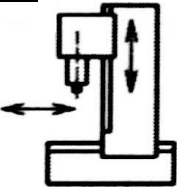

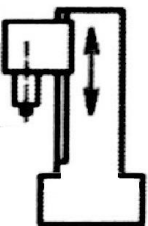
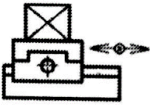
Tab. 2) Třídění CNC obráběcích center pro nerotační součásti s vodorovnou osou vřetená [12]

OBRÁBĚCÍ CENTRA NA NEROTAČNÍ SOUČÁSTI S VODOROVNOU OSOU VŘETENA		
Souřadné osy v obrobku	Souřadné osy v nástroji	Popis
X 	ZY 	Rozdělení pohybů – podélný pohyb stolu, příčný a svislý pohyb nástroje vytváří dobré podmínky pro tuhost stroje a zároveň pro dobrý odvod třísek. Moderní koncepce umožňuje automatickou výměnu nástrojů a především obrobků.
Y 	XZ 	Koncepční varianta vhodná pro menší a středně těžké obrobky. Výhodou je velmi dobrý odvod třísek gravitací (stroj se neohřívá od usazených třísek), což je často hlavní požadavek pro zařazení stroje do automatických výrobních soustav.
ZX 	Y 	Koncepce odvozena od přesných vyvrtávacích strojů. Pevný stojan s posuvným vřeteníkem ve vedení stojanu zaručuje dobrou tuhost a přesnost.

<p>XZY</p> 	<p>O</p> 	<p>Stojan stroje nese svisle přestavitelný stůl s obrobkem a vykonává všechny tři základní translační pohyby. Vřeteník je výsuvný v pomocné ose W pro kompenzaci délky nástroje.</p>
----------------------------------------------------------------------------------------------	--------------------------------------------------------------------------------------------	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

V Tab. 3) jsou popsány a schematicky naznačeny nejčastěji využívaných variant OC se svislým vřetenem a rozdělení základních souřadných os mezi obrobkem a nástrojem. [12]

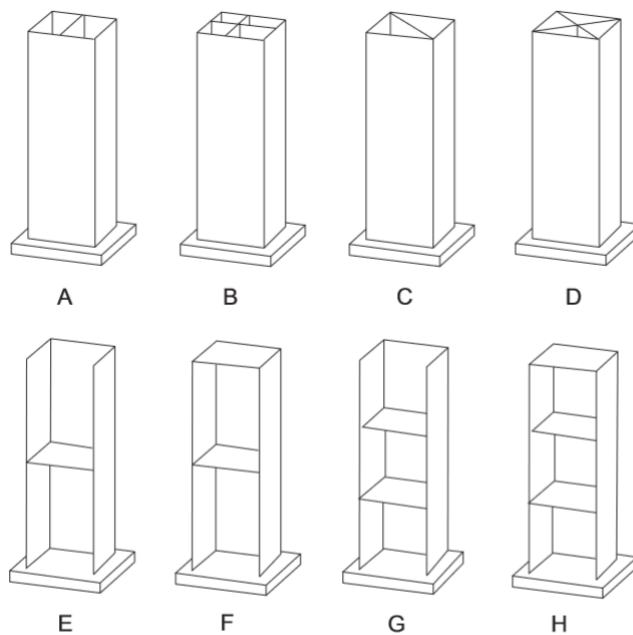
Tab. 3) Třídění CNC obráběcích center pro nerotační součásti se svislou osou vřetená [12]

OBRÁBĚCÍ CENTRA NA NEROTAČNÍ SOUČÁSTI SE SVISLOU OSOU VŘETENA		
Souřadné osy v obrobku	Souřadné osy v nástroji	Popis
<p>O</p> 	<p>XYZ</p> 	<p>Varianta s translačním vřetenem ve všech třech základních souřadnicích je vhodná zejména pro obrábění rozměrných součástí. Za účelem zkrácení vedlejších časů a prostojů je většinou pracovní plocha dimenzována pro upnutí dvou obrobků, které se střídavě obrábějí.</p>
<p>X</p> 	<p>YZ</p> 	<p>Koncepce s posuvným stojanem, po kterém se svisle pohybuje vřeteník s nástrojem, kdy obrobek vykonává pouze pohyb v souřadnici X je nejčastěji používanou variantou. Vhodným rozdělením souřadnic mezi obrobek – nástroj docílí konstrukce dobrých parametrů, zejména tuhosti a přesnosti stroje.</p>
<p>XY</p> 	<p>Z</p> 	<p>Koncepční řešení s pevným stojanem, po kterém se svisle pohybuje vřeteník s nástrojem má dobrý předpoklad pro dobrou tuhost celého rámu stroje. Podélný a příčný pohyb zastává obrobek. Tato koncepce umožňuje dobrou automatickou výměnu obrobků.</p>
<p>YX</p> 		

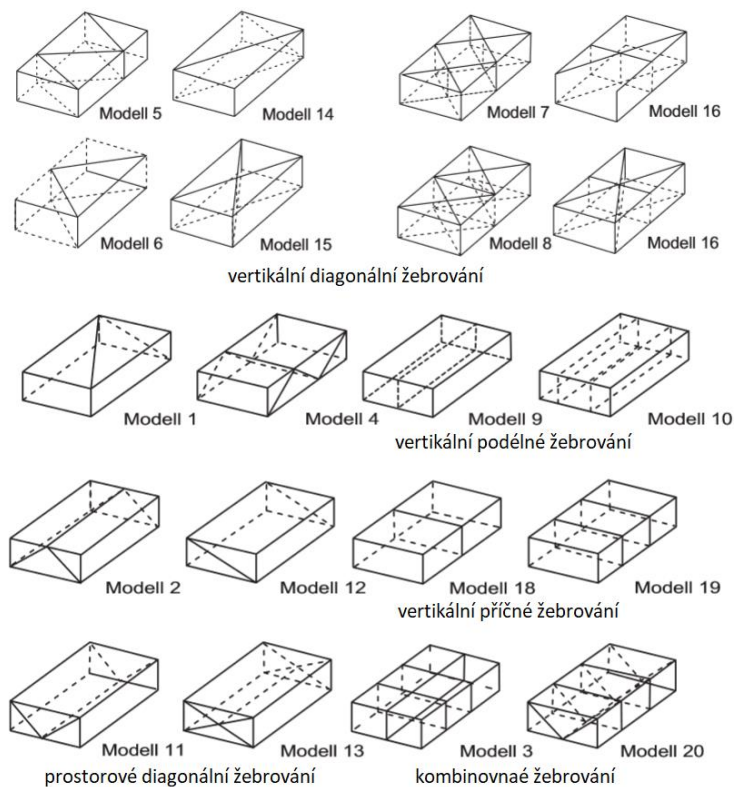
Výše uvedené koncepce tvoří přehled nejčastěji používaných variant, nejsou však konečné. V praxi se vyskytuje více variant, kdy translační pohyby nahrazují rotační nebo jsou přidány další translační pohyby. V dnešní době samozřejmě nejsou žádnou výjimkou stroje se šesti CNC řízenými osami. [12]

2.3.2 Konstrukční uspořádání prvků nosných soustav

Jak jsme se dozvěděli výše, nosná soustava je namáhána převážně ohybovým a krutovým zatížením. Tyto dva základní druhy namáhání je žádoucí dále zkoumat a studovat. Statické vlastnosti je možné vyhodnocovat u prvků s jedním hlavním směrem deformace s nepříliš složitou geometrií, které lze považovat za nosníky (např. stojany). Odolnost nosných rámců (loží, příčníků, stojanů) vůči ohybu i krutu lze zlepšit účelným žebrováním. Teoreticky možné rozložení žebrování stojanů dle Brechera [41] je znázorněno na Obr. 7. Příkladné žebrování loží je na Obr. 8. Je vhodné mezi sebou jednotlivé varianty kombinovat. [7][41]



Obr. 7) Teoretické možnosti žebrování stojanů [41]



Obr. 8) Teoretické možnosti žebrování loží [41]

Základní části rámu stroje (loží, stojanů), které se vzájemně nepohybují, nebo delší lože skládající se z několika dílů, se spojují šrouby a kolíky, popř. pery. Předpětí spojovacích prvků (šroubů) musí vždy zajišťovat takové spojení, aby výsledná tuhost rámu stroje byla taková, jako kdyby byl vyroben z jediného kusu. Z této podmínky je tedy nutno vycházet při dimenzování spojovacích šroubů a stykových ploch.[12]

2.3.3 Metody návrhu nosných struktur

Hlavním úkolem konstruktéra při návrhu stroje patří předvídaní chování stroje v různých situacích. Proto je nutné provádět různé typy výpočtů a analýz a na základě jejich výsledků navrhnout konstrukci s optimálním dimenzováním. Abychom lépe pochopili dnes již běžné použití sofistikovaných výpočtů a simulací pomocí metody konečných prvků pokusíme se na pár řádcích vystihnout stěžejní body historie, které této metodě předcházely. [11][13]

V průběhu vývoje teorie pružnosti lze dle Fusek, Rojíček [13] rozeznat dvě základní vývojové větve. První bychom mohli charakterizovat jako inženýrskou větev, která vznikla z potřeb průmyslu a mohli bychom ji nazvat jako „nauku o pružnosti a pevnosti“, která řeší problém především technickým přístupem. Druhá větev se drží spíše výpočtů a dala by se pojmenovat „matematickou teorií pružnosti“, která usiluje zejména o matematický přístup a správnost výsledných vzorců. Jelikož oba přístupy se snaží řešit stejný problém, je zřejmé, že se navzájem nevylučují, ale naopak spolu kooperují a současná teorie pružnosti je sloučením obou přístupů. [13]

Podobně tomu bylo i v případě vývoje metody konečných prvků (MKP). Za matematický přístup by se dalo považovat přístupů, kde se využívá tzv. interpolačních funkcí k získání aproximativního výsledku řešeného problému. Vědecké pilíře metody konečných prvků vznikaly důsledkem potřeby řešit komplexní problémy v leteckém a kosmickém průmyslu. Výpočtáři, bez podpory počítačové techniky, řeší problémy přístupem, který by se dala shrnout pod názvem maticové metody mechaniky (inženýrský přístup). Za průkopníky můžeme považovat práce A. Hrennikoffa (1941), který rozděluje oblast pomocí mřížky a R. Couranta, který rozložil oblast na konečné množství trojúhelníkových prvků. Ačkoliv byly jejich přístupy v zásadě odlišné, hlavní myšlenka byla podobná: diskreditace spojitě oblasti do množiny samostatných elementů. Za absolutně důležité lze při vývoji MKP považovat rozvoj výpočetní techniky.[5][11][13]

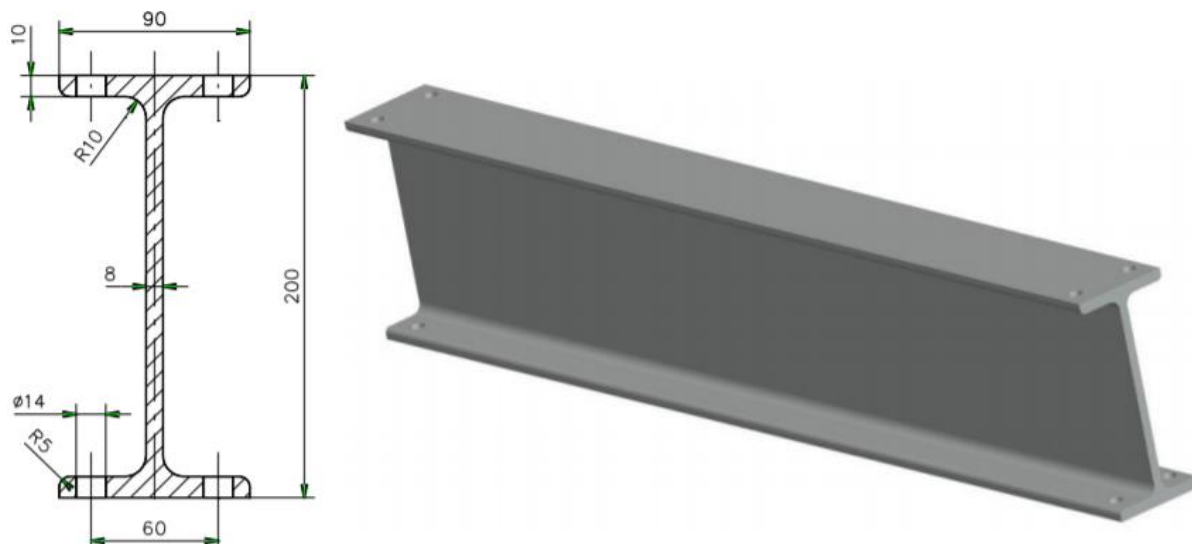
Metoda konečných prvků

Metoda konečných prvků – MKP (angl. Finite element method – FEM) je numerická metoda, která se používá k řešení komplexních problémů pružnosti a dynamiky. Základním principem MKP je rozdělení tělesa na menší části – elementy. Pro každý typ prvků je kromě dimenze a tvaru charakteristický počet a poloha jeho uzlů. Uzly sítě jsou body, v nichž hledáme neznámé parametry – např. posunutí, natočení, ze kterých dále počítáme napětí atd. Hustota sítě a topologie prvků zásadně ovlivňují kvalitu výsledků a potřebnou kapacitu pro přesné řešení.[11][5][4]

Výhoda numerických metod je, že jimi dokážeme řešit i tělesa složitějších tvarů, na rozdíl od analytického přístupu, kde jsme omezeni pouze na řešení elementárních těles. Faktickým omezením při výpočtu MKP je kapacita hardwaru a časová náročnost. Výsledek se vztahuje pouze na konkrétní řešený případ, jakékoliv změny, optimalizace atd. vyžadují celý složitý proces výpočtu opakovat. Tento přístup může být časově náročný – délka výpočtu je závislá na počtu uzlů, resp. rovnic. [4]

Proto je nutné výpočtový model značně zjednodušit a neuvažovat při výpočtu a tvorbě sítě konečných prvků se složitými detaily (zaoblení, zkosené hrany, odlehčovací otvory), které neovlivňují geometrii rámu, ale výrazně navyšují počet rovnic a tím i nepříznivě ovlivňují časový průběh výpočtu. [11][5]

Na Obr. 9 je zobrazen nosník a v Tab. 4 je zdokumentován vliv rozměrů a použitých konstrukčních prvků na počet vygenerovaných elementů a na počet rovnic. [11]



Obr. 9) Průřez a model nosníku [11]

Tab. 4) Počet elementů a počet rovnic [11]

Varianta	Délka nosníku [mm]	Počet elementů	Počet rovnic
Hladký	300	268	4890
Čtyři otvory	300	471	9147
Zaoblení	300	1072	19515
Zaoblení + 4 otvory	300	1126	19887
Hladký	600	512	9078
Čtyři otvory	600	700	13254
Zaoblení	600	2050	35553
Zaoblení + 4 otvory	600	2471	43497
Hladký	900	771	13761
Čtyři otvory	900	1129	20472
Zaoblení	900	2808	49854
Zaoblení + 4 otvory	900	3168	54828

Metoda konečných prvků je v moderním strojírenství velmi významným nástrojem pro numerické analýzy nejen mechanických vlastností konstrukcí. Nutno podotknout, že tato výpočtová metoda není omezena na řešení problematiky pouze ve strojírenství, ale lze ji uplatnit při řešení velkého spektra fyzikálních problémů (tepelné, elektromagnetické, fluidní atd.). [4]

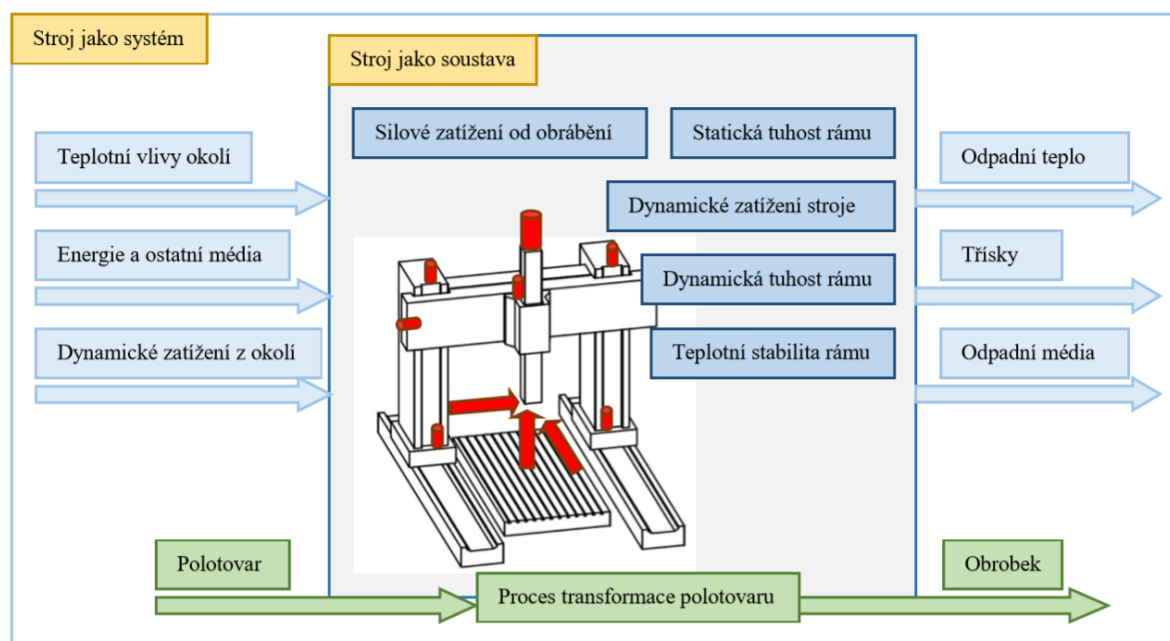
Za nejpoužívanější komerční program pro výpočty řešené konečnými prvky je software ANSYS nebo Nastran (Nasa Structural Analysis). Nastran byl prvním takovým programem, který byl v 60. letech minulého století vyvinut a spojen s dobýváním vesmíru (NASA). [13]

2.4 Obráběcí stroj jako systém a jako soustava

Pojem „systém“ vznikl nekoordinovaně a v literaturách je popsán několika způsoby. Skrývají se pod ním významy jako strukturovaný, organizovaný, uspořádaný apod. Obecně je ale systém vnímán, jako účelově definovaná množina prvků (elementů), mezi kterými je určitá vazba (vztah). Tyto prvky a vzájemné vazby mezi nimi tvoří jeden celek – systém. [23]

Nesrozumitelnost těchto pojmů měl za následek, že označení systémem se používal ve dvou významově odlišných případech. V knize [23] Expertní inženýrství v systémovém pojetí je systém definován takto: *K přesnému vymezení došlo v anglickém jazyce, kdy ke slovu systém byly přiřazeny přídavná jména „real“ a „abstract“.* *Lingvistické rozlišení nebylo dostačující, proto termín „reálný systém“ nazýváme soustavou a „abstraktní systém“ dále používá pojem systém.* [23]

Pokud člověk chce realizovat nějakou složitou činnost, zejména ty zahrnující různé druhy analýz složitých objektů, procesů a výpočtů je vhodné použít právě systémový přístup. Dříve se používal přístup množinový anebo celostní. U množinového přístupu neuvažujeme vazby a všechny složitější množiny prvků byly rozčleněny na prvky samostatné, které pak byly řešeny zvlášť. V první polovině minulého století bylo doslova šokem pro vědu zjištění, že chování složitějších entit (složené z většího množství prvků) nelze posuzovat dle izolovaných analýz a chování jednotlivých částí, ale musí se k nim přistupovat jako k celku – proto celostní přístup. Z těchto důvodů je nutné přistupovat k nosné struktuře stroje jako k systému stroje nebo soustavě stroje. Pokud budeme nad strojem uvažovat jako nad systémem (abstraktní systém) uvažujeme tedy systém stroje a okolí stroje a jejich vzájemnou interakci. Pokud se ale budeme bavit o stroji jako o soustavě, bavíme se o reálném systému prvků (motory, dílce) a vazeb mezi nimi (pohony, uložení). Na Obr. 10 je znázorněn stroj jako systém a jako soustava. [22][23]



Obr. 10) Systém stroje a soustava stroje

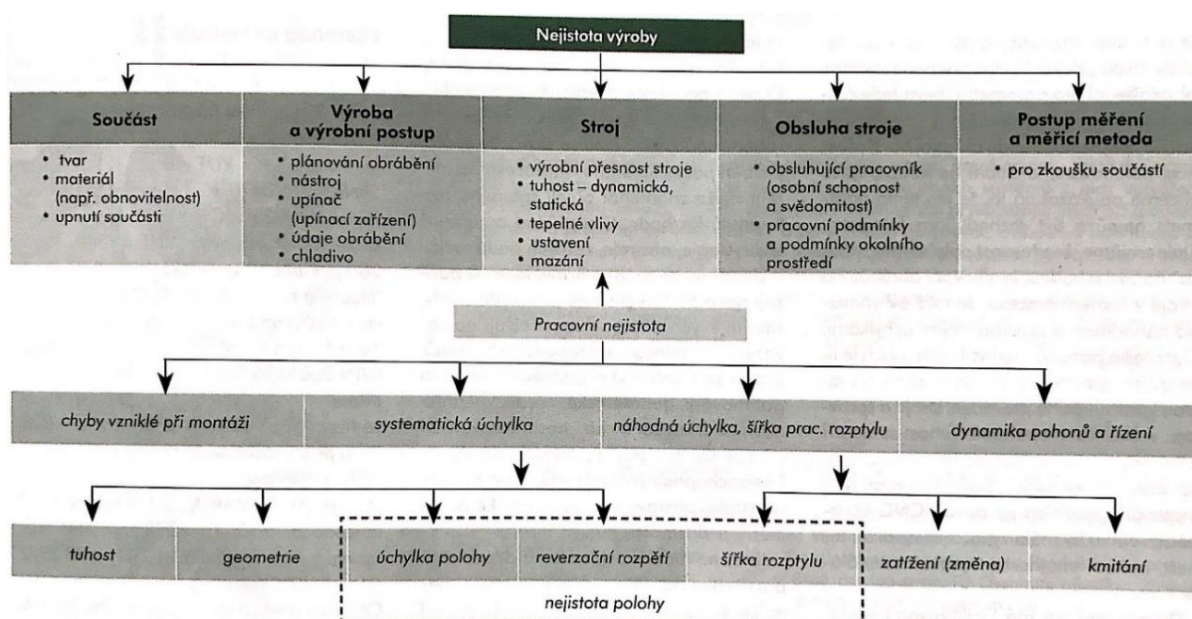
2.5 Systémový rozbor vlivů působící na CNC obráběcí stroj

Z předchozí kapitoly víme, že CNC obráběcí stroj je složité zařízení, na které působí spousta vnitřních i vnějších faktorů (působení okolí, obsluhy ale i chování stroje při obrábění). Z těchto důvodů je systémový přístup tím správným krokem k docílení toho, co od stroje uživatelé požadují. Tedy k stabilitě chodu stroje, opakovatelné přesnosti obrábění a bezporuchovosti. Při předávce stroje koncovému zákazníkovi nebo dalšímu výrobcí OS je nutné, aby výrobce stroje přesně definoval a smluvně ošetřil, za jakých podmínek stroj dosáhne prezentovaných vlastností. [12][22][23]

Za vnější vlivy působící na stroj považujeme například: vibrace, nečistoty (nadměrná prašnost), teplo – vytápění haly, vnější působení slunečního svitu, proudění teplého vzduchu a teplotní výkyvy (stejně tak i chlad). Z těchto důvodů výrobci uvádějí například rozsah provozních teplot, za kterých je zaručena přesnost stroje. [12][22][23]

Mimo tyto vnější vlivy působí na stroj a zejména na přesnost obrábění vlivy vnitřní (nejistota výroby) od obráběcího stroje samotného. Stroj je nutné posuzovat jako celek a je nutné uvažovat úchytky strojem podmíněné i ty nepodmíněné. Všechny tyto faktory působí negativně na míru přesnosti stroje – nejistotu výroby (Obr. 11). Materiál obráběné součásti i její tvar (vzhledem k dostatečně dobrému upnutí) značně ovlivňuje úspěšnost obrobení. Podobným způsobem ovlivňuje míru přesnosti i výrobní postup, kam spadá nástroj a řezné podmínky. Špatným upnutím nástroje nebo břitové destičky či špatně nabroušenou řeznou hranou může vznikat kmitání. Kmitání obecně zhorčuje kvalitu obrobené plochy, snižuje trvanlivost nástroje a zvyšuje namáhání součástí stroje. [12][22][23]

V nejistotě výroby jsou samozřejmě zahrnuty i pracovní nejistoty vlastního obráběcího stroje. Zde se projeví kvalita vyrobených dílů a součástí stroje a způsob jejich montáže. Vhodnou konstrukcí a správným dimenzováním součástí může stroj dosahovat lepších geometrických přesností. Materiály používané pro stavbu CNC strojů by měli vykazovat nejen vysokou tuhost a nízkou hmotnost ale také vysoké materiálové tlumení. [22][23]

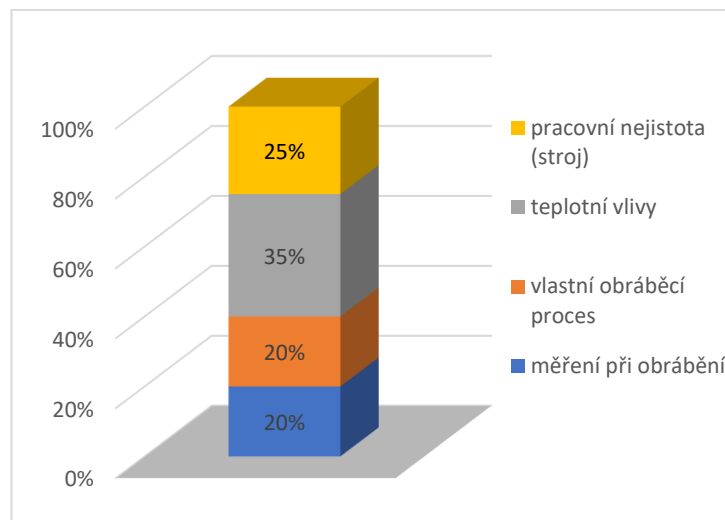


Obr. 11) Nejistota výroby a pracovní nejistota [12]

Zásadní vliv má pak kvalifikovaná obsluha stroje. V praxi může být důležitost správně vyškolené obsluhy podceňována a představy, že obráběcí stroj bude pracovat sám s danou přesností, jsou poněkud ploché. Zkušená obsluha dokáže odhalit slabé a silné stránky stroje a může i z horšího stroje vymáchnout maximum. [22][23]

Neméně důležitý je postup měření obrobenej součásti a zvolená měřicí metoda. Špatné měření může vést ke špatné volbě řezných podmínek nebo nevhodné volbě technologie obrábění. [22]

Na závěr Graf 1) ukazuje, které faktory nejvíce ovlivňují nejistotu výroby. Hodnoty uvedené v grafu jsou založeny na zkušenostech amerických výrobců. [12]



Graf 1) Vlivy působící na nejistotu výroby [12]

2.6 Dynamika OS

Dynamickou stabilitou stroje je myšlena odolnost nosné soustavy vůči vibracím. Vibrace (kmitání, chvění) jsou velmi škodlivým jevem. Způsobují zvýšené namáhání částí stroje (v extrémních případech může dojít až na mez pevnosti materiálu), jsou zdrojem otřesů a hluku, a značně zhoršují kvalitu obráběné plochy a snižují trvanlivost strojů.[2]

Obráběcí stroj se dá pospat jako soustava hmotných a pružných těles, ve vzájemné interakci, a proto se vzájemně ovlivňují i při kmitání. Sestavení pohybových rovnic pro takovou soustavu je velmi náročné až nemožné. Proto se zavádějí tyto zjednodušující předpoklady: [2]

- › Absolutní tuhé hmoty jsou uloženy na nehmotných pružinách. V tom případě mluvíme o tzv. diskrétních hmotách a diskrétních pružinách
- › Pružiny mají lineární charakteristiky, tj. síla je úměrná deformaci. Zanedbává se vliv vůlí mezi jednotlivými stýkajícími se součástmi. [Borský 1991]

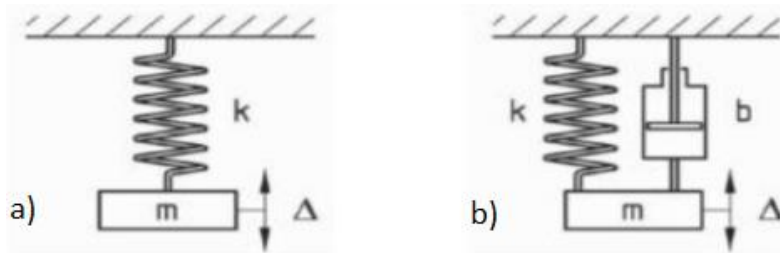
V dnešní době se tyto výpočty provádí výhradně na počítači za použití metody konečných prvků, pomocí složitých výpočtových softwarů.

Kmitání u obráběcích strojů můžeme dle [Borský 1991] rozdělit na čtyři základní druhy:

- › kmitání vlastní (volné)
- › kmitání buzené (vynucené)
- › kmitání samobuzené
- › trhavé pohyby (Slip Stick)

2.6.1 Kmitání vlastní (volné)

Volné kmitání vzniká vychýlením tuhé, pružně uložené hmoty z klidové polohy působením síly nebo rázu s jejich následným zánikem. Velikost síly je přímo úměrná výchylce z klidové polohy s opačným znaménkem. Volné kmitání se může objevovat ve dvou formách: kmitání volné netlumené a kmitání volné s tlumením (Obr. 12). Vlastní kmitání netlumené se v praxi nevyskytuje, proto jej nebudeme blíže řešit. Volné kmitání s tlumením může vzniknout při záběru nástroje, zapnutím spojky v pohonu, rázem přeneseným na stroj z okolí apod. Tlumením se amplituda pohybu exponenciálně zmenšuje s kruhovou frekvencí. [2]

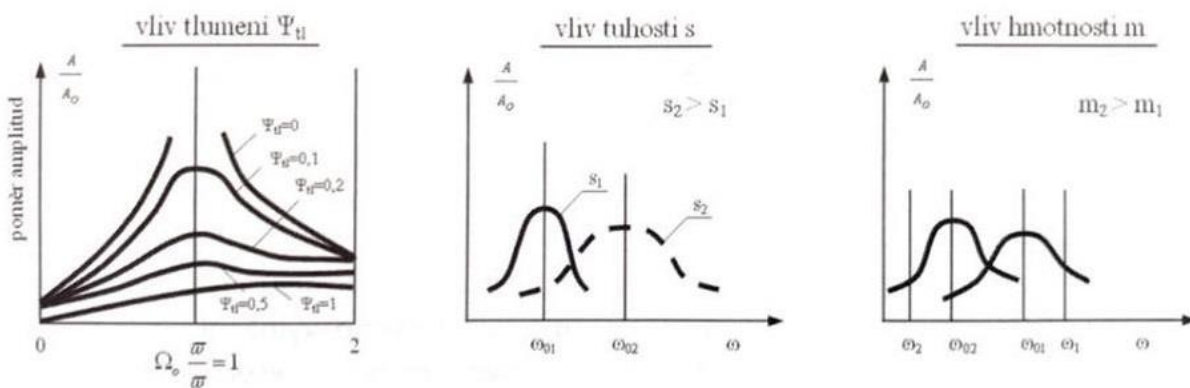


Obr. 12) Kmitání volné: a) netlumené b) s tlumením [2]

2.6.2 Kmitání buzené (vynucené)

Působí-li na soustavu pružně uložených a pružně spolu spojených hmot periodická rušivá síla vzniká kmitání vynucené. Charakteristickým znakem takového kmitání je shodná frekvence s frekvencí budící síly. Kmitání buzené může vzniknout vlastnostmi stroje např. házením rotujících částí stroje (vřetena, obrobku, hřídelí), setrvačnými silami prvků konající přímočarý nebo kruhový vratný pohyb (saně, smykadla, vačky), nepřesnostmi převodových mechanismů (házení ozubených kol, ložisek) apod. Může být vyvoláno také během vlastního řezného procesu: při frézování (přerušovaný řez), kdy vzniká periodická rušivá síla o frekvenci úměrné součinu otáček nástroje a počtu zubů, změnou průřezu třísky při soustružení šestihranu, při broušení házením obrobku nebo brusného kotouče. [2][12]

Na Obr. 13 jsou znázorněny průběhy rezonančních charakteristik s rozdílnými hodnotami tlumení. Aby bylo dosaženo dobré dynamické stability (tuhosti) je nezbytné zajistit, aby hodnota budící frekvence ω byla buď menší nebo větší než hodnota vlastní kruhové frekvence Ω_0 . Nejčastěji se vyskytuje první případ, kdy $\frac{\omega}{\Omega_0} \ll 1$, kde má největší význam statická tuhost, protože Ω_0 je jí přímo úměrná. Zvýšením statické tuhosti se sníží amplituda kmitání a zvýší se vlastní frekvence na hodnotu ω_2 . U strojů, které pracují převážně v oblasti vysokých rychlostí může být vhodnější druhý případ $\frac{\omega}{\Omega_0} \gg 1$, kde má největší vliv zvýšení hmotnosti m . [2][12]



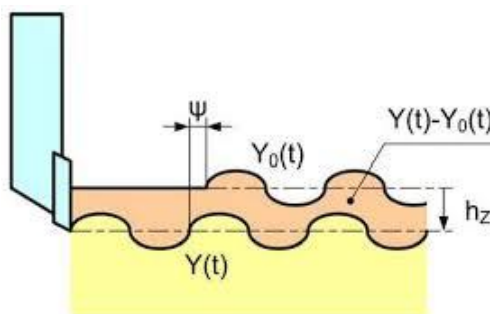
Obr. 13) Vliv různých parametrů na dynamickou stabilitu [2]

2.6.3 Kmitání samobuzené

Samobuzené kmitání vzniká při řezném procesu, mezi obrobkem a nástrojem bez periodického vnějšího budícího účinku. Kmitání se objevuje společně s hlukem a stopami chvění na obrobené ploše. Budící síla je vyvolána vlastním procesem řezání, kdy první impuls vyvolá výchylku z rovnovážné polohy nástroje a obrobku. Periodická proměnlivost samobuzeného kmitání je závislá pouze na vlastním kmitovém procesu a probíhá bez vnějšího přívodu energie, kdy frekvence kmitání je velmi podobná vlastní frekvenci některého členu systému. Se samobuzeným kmitáním se v praxi setkáváme často při hrubování i dokončovacích operacích. Toto kmitání se vyskytuje jen v určitém rozmezí řezných podmínek, jejich změnou dokážeme řezání stabilizovat. Frekvence kmitání není závislá na otáčkách obráběcího stroje. [2][12]

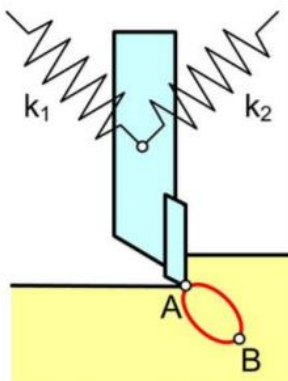
Nejznámější a nejdůležitější příčiny vzniku samobuzeného kmitání jsou dvě nejvíce teoreticky a experimentálně propracované teorie:

I. Reprodukční (regenerativní) princip – podstatou je předpoklad zvlněné obráběné plochy (sekundární buzení) při uvažování dokonale tuhého obrobku i nástroje. Při řezném procesu se tak periodicky mění průřez třísky, tím je vyvoláno samobuzené kmitání. Amplituda následující třísky je posunuta o fázový úhel Ψ (viz Obr. 14). Aby byl řez stabilní je nutné, aby výška každé následující vlny byla menší než vlna předcházející, tj. poměr amplitud výchylky po sobě jdoucích třísek musí být menší než 1. [2][12]



Obr. 14) Reprodukční princip samobuzeného kmitání [12]

II. Princip polohové vazby – předpoklad je takový, že nástroj kmitá ve dvou směrech a jeho špička opisuje elipsu, jak je znázorněno na Obr. 15. V první části elipsy působí řezný odpor proti pohybu nástroje (odebírání kmitavému pohybu energii), v druhé části je smysl řezného odporu shodný se směrem pohybu nástroje, tím je energie kmitu o hodnotu E_2 vyšší. Pokud je přivedená energie E_2 větší než hodnota E_1 (energie odebíraná), dochází vlivem přebytečné energie k překonání tlumení a vzniká samobuzené kmitání.



Obr. 15) Princip polohové vazby samobuzeného kmitání [12]

2.6.4 Kmitání způsobené trhavými pohyby (Slip Stick)

Při velmi malých posuvových rychlostech může být za určitých podmínek pohyb suportů, stolů, stojanů obráběcího stroje přerušovaný, trhavý. Zejména při rozjezdech (u kluzných vedení) z klidové polohy, kdy se olejový film vytvoří až při vzájemném pohybu ploch, je tečná reakce bezprostředně před vznikem pohybu větší než třecí síla za pohybu a způsobuje tak trhavý přerušovaný pohyb posouvané části stroje. Trhavý pohyb se projeví zhoršením vzhledu obrobenej plochy a vznikem lesklých proužků v místech, kde se pohyb zpomalil nebo zastavil.

2.7 Materiály nosných struktur

V konstrukci nosných struktur obráběcích strojů lze využít širokou škálu materiálů. I přes možnost využití nekonvenčních materiálů, mnohdy s daleko lepšími vlastnostmi, je většina výrobců spíše konzervativní. Mnoho z nich se totiž soustředí především na ekonomickou náročnou, a proto zůstává nejčastěji využívaným materiálem pro konstrukci rámu stroje litina a ocel. Je to dáno také dlouholetými zkušenostmi s chováním a zpracováním těchto materiálů a jejich dobrou dostupností

Materiál nosné soustavy, zejména jeho základní fyzikální vlastnosti výrazně ovlivní provozní i technické vlastnosti stroje. Důležité parametry při volbě materiálu rámu stroje jsou uvedeny v tabulce 5. [7][37]

Tab. 5) Důležité vlastnosti při volbě materiálu [7]

tuhost a pevnost (tah, tlak, ohyb, krut)	>	bezpečnost proti trvalé deformaci
nízká hmotnost	>	statické a dynamické vlastnosti
vysoký útlum chvění	>	dynamické vlastnosti
nízké vnitřní pnutí	>	dlouhodobá přesnost
nízká teplotní roztažnost, vodivost	>	tepelná stabilita
nízké energetické náklady na pořízení materiálu		
nízké náklady na vlastní materiál		

Na základě tabulky uvedené výše je patrné, že se často jedná o protichůdné požadavky. Konstrukce nosné soustavy a fyzikální podstata tlumení je velmi komplikovaná, a proto je důležité tyto vlastnosti zkoumat. [7]

V Tab. 6 jsou uvedeny základní fyzikální vlastnosti materiálů nosných struktur. [12]

Tab. 6) Fyzikální vlastnosti materiálů nosných struktur [12]

	Kovové materiály		Částicové kompozity		Vláknové kompozity s epoxidovou pryskyřicí					
	ocel	litina	polymerbeton	HPC beton	uhlíkové vlákno HM vyztužení	uhlíkové vlákno HM vyztužení #	uhlíkové vlákno HT vyztužení	uhlíkové vlákno HT vyztužení #	aramidové vlákno vyztužení	vlákno z E-skla vyztužení
Měrná hmotnost [kg.m ⁻³]	7 850	7 200	2 300–2 500	2 200–2 500	1 600	1 600	1 600	1 600	1 400	2 000
Poissonova konstanta [-]	0,3	0,2–0,3	0,25–0,3	0,2–0,3	–	–	–	–	–	–
E-modul [GPa]	210	70–160	30–44	50–60	360	120	144	48	50	40
Pevnost v tahu [MPa]	400–1 600	150–400	10–40	8–10	1 200	400	2 400	800	200	1 100
Pevnost v tlaku [MPa]	250–1 200	700–1 200	140–160	100–200	–	–	–	–	–	–
Pevnost v ohybu [MPa]	150–600	100–300	15–50	3–8	–	–	–	–	–	–
Dekrement útlumu [-]	0,002	0,003	0,02–0,03	0,02–0,03	–	–	–	–	–	–
Součinitel délkové roztažnosti [10 ⁻⁶ /K]	11–18	10	9–18	10,6	-0,5	-1	0	0,5	-3,5	5
Tepelná vodivost [Wm ⁻¹ K ⁻¹]	47–	50	1–3	1,7	50	1	10	1	0,1	0,6
Měrná tepelná kapacita [KJkg ⁻¹ K ⁻¹]	0,49	0,45	0,7–1,3	0,9	1	1	1	1	1,5	1,1

Nevyčerpatelný potenciál spočívá v optimálním dimenzování každého dílce stroje. Dnešní výpočtové metody umožňují již ve fázi návrhu stroje hledat optimální řešení a rozložení materiálu a analyzovat interakci skeletu stroje s pohony. Díky těmto moderním metodám se lze vyvarovat zbytečnému předdimenzování dílců a šetřit tak materiál i energii potřebnou pro jejich pohyby. [12][37]

2.7.1 Svařence z konstrukční oceli

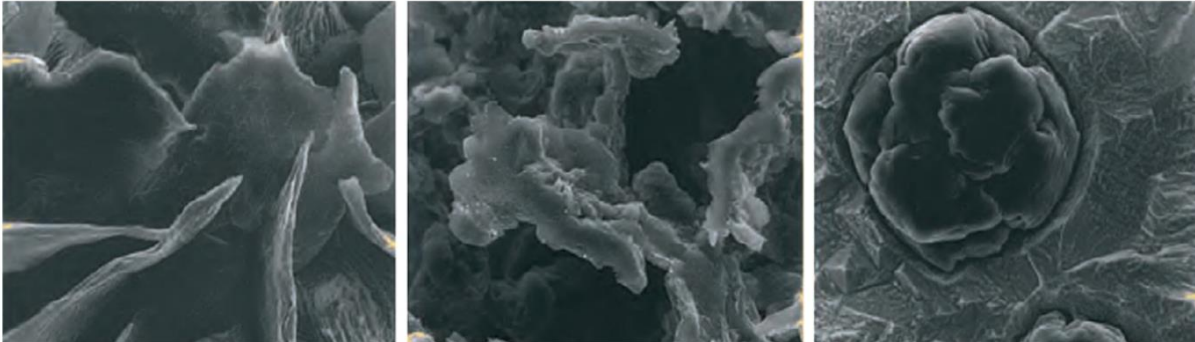
Svařované konstrukce rámců využívají ocelové profily a válcované plechy. Konstrukční oceli (S235, S355J2) mají obsah uhlíku méně než 2 %, je u nich zaručená svařitelnost a jsou tak základním materiálem svařovaných konstrukcí. Velikost svarů (Obr. 16), jejich směr a počet musí být volen tak, aby nedocházelo k vzájemnému pnutí, aby nemohlo dojít k zborcení profilu svařence. Výhodou u nízkouhlíkové oceli jsou vysoké hodnoty modulu pružnosti, možnost konstrukce složitých tvarů různých profilů stěn, v kombinaci s dobrými mechanickými i technickými vlastnostmi a dobrou ekonomičností. Svařované konstrukce je vhodné volit pro kusovou nebo malosériovou výrobu z důvodů úspory nákladů při výrobě forem a jader a následné možnosti úprav. V Důsledku vyššího Youngova modulu pružnosti lze konstruovat tenčí stěny svařovaných rámců. Tím je dosaženo dobré hospodárnosti materiálu a tím i nižší hmotnosti (až o 30% nižší než u odlitků z šedé litiny) při zachování stejné tuhosti. Nevýhodou je nízké materiálové tlumení, vysoké vnitřní pnutí po svařování (musí být odstraněno žiháním) a horší obrobiteľnosť než např. u litiny. [12][37][38][39]

	Rozměry svarů								
	a [mm]	3	4	5	6	8	10	12	14
b [mm]	6	10	10	12	15	18	20	25	

Obr. 16) Rozměry svarů [12]

2.7.2 Litiny

Litina – slitina železa, uhlíku o obsahu 2,14 – 6,63 % a dalších prvků (Mn, Si, S, P). Rozeznáváme několik tvarů grafitu – lamelární, červíkový a kuličkový (Obr. 17). Nejčastěji se využívá šedá litina (lupínkový grafit), tvárná litina (kuličkový grafit) a temperovaná litina s černým lomem. Lupínkový (lamelární) grafit vede k vysokému materiálovému tlumení a pevnosti v tlaku ale nízké pevnosti v tahu (asi čtyřikrát nižší než pevnost v tlaku) v důsledku k vnitřním vrubovým defektům. Proto je důležité navrhovat kritické průřezy tak, aby na ně působilo především tlakové namáhání. Tvárná litina má horší tlumící vlastnosti ale lepší vlastnosti mechanické (vyšší pevnost v tahu) než šedá litina.[37]



Obr. 17) Základní typy tvaru uhlíku: lamelární (vlevo), červíkovitý (uprostřed), kuličkový (vpravo)[40]

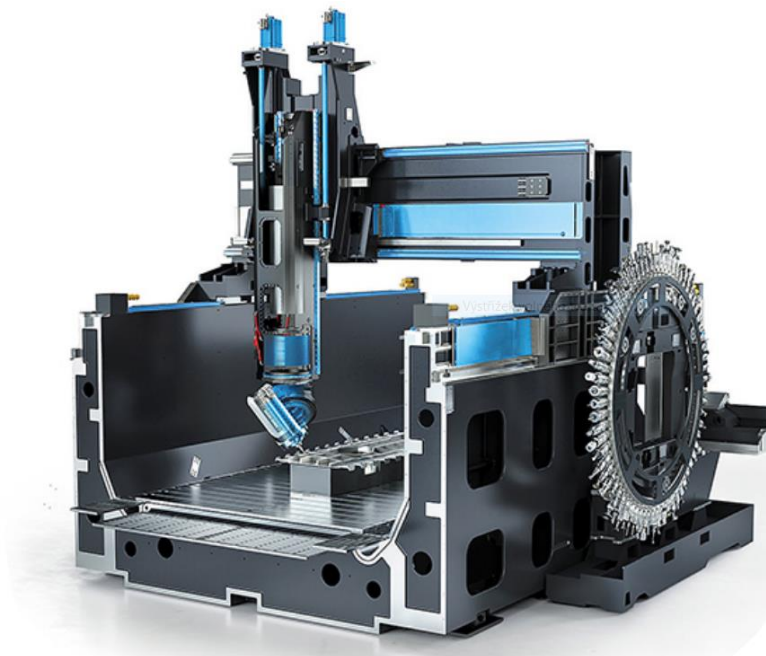
Odlité lože nebo stojany jsou vždy těžší než svařované. Ve srovnání s ocelí má litina menší modul pružnosti v tahu i ve smyku. Proto je nutné volit větší tloušťku stěn při požadavcích stejné tuhosti. Je nutné volit hustší žebrování, neboť nelze odlít zcela uzavřený tvar. Technologie odlévání si někdy také žádá tlustší stěny, než by bylo třeba dle požadované tuhosti. Litiny nejsou vhodné pro malé série vzhledem k ceně modelů, jader a forem. Lože z litiny je na Obr. 18 a Obr. 19. [12] [37] [38][39]



Obr. 18) Odlité lože stroje DMU 210P firmy DMG Mori [33]

Nevýhodou je také technologické omezení tvarování proporcí, přechodů a případných úprav. Proto při návrhu odlitku, musí konstruktér pamatovat na některé zásady jako snadnou manipulaci s odlitkem, přiměřenou hmotnost, technologii lití dle slévárny, rovnoměrné tuhnutí ve všech částech odlitku a mnoho dalšího. Takto hrubý odlitek nesmí vykazovat povrchové vady. Po odlití se prověřují také mechanické vlastnosti a chemické složení odlitku. Odlitek může být také podroben mechanickým zkouškám (tah, tlak, tvrdost atd.).

Příčinou nerovnoměrného chladnutí vzniká v odlitcích vnitřní pnutí. Takové pnutí je velmi nežádoucí a musíme je odstraňovat žíháním (umělým stárnutím). Tímto procesem dokážeme odstranit až 80 % zbytkového napětí. Dříve se nechávalo stárnout přirozeně na vzduchu dlouhou dobu, kdy za několik let docházelo ke ztrátě maximálně 30 % vnitřního pnutí. [12][32][37][38][39]



Obr. 19) Moderní nosná struktura obráběcího centra firmy DMG Mori s jednodílným ložem z tvárné litiny EN-GJS-600 [34]

2.7.3 Kompozitní materiály

Kompozitní materiály mají jasně definované rozdíly mezi jednotlivými složkami ve své základní struktuře. Tyto složky mají výrazně odlišné mechanické, chemické nebo fyzikální vlastnosti. Nespojitá složka (výztuž) mívá vyšší pevnost než složka spojitá, nazýváme ji matrice. Matrice mívá vyšší plasticitu a slouží jako pojivo a přenáší na ni většinu zatížení. Charakteristickou vlastností kompozitních materiálů je tzv. synergismus neboli „spolupráce“, kdy vlastnosti kompozitu jako celku jsou lepší než vlastnosti jednotlivých složek, z nichž se kompozit skládá. Kompozitní materiály se dělí podle několika kritérií, nejčastěji však dle geometrického tvaru výztuže (nespojité složky – Obr. 20) na částicové kompozity a vláknové kompozity. Dále pak na kovové, polymerní, minerální, keramické, skleněné (atd.) dle materiálu matrice či výztuže. Přestože mají kompozitní materiály velký potenciál, výrobci stále zůstávají věrní spíše tradičním materiálům a moc tyto materiály nevyužívají, převážně z důvodů vysoké ceny, nízkého poznání, nutnosti testování a výzkumu. [12][37][40]



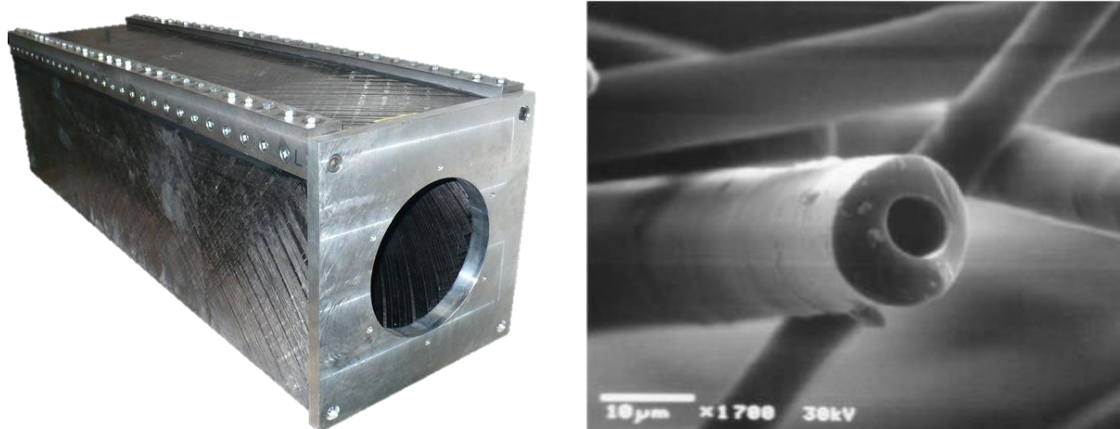
Obr. 20) Částicové a vláknové výztuže v kompozitním materiálu [40]

Částicové kompozity

Částicové kompozity jsou materiály, tvořené nahodile orientovanými nespojitými částicemi, které zastávají funkci výztuže. Nejčastěji mají tvar krychle, kvádrů, koule, tyčinky nebo tvar nepravidelný. Nespojitých složek se používá méně než u vláknových kompozitů, řádově v jednotkách až desítkách procent. Mechanické vlastnosti pak bývají horší než u vláknových kompozitů a převažující roli při zatížení tak zastává matrice. Oproti konvenčním materiálům mají částicové kompozity vyšší tuhost, dobré tlumivé vlastnosti, lepší tvarovou stálost, lepší otěruvzdornost, nižší tepelnou vodivost a mnohem nižší tepelnou roztažnost. Nevýhodou je pak nízká pevnost v tahu, tlaku a nízký modul pružnosti. Mechanické vlastnosti ovlivňuje především podíl výztuže, jejich tvar, velikost a povrchová úprava částic. Ve stavbě nosných struktur výrobních strojů se jako částicové kompozity používají polymerbetony, vysokohodnotné betony a umělá žula. Betony mohou být použity pro vylití dutých míst svařovaných konstrukcí a tím vylepšit tlumivé a tepelné vlastnosti. Tím vznikají kombinované rámy viz kapitola 2.7.4 Hybridní struktury. [12][37][40]

Vláknové kompozity

Vláknové kompozity jsou stejně jako částicové kompozity tvořeny základní matricí a výztuží, v tomto případě vlákny, orientovanými obvykle jedním směrem. Kompozity jsou anizotropní tzn. mají různé vlastnosti v různých směrech na rozdíl od izotropních kovů, které se ve všech směrech chovají stejně. Kromě toho se materiálové vlastnosti kompozitů určují a vytvářejí teprve v průběhu výroby dílu. Hlavní podíl zátěže přenášejí vláknové výztuže díky své spojitosti a objemovému podílu 5 až 80 procent. Vynikající vlastnosti modulu pružnosti, materiálového tlumení s nízkou hmotností a velmi nízkou teplotní roztažností máme možnost navrhovat dílce s optimálně orientovanou tuhostí. Vlákna na bázi uhlíkových vláknů, o průměru jednoho až sta mikrometrů, se používají převážně pro výrobu pohyblivých částí jako například vřeteníku na Obr. 21. Z hlediska fyzikálních vlastností mají vláknové kompozity zcela bezkonkurenční kvality. Nevýhodou zůstává nezkušenost výrobců a techniků s těmito materiály a vysoká cena. Přesto lze s jistotou předpokládat, že uhlíkové kompozity s unikátními vlastnostmi si budou postupně vytvářet pevnou pozici v oblasti stavby OS. Mezi hlavní světové výrobce Hi-Tech kompozitů patří česká firma CompoTech. [12][37][40][20]

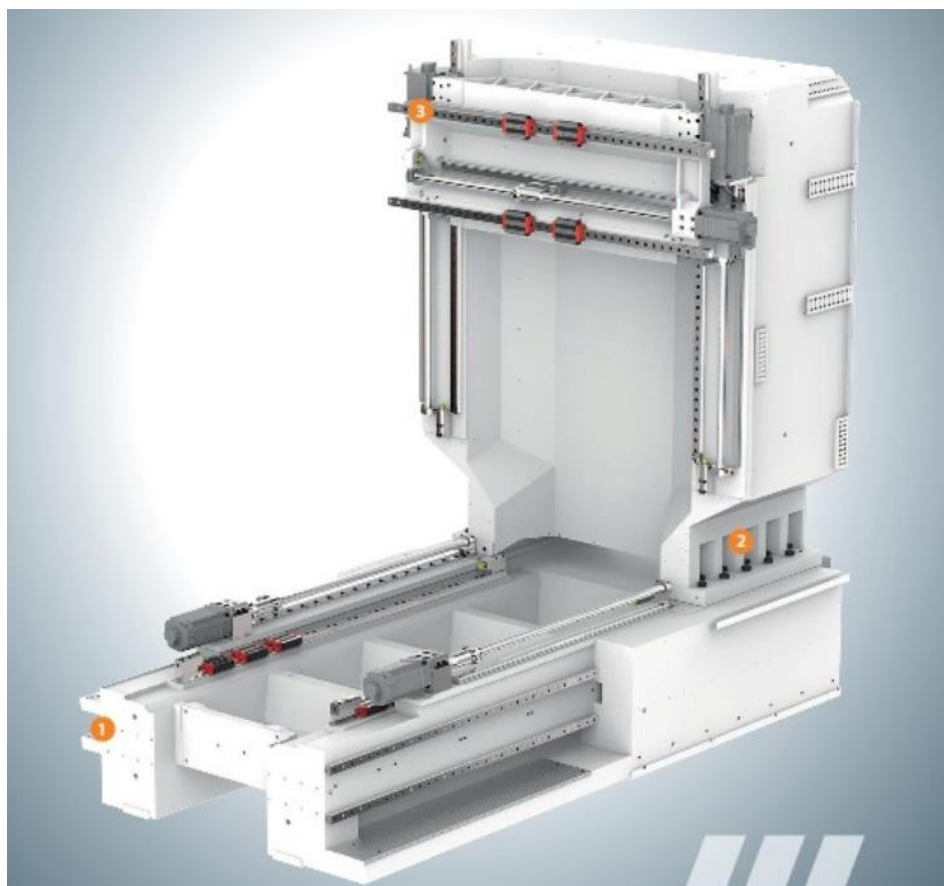


Obr. 21) Vřeteník z kompozitu a detail na duté uhlíkové nanovlákně [20]

2.7.4 Hybridní struktury

Hybridní struktury kombinují konvenční materiály (ocel, litina) s materiály nekonvenčními (uhlíková vlákna, betony, Al pěny). Použitím hybridních struktur lze využít konkrétních vlastností jednotlivých materiálů při konstrukci rámců a dosáhnout tak zcela specifických vlastností. Kombinované dílce sice nedosahují takových vlastností jako dílce vyrobené z uhlíkových vláken, nicméně náklady na výrobu jsou mnohem příznivější. Akceptovatelnými náklady tak můžeme docílit lepších vlastností než u konvenčních materiálů zejména v oblasti tlumení, teplotní stálosti, vysoké tuhosti a vylitím dutin svařenců můžeme nahradit nákladné a na výrobu složité žebrování. [37]

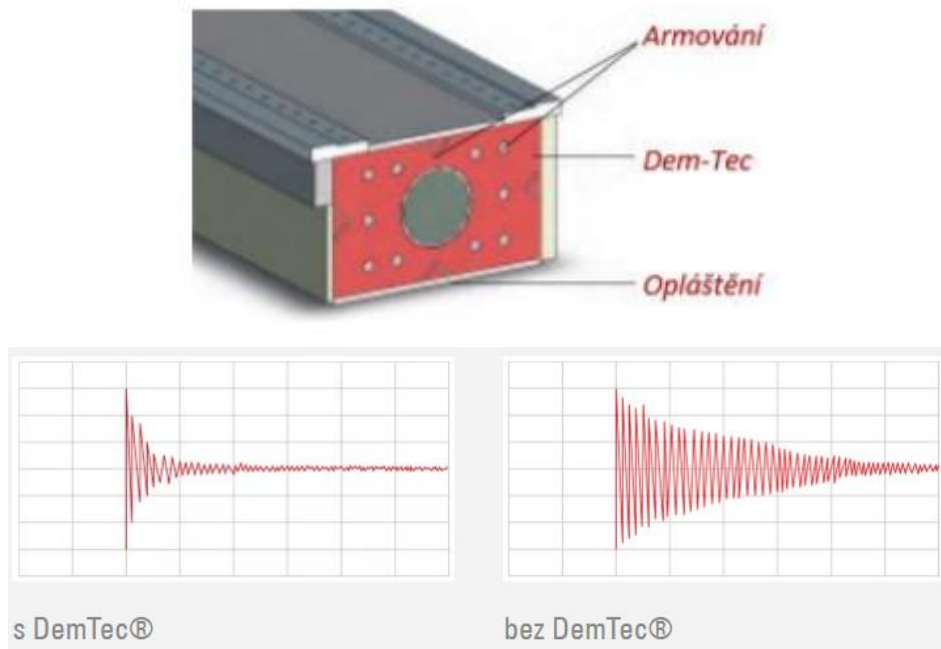
Významným výrobcem hybridního materiálu patentovaného pod názvem Hydropol je společnost Framag. Tento materiál je založen na kombinaci ocelového svařence vyplněného polymerbetonem. Pro vysokou hmotnost našel Hydropol uplatnění spíše pro nepohyblivé dílce. Změnou plniva epoxidové matrice přichází na trh také odlehčené varianty Hydropol Light a Hydropol Superlight vyvinuty tak, aby splňovaly požadavky dynamických komponent – příčníků, stojanů, vřeteníků, smykadel (Obr. 22). Hyropol XX light dosahuje extrémní schopnosti pohlcovat vibrace při hustotě 220 kg/m^3 . [36][37]



Obr. 22) Nosná struktura z hybridního materiálu Hydropol od společnosti Framag

1 – Hydropol (2500 kg/m^3), 2 – Hydropol Light (1400 kg/m^3),
 3 – Hydropol Super Light (650 kg/m^3) [36]

Mezi tradiční výrobky české společnosti Demmeler patří materiál DemTec viz. Obr. 23. Nosné díly jsou tvořeny rovněž vnější svařovanou konstrukcí s výplní cementovým betonem s rozptýlenými drobnými drátky tzv. drátkobeton. Vyšší tuhosti je docíleno ještě přidáním armovacích tyčí. [35][37]



Obr. 23) Kmitavé vlastnosti svařované konstrukce s výplní DemTec a bez výplně [35]

2.7.5 Přírodní materiály

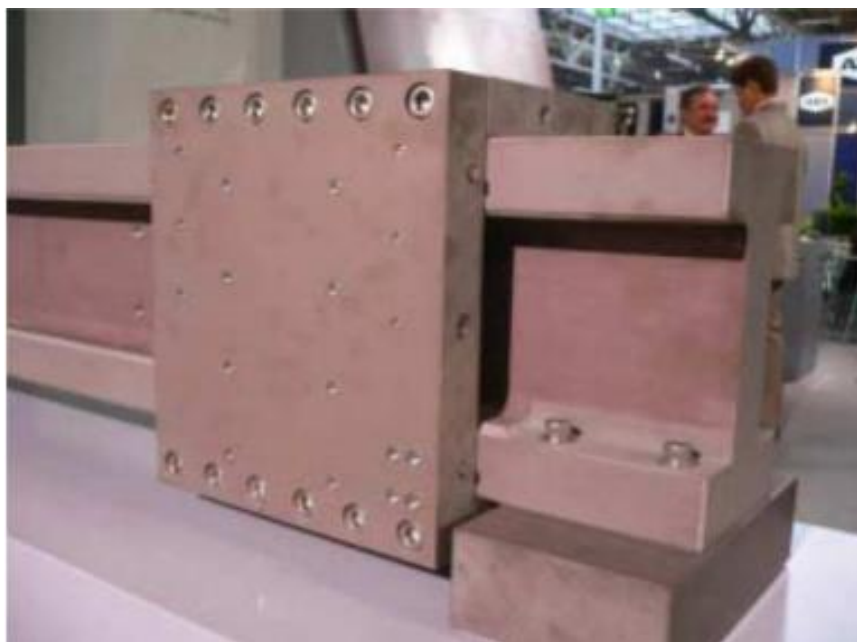
Jeden z materiálů používaný při výrobě velmi přesných strojů zejména pro broušení je přírodní žula (granit). Hlavními výhodami granitu jsou absence vnitřních pnutí, dokonalá rozměrová a tvarová stálost, tepelná stabilita, odolnost proti chemikáliím, velmi vysoké tlumící vlastnosti. Nevýhodou je velmi náročná výroba, vyžaduje náročné broušení všech ploch, komplikované a nákladné spojování s ostatními díly a jen umožňuje jen omezené množství pozdějších zásahů do konstrukce. Při spojování se součástkami jiných materiálů se musí brát v potaz odlišné teplotní roztažnosti, aby se vyhnulo následným deformacím ve spojích. Průmyslově těžený přírodní kámen se využívá především pro měřicí přípravky – stolů, pravítek, vysoce přesných obráběcích strojů. Masivní bloky žuly většinou tvoří nepohyblivé stoly, lože, příčníky apod. Ve struktuře žuly na Obr. 24 je jasně vidět matrice tvořena křemíkem a černé body amfibolu. [40]



Obr. 24) Žula [40]

2.7.6 Keramické materiály

Keramika se ve stavbě nosných dílců zatím moc nevyskytuje, ale můžeme se s ní setkat v jiných odvětvích strojírenství. Mezi hlavní přednosti patří velmi nízká teplotní roztažnost, poloviční hmotnost ve srovnání s ocelí a litinami, velmi vysoká pevnost v ohybu a tlaku a vysoká odolnost vůči chemikáliím. Při konstrukci menších dílů jako valivých těles ložisek a vřeten je hlavní nevýhodou vysoká cena. U větších nosných těles pak narážíme na problém spojování a komplikovanou výrobu. Nicméně vlastnosti keramiky mají výborné vyhlídky do budoucnosti a dá se předpokládat, že se s tímto materiálem v oblasti nosných rámců OS budeme setkávat čím dál častěji. Nosník z keramiky je na Obr. 25 [40]



Obr. 25) Nosník portálu laserového obráběcího centra z keramiky [40]

3 SHRnutí SOUČASNÉHO STAVU

V současnosti, kdy se největší váha přisuzuje požadavkům zákazníka, můžeme sledovat u všech výrobců obráběcích strojů orientaci především na produktivitu, přesnost, spolehlivost a ekonomičnost. Současně však musí výrobci reagovat na velmi pružný a neustále se měnící trh, aby jejich stroje byli technicky ale zároveň cenově konkurenceschopné. Akcentem moderní doby je hledání nejekonomičtějšího řešení, které významně ovlivňuje také konstrukční provedení stroje, a především výběr materiálu. V tomto důsledku se začaly zkoumat další kombinace materiálů pro ještě vhodnější a ekonomičtější řešení nosných struktur OS. [7][12][37]

V moderních konstrukcích mají velký potenciál právě nekonvenční materiály. Přes dosažitelné výhody však k žádnému dramatickému uplatňování těchto materiálů nedochází, a to zejména kvůli pořizovacím nákladům a technologickým nárokům. Velkou překážkou je pro spoustu výrobců neznalost, jak z těchto materiálů navrhovat dílce, jak je spojovat a jakým způsobem je optimalizovat a provádět výpočty.

Rozhodujícím faktorem při volbě stavebního materiálu je spíše než fyzikální vlastnosti materiálu otázka zpracovatelnosti, obrobitelnosti, rychlost dodávky dílce a další technologicko-hospodářské ukazatele. [7][12][37]

Mezi nejdosažitelnější materiály nahrazující ocel ve formě svařenců a různé litiny, patří polymerní a cementové betony a žula. Jako významné se ukázaly v kombinaci s konvenčními materiály na bázi Fe-C známé jako hybridní struktury. Světlé vyhlídky do budoucna mají částicové a vláknové kompozity a lze očekávat více reálných aplikací těchto materiálů, zejména u pohyblivých a velmi vyložených dílců, díky nejlepšímu poměru mechanických vlastností a hmotnosti. [7][12][37]

Snaha vyrobit nosnou soustavu z vhodného materiálu, s co nejlepšími vlastnostmi, za co nejméně peněz vede výrobce především k optimalizaci konstrukce pomocí využití sofistikovaných výpočtových a simulačních metod.

Výzkumná centra a odborné literatury v oblasti použití alternativních materiálů se soustředí především na kategorii malých i středních strojů. V této práci se nadále budeme věnovat středně velkému horizontálnímu obráběcímu centru, kde budou tyto znalosti využity. [7][12][37]

4 PRAKTICKÁ ČÁST

Hlavní cílem této diplomové práce je porovnání nosných struktur vyrobených z tradičních a netradičních materiálů. Budou navrženy čtyři výpočtové modely rámu stroje vyrobených ze čtyř různých materiálů. Aby bylo dosaženo co nejobektivnějších výsledků, budou varianty A–D vycházet z jednoho simulačního, značně zjednodušeného modelu. Nebudou uvažovány otvory, zaoblené a sražené hrany, nebudou řešeny výpočty jednotlivých dílců ani spojování těchto dílců mezi sebou. Bude tak dosaženo správné tvorby sítě konečných prvků a značného zjednodušení výpočtu a tím i zkrácení času na výpočet. Tyto jednotlivé modely budou podrobeny pevnostním analýzám (MKP) s následným vyhodnocením. Pro srovnání a vyhodnocení nás bude zajímat především vlastnosti rámu stroje a náklady na jeho výrobu.

Výsledky jednotlivých analýz, vlastnosti a chování budeme sledovat u nosných struktur stroje (lože, stojan). Z pevnostní analýzy u každého modelu nás bude zajímat převážně deformace a jeho maximální posunutí (statická analýza). Dále modální analýza, jejímž výstupem jsou vlastní frekvence stojanu. Nízká hmotnost pohyblivých hmot je důležitým předpokladem pro případnou vysokou dynamiku stroje ale také pro hospodárnost provozu. Proto bude provedeno také porovnání hmotností stojanů a hrubý odhad ekonomické náročnosti na jejich výrobu z jednotlivých materiálů. Bude provedeno technicko-ekonomické zhodnocení.

Vybranými materiály pro konstrukci nosných struktur budou litina (varianta A), ocel (varianta B), ocelová skořepina vyplněna betonem (varianta C) a v poslední variantě rám z betonu (D). Základní výpočtový model bude vždy upraven dle fyzikálních vlastností každého materiálu. Modely budou vytvořeny s vhodným dimenzováním v programu Autodesk Inventor Professional 2020.

4.1 Základní koncepce stroje

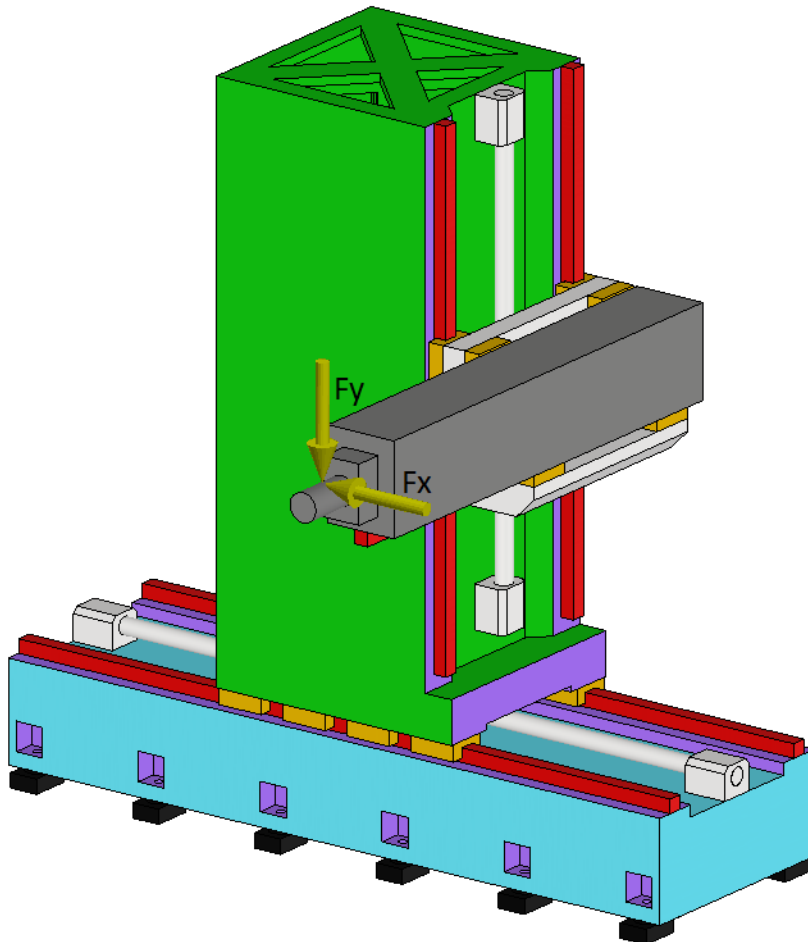
Při návrhu OS je nejprve nutné zadat některé vstupní parametry, které jsou totožné pro jednotlivé varianty. V první řadě je nutné zadat typ a velikost stroje, zatížení, se kterým budeme uvažovat a také kinematické uspořádání stroje. (Tab. 7)

Tab. 7) Základní vstupní parametry stroje

Typ stroje	Horizontální obráběcí centrum	
Zatížení [N]	10 000	
Délka lože [mm]	2500	
Výška stojanu [mm]	2000	
Kinematické uspořádání	Obrobek	Nástroj
	O	XYZ
Vedení	Válečkové lineární vedení	
Varianta A	Litina	
Varianta B	Ocel	
Varianta C	Ocel + beton	
Varianta D	Beton	

Základní výpočtový model

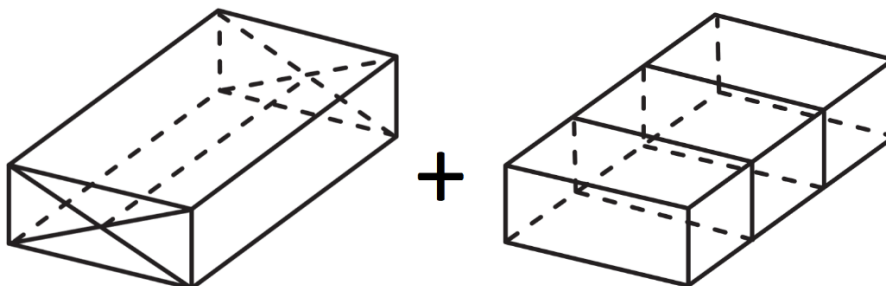
Vlastní zjednodušený výpočtový model horizontálního obráběcího centra, ze kterého budou vycházet modely jednotlivých variant vyrobených ze zvolených materiálů je znázorněn na Obr. 26. Reálné zatížení, které vzniká řezným procesem budou simulovat síly $F_y = 10\,000\text{ N}$, která směřuje kolmo dolů a silou $F_x = 10\,000\text{ N}$ ve vodorovném směru. Zatížení budeme uvažovat při maximálním výsuvu smykadla, kdy stojan je přesně v polovině lože a saně a smykadlo jsou přesně v polovině stojanu.



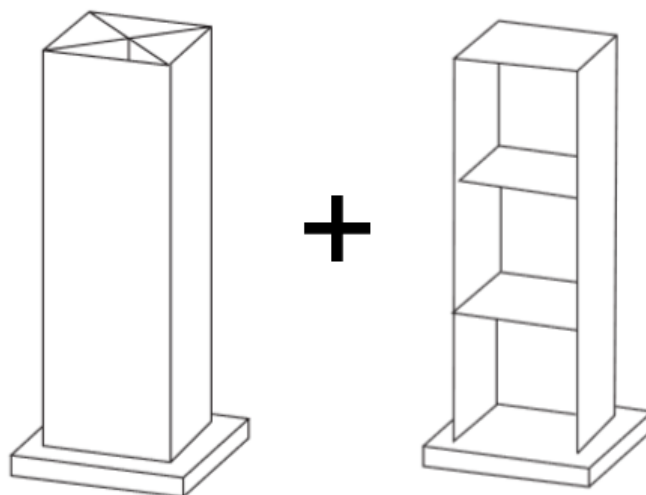
Obr. 26) Základní zjednodušený simulační model horizontálního obráběcího centra

Žebrování stojanu a lože

Aby bylo dosaženo dostatečné tuhosti jak v ohybu, tak krutu bylo zvoleno vhodné žebrování. Dle Brechera [41] bylo zvoleno nejvhodnější kombinace žeber. Žebrování, které bylo použito k vyztužení lože je schematicky znázorněno na Obr. 27, žebrování stojanu na Obr. 28.



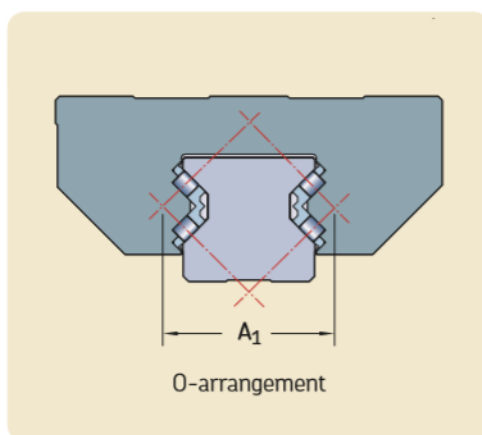
Obr. 27) Zvolená kombinace žebrování lože [41]



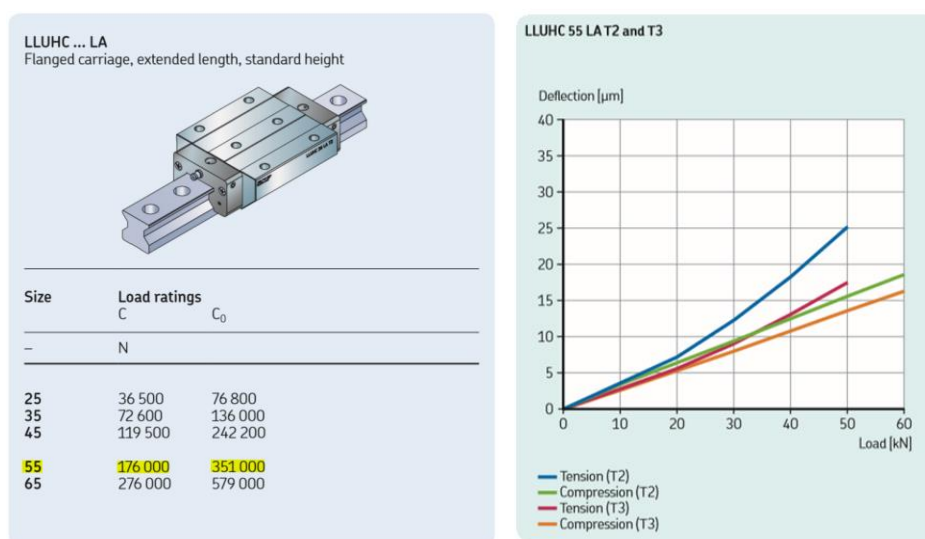
Obr. 28) Zvolená kombinace žebrování stojanu [41]

Vedení stroje

Jako vhodné vedení stroje bylo zvoleno válečkové lineární vedení od společnosti SKF s uspořádáním válečků do písmene O (Obr. 29). K vedení byl zvolen vozík v prodloužené verzi označení LLUHC 55 LA s tuhostí $k = 3000000 \text{ N/mm}$ (Obr. 30).



Obr. 29) Schématické znázornění uložení válečků [43]



Obr. 30) Zvolené válečkové lineární vedení SKF LLUHC 55 LA [43]

Pevnostní analýza rámu MKP

Varianty A-D budou zkoumány v oblasti statické a dynamické tuhosti rámu pomocí metody konečných prvků. Proto budou postupně podrobeny statické a modální analýze v programu Autodesk Inventor Professional 2020. Výsledkem těchto analýz je simulace reálného zatížení rámu. Vzhledem k cíli této práce budou výsledky, zejména v oblasti deformace (statická analýza) a vlastních frekvencí (modální analýza) porovnány a vyhodnocovány. Síť konečných prvků bude tvořena nejjednoduššími trojrozměrnými tělesy (čtyřstěny) zvanými tetraedry.

4.2 Varianta A – Litina

V první variantě je jako stavební materiál pro konstrukci nosných prvků stroje uvažována litina. Stojan i lože budou provedeny jako odlitky z šedé litiny. Byla zvolena šedá litina s lupínkovým grafitem ČSN 42 24 30. Při použití litiny je třeba uvážit, že ve srovnání s ocelí má litina menší pevnost v tahu, krutu i ohybu. Youngův modul pružnosti se pohybuje mezi 60-130 GPa. Z těchto důvodů ale také z technologických omezení odlévání bylo nutné volit silnější tloušťku stěn i žeber. Základní výpočtový model byl upraven dle parametrů uvedených v Tab. 8). Upravený Model A dle vlastností litiny byl podroben statické a modální analýze.

Tab. 8) Základní parametry lože a stojanu z litiny

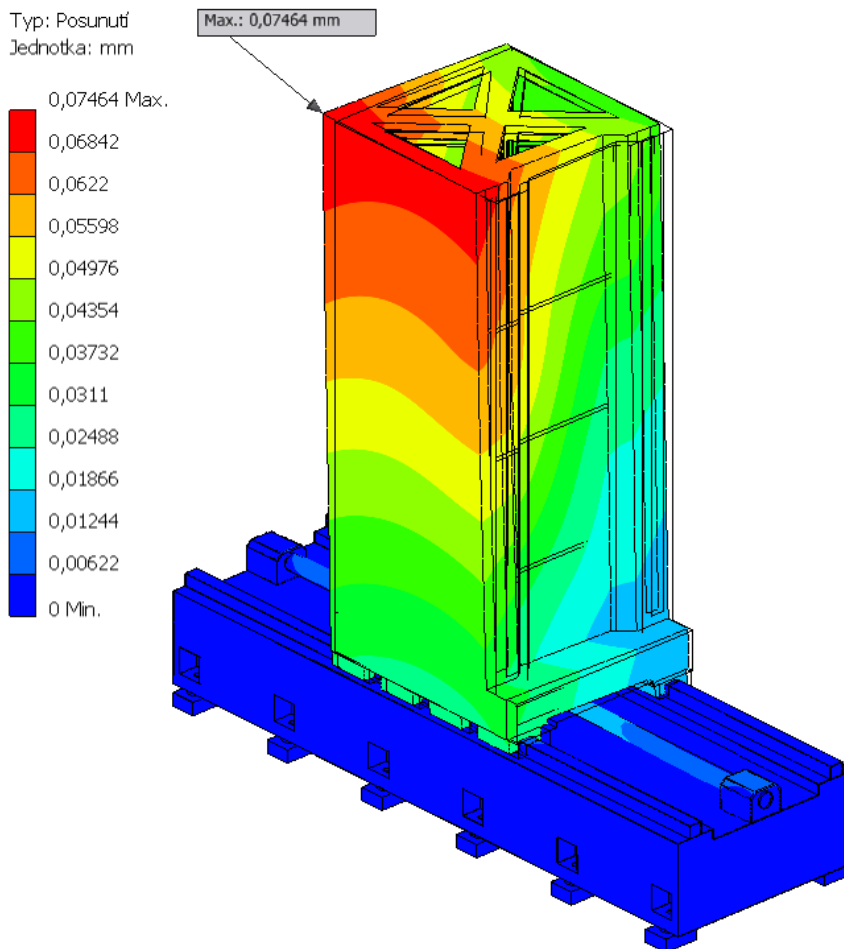
Síla stěn rámu [mm]	30
Síla žeber [mm]	15

Statická analýza – A

Cílem statické analýzy je najít maximální deformaci (posunutí) zkoumaného tělesa. V Tab. 9) jsou zaznamenány deformace lože a stojanu při zatížení soustavy silami o velikosti $F_x = 10\,000\text{ N}$ a $F_y = 10\,000\text{ N}$. Maximální celková deformace nabývá hodnoty $X_A = 0,07464\text{ mm}$ (Obr. 31).

Tab. 9) Deformace nosných struktur z litiny

A	Litina		
	Statická analýza		
	Lože	Stojan	Celková
Deformace X [mm]	0,00651	0,06814	0,07464
Deformace Y [mm]	0,00715	0,05715	0,06430



Obr. 31) Celková deformace nosných struktur z litiny

Modální analýza – A

Modální analýza se v praxi využívá k nalezení vlastních frekvencí těles. Cílem této analýzy je najít takové frekvence, které by se mohly nacházet v pásmu budících frekvencí soustavy a způsobit tak rezonanci. První až čtvrtá vlastní frekvence rámu z litiny jsou zaznamenány v Tab. 10). Součástí tabulky je charakteristika kmitání, které vlastní frekvence vyvolává.

Tab. 10) Vlastní frekvence rámu z litiny

A	Litina – Modální analýza			
	F1 – 41,95 Hz	F2 – 50,35 Hz	F3 – 81,53 Hz	F4 – 96,00 Hz
	Překlopení stojanu ve směru lože	Překlopení kolmo k loži	Pohyb kyvný/houpavý vyklopení	Rotace stojanu kolem vlastní osy

4.3 Varianta B – Ocel

Druhým materiálem, ze kterého budeme uvažovat rám zvoleného stroje bude ocel. Rám bude konstruován jako svarek z profilů a plechů z konstrukční oceli S355J2. Pro zjednodušení nebude uvažováno s vliv svarů ani šroubových spojení a bude počítáno s dokonale tuhými styky. Tloušťky stěn (Tab. 11) mohou být tenčí ve srovnání s litinou v důsledku vyššího Youngova modulu pružnosti oceli ($E = 210 \text{ GPa}$) než u litiny. Už před samotným návrhem modelu můžeme konstatovat, že očekáváme značnou úsporu materiálu a tím i nižší hmotnost.

Tab. 11) Základní parametry lože a stojanu z oceli

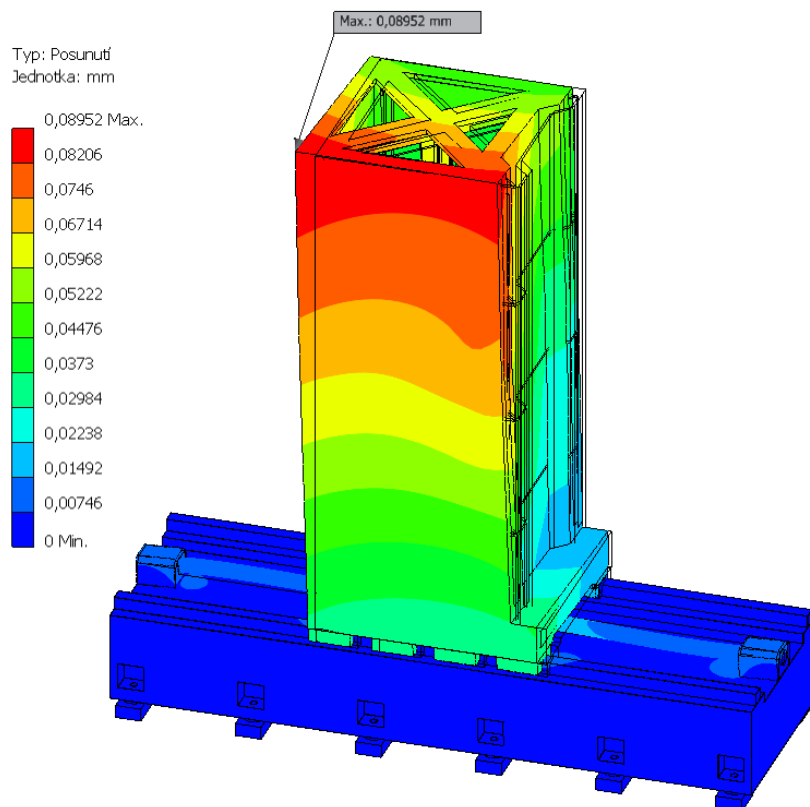
Síla stěn rámu [mm]	20
Síla žeber [mm]	10

Statická analýza – B

Ocelový svařenec byl podroben statické analýze, ze které můžeme vyčíst, že deformace (s již upravenými profily stěn a žeber) je o něco vyšší než u odlitku z šedé litiny (Tab. 12). Maximální deformace rámu z oceli $X_B = 0,08952 \text{ mm}$ (Obr. 32).

Tab. 12) Deformace nosných struktur ocelového svařence

B	Ocel		
	Statická analýza		
	Lože	Stojan	Celková
Deformace X [mm]	0,00937	0,08016	0,08952
Deformace Y [mm]	0,00896	0,06904	0,07800

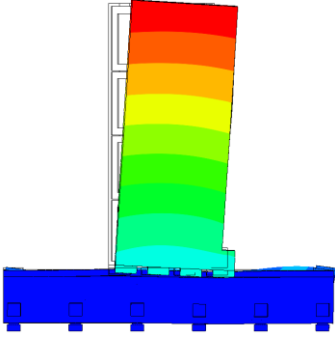
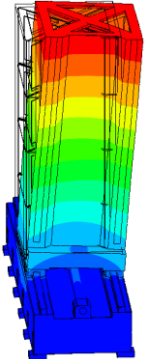
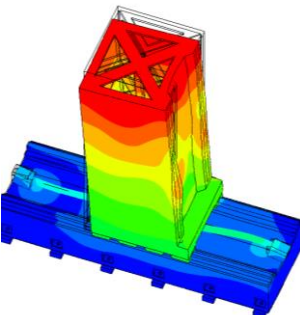
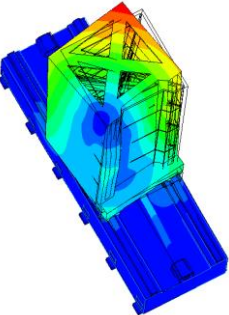


Obr. 32) Maximální deformace ocelového rámu

Modální analýza – B

Modální analýzou ocelového svařence jsme zjistili vlastní frekvence, kterým je potřeba se při obrábění vyhnout. Hrozilo by rozkmitání stroje. První vlastní frekvence nabývá hodnoty $F1 = 41,98 \text{ Hz}$, která vyvolává kmitání stroje ve směru lože. Druhá vlastní frekvence $F2 = 51,87 \text{ Hz}$, způsobuje kmitání stroje ve směru kolmém k loži ze strany na stranu, ostatní vlastní frekvence jsou znázorněny a popsány v Tab. 13).

Tab. 13) Vlastní frekvence ocelového rámu

B	Ocel – Modální analýza			
	F1 - 41,98 Hz	F2 – 51,87 Hz	F3 – 78,35 Hz	F4 – 91,40 Hz
				
	Překlopení stojanu ve směru lože	Naklonění kolmo k loži	Vyklopení stojanu kolmo k loži, posuv stojanu na vozících	Rotace stojanu

4.4 Varianta C – Ocelová skořepina + beton

Varianta třetí bude konstruována ze stejné oceli (S355J2) jako varianta B, nicméně bude řešena jako hybridní struktura. Bude vyrobena tenká skořepina s profilem stěny 10 mm, žebra 8 mm (Tab. 14). Dutiny svarku budou vyplněny betonem, který nahrazuje mohutné provedení žebér a vykazuje dobré tlumící vlastnosti.

Tab. 14) Základní parametry skořepiny lože a stojanu

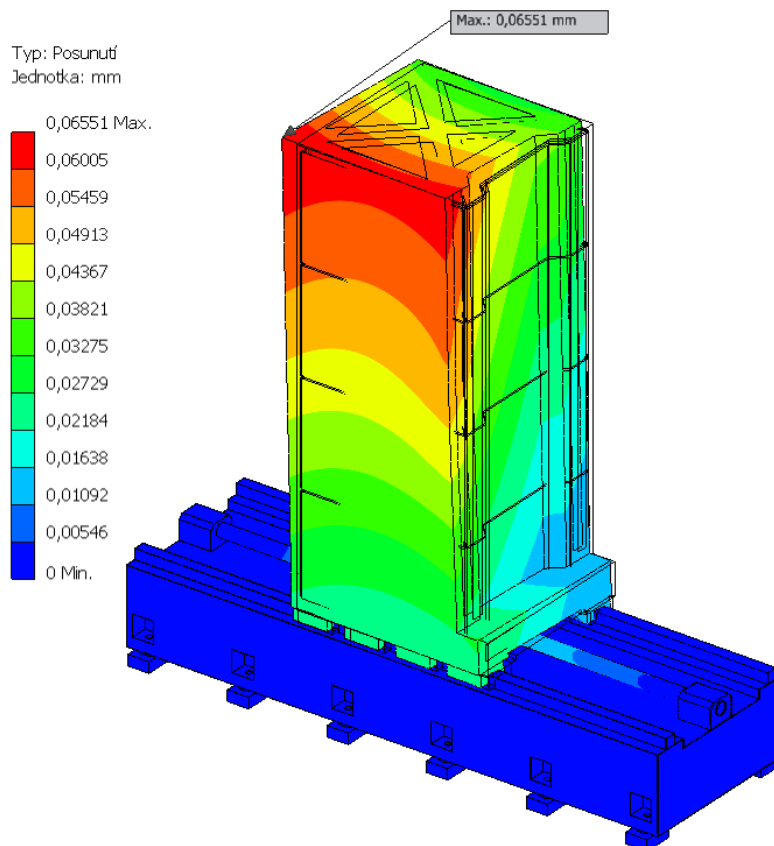
Síla stěn rámu [mm]	10
Síla žebér [mm]	8

Statická analýza – C

I když byl profil stěn a žebér rámu oproti variantě B značně ponížen, v kombinaci s betonovou výplní v dutinách svařence dosahuje stroj dobrých vlastností. Maximální posunutí rámu ocel – beton nabývá hodnoty $X_C = 0,06551 \text{ mm}$ (Obr. 33). Deformace jednotlivých dílců je v Tab. 15)

Tab. 15) Deformace nosných struktur ocelové skořepiny vyplněné betonem

C	Ocel + Beton		
	Statická analýza		
	Lože	Stojan	Celková
Deformace X [mm]	0,00483	0,06068	0,06551
Deformace Y [mm]	0,00621	0,05272	0,05893

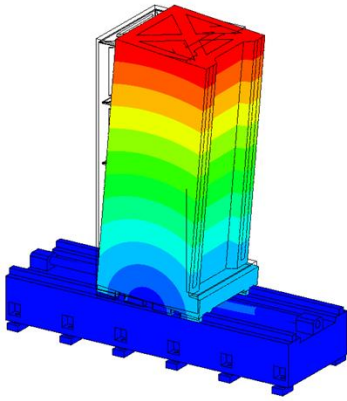
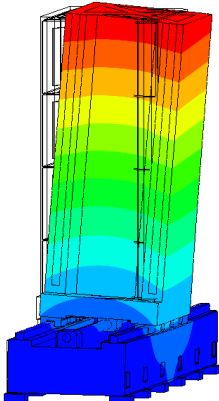
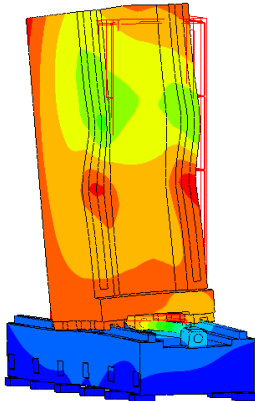
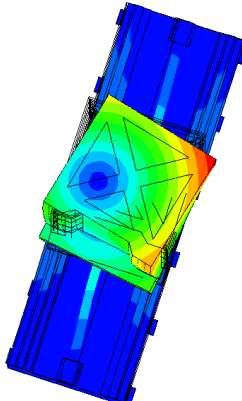


Obr. 33) Deformace stojanu z ocelové skořepiny vylité betonem

Modální analýza – C

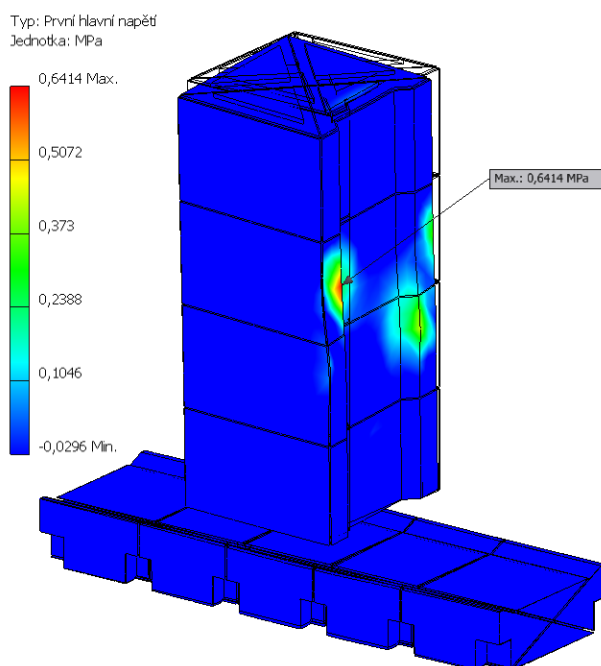
Modální analýzou rámu, který je konstruován jako ocelová skořepina vylitá betonem, jsme zjistili vlastní frekvence, které jsou vepsány do Tab. 16). První vlastní frekvence způsobuje překlopení stojanu ve směru lože, druhá frekvence naklápí stojan do stran, u třetí frekvence dochází k vyklopení stojanu z vedení a čtvrtá vlastní frekvence vyvolává krut stojanu kolem jeho vlastní osy.

Tab. 16) Vlastní frekvence rámu ocel – beton

C	Ocel + Beton – Modální analýza			
	F1 – 38,50 Hz	F2 – 43,34 Hz	F3 – 81,40 Hz	F4 – 93,83 Hz
				
	Naklopení stojanu ve směru lože	Naklonění kolmo k loži	Vyklopení stojanu, pohyb kyvný	Krut stojanu kolem své osy

Kontrola napětí výplně v rámu – C

U betonové výplně lože a stojanu byla provedena kontrola napětí, aby nedocházelo například k vydrolování betonu. Koncentrace napětí byla zjištěna v místě, přenosu zatížení od obrábění na stojan. Napětí nedosahuje hodnot, kterým by bylo potřeba věnovat větší pozornost (Obr. 34).



Obr. 34) Kontrola napětí betonové výplně

4.5 Varianta D – Beton

Poslední variantou je nosná struktura odlitá z betonu. Bylo uvažováno plné lože a stojan o síle stěny 300 mm. Parametry stojanu jsou uvedeny v Tab. 17).

Tab. 17) Základní parametry stojanu z betonu

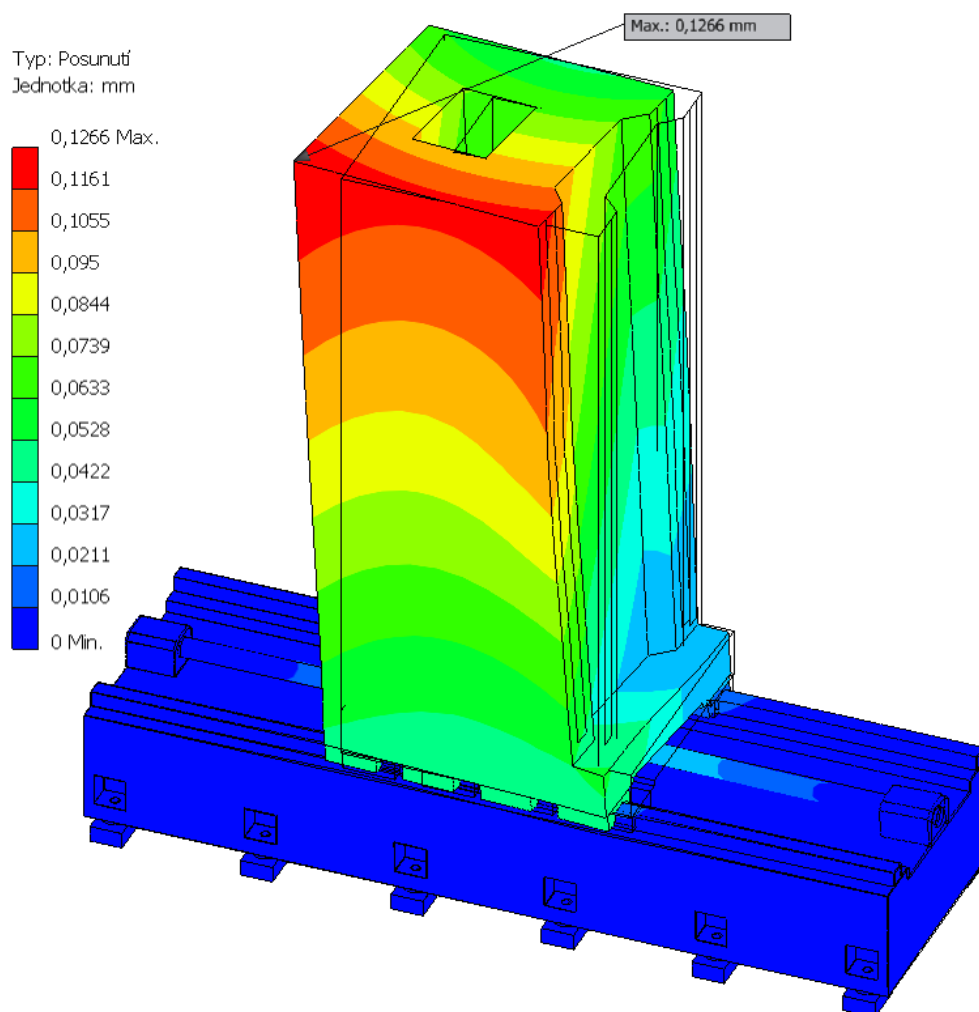
Síla stěn rámu	300 mm
----------------	--------

Statická analýza – D

Betonový stojan byl zatížen silami F_x a F_y , stejně jako každá jiná varianta. Statickou analýzou bylo zjištěno maximální deformace $X_D = 0,12660 \text{ mm}$ (Obr. 35). Deformace X a Y pro lože a stojan a celková deformace bylo zdokumentováno do tabulky. (Tab. 18)

Tab. 18) Deformace nosných struktur z betonu

D	Beton		
	Statická analýza		
	Lože	Stojan	Celková
Deformace X [mm]	0,01410	0,11250	0,12660
Deformace Y [mm]	0,01494	0,10126	0,11620

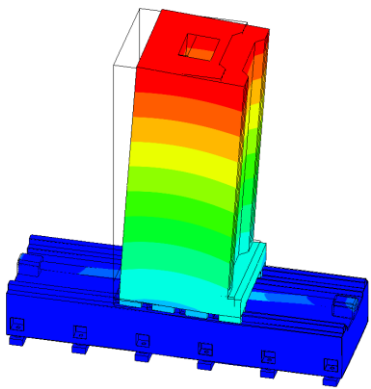
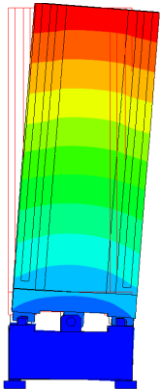
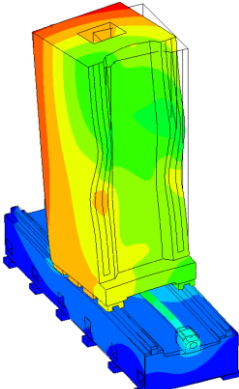
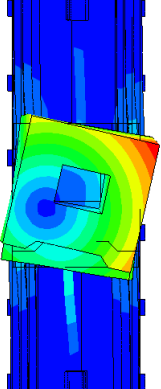


Obr. 35) Deformace stojanu z betonu

Modální analýza – D

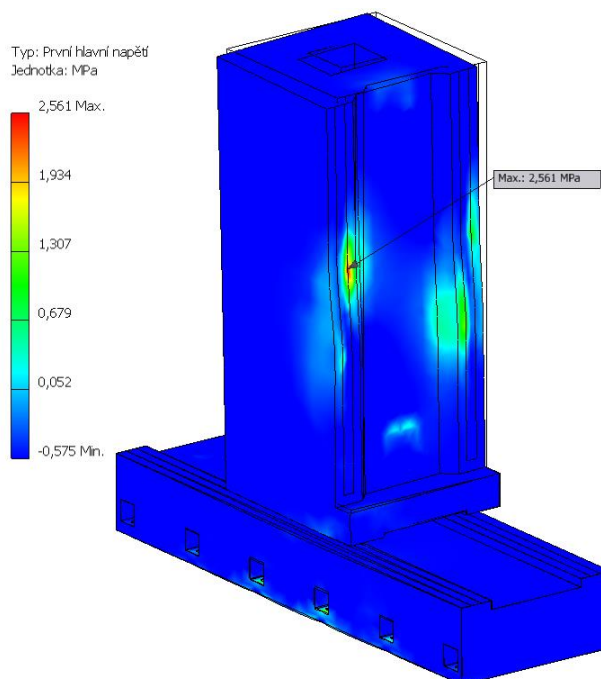
Vlastní frekvence rámu vyrobeného z betonu dosahovali nejnižších hodnot ze všech zkoumaných materiálů. Z Tab. 19) lze vyčíst, že druhá a třetí frekvence se přiblížili na rozdíl cca 2,5 Hz zároveň lze konstatovat, že třetí a čtvrtá frekvence jsou více méně totožné. V praxi se často vyskytují tyto frekvence v podobných oblastech (zdvojeně), je to dáno především symetričností zkoumaného tělesa.

Tab. 19) Vlastní frekvence rámu z betonu

D	Beton – Modální analýza			
	F1 – 32,63 Hz	F2 – 35,26 Hz	F3 – 71,07 Hz	F4 – 71,37 Hz
				
	Naklopení stojanu směru lože	Naklonění kolmo k loži	Vyklopení stojanu, pohyb kyvný	Kрут stojanu kolem své osy

Kontrola napětí v rámu – D

U rámu z betonu bylo kontrolováno také napětí. Špička napětí o velikosti 2,561 MPa byla zjištěna v místě styku vozík saní – kolejnice na stojanu (Obr. 36). Velikost tohoto napětí je akceptovatelná.



Obr. 36) Kontrola napětí v rámu

4.6 Hmotnostní a ekonomické zhodnocení

Hmotnosti lože a stojanu z každého materiálu byly vyčten z vlastností jednotlivých komponent v programu Autodesk Inventor Professional 2020. Při srovnání ocelového a litinového rámu bylo naplněno předpokladů o úspoře materiálu, respektive hmotnosti. Hmotnost lože z oceli (varianta B) byla o cca 28% nižší a hmotnost stojanu o cca 31% nižší než u lože a stojan odlité z litiny (varianta A). Tím je dosaženo značných finančních úspor. Zdaleka nejtěžší hmotnosti dosahuje hybridní struktura (varianta C), bylo potřeba rozlišit hmotnost ocelového svařence a betonové výplně. Ve srovnání s nejllehčí konstrukcí z oceli (B) je hybridní rám více než dvojnásobně těžší.

Po získání hmotností jednotlivých dílů bylo možné dopočítat přibližné finanční náklady potřebné na jejich výrobu. Orientační ceny jednotlivých dílů byly stanoveny jednoduchým výpočtem: CELKOVÉ NÁKLADY = *hmotnost v kilogramech* × *cena za jeden kilogram materiálu*. V ceně za 1 kg materiálu jsou zahrnuty veškeré náklady na jeden kilogram hotového materiálu (náklady za jeden kilogram vlastního materiálu, práce, náklady na výrobu, technologii a jiné). Hmotnosti jednotlivých dílů z použitých materiálů a potřebné náklady na jejich výrobu jsou zaznačeny v Tab. 20).

Tab. 20) Hmotnosti a potřebné náklady na jednotlivé díly z jednotlivých materiálů

Varianta	Materiál	Hmotnost [kg]			Náklady [Kč]			
		Lože	Stojan	Celkem	1 kg	Lože	Stojan	Celkem
A	Litina	1663	2112	3775	60 Kč	108 095	137 280	245 375
B	Ocel	1197	1462	2659	40 Kč	47 880	58 480	106 360
C	Ocel	767	935	5543	40 Kč	30 680	37 400	94 967
	Beton. výplň	1178	2663		7 Kč	82 46	18 641	
D	Beton	1545	2670	4215	25 Kč	38 625	66 750	105 375

4.7 Technicko-ekonomická hodnotová analýza

Technicko-ekonomické analýzy se provádí pomocí multi-kriteriálních hodnotících metod, které by měli díky zkušenostem řešitele přinést objektivní řešení daného technického či ekonomického problému. V praxi se multi-kriteriální metody využívají ke komplexnímu zhodnocení řešené problematiky tak, aby výsledek metody ukázal nejvýhodnější variantu dle požadavků řešitele. Pro vyhodnocení variant a k získání nejvhodnějšího výsledku bude využito metody PATTERN. [43]

PATTERN (Planing Assistance Through Technical Evaluation of Relevance Numbers) Jedná se o multi-kriteriální metodu (MCDM – Multi-Criteria Decision Making) s poměrně jednoduchou aplikací, velkou variabilitou a s možností hodnocení problému z různých hledisek. Její princip spočívá v hodnocení klíčových faktorů a vyhodnocení významnosti při rozhodovací činnosti. Metodou lze hodnotit různé parametry: technické, technologické, ekonomické atd. Tato metoda nám pomáhá objasnit problematické otázky v oblasti zájmu. Nevýhodou je možnost ovlivňování (zkreslení) výsledků hodnotitelem. [43]

Postup metody PATTERN se skládá z několika kroků:

- Výběr a definice hodnotících parametrů
- Stanovení významnosti parametrů
- Vlastní výpočet
- Stanovení pořadí srovnávaných variant [43]

4.7.1 Vlastní technicko-ekonomická analýza – PATTERN

Aby bylo možné určit nejvýhodnější řešení ze zkoumaných variant A-D z technického a ekonomického hlediska bude aplikováno multi-kriteriální metody PATTERN. Pro srovnávání variant bylo stanoveno pět hodnotících parametrů (Tab. 21). Budeme uvažovat dva přístupy, v jednom pro nás bude nejdůležitějším kritériem deformace (technická analýza) a v druhém bude hlavním kritériem cena (ekonomická analýza).

Tab. 21) Výběr hodnotících parametrů pro technicko-ekonomickou analýzu

Parametr	Popis parametru	Gradient
p.1	hmotnost	↓
p.2	deformace X	↓
p.3	deformace Y	↓
p.4	vlastní frekvence	↓
p.5	cena	↓

Bylo provedeno párové srovnání hodnotících parametrů z technického hlediska a bylo stanoveno, který parametr je vnímán jako důležitější ve srovnání s druhými. Toto srovnání bylo provedeno z technického hlediska (Tab. 22) i z hlediska ekonomického (Tab. 23). Cílem těchto tabulek je stanovení významnosti jednotlivých parametrů, které bude využito v dalších výpočtech.

Tab. 22) Párové porovnání významnosti parametrů – technické hledisko

Parametr	p.1	p.2	p.3	p.4	p.5	Suma	Pořadí
p.1	p.1	p.2	p.3	p.4	p.1	2	4.
p.2	-	p.2	p.2	p.2	p.2	5	1.
p.3	-	-	p.3	p.3	p.3	4	2.
p.4	-	-	-	p.4	p.4	3	3.
p.5	-	-	-	-	p.5	1	5.

Tab. 23) Párové porovnání významnosti parametrů – ekonomické hledisko

Parametr	p.1	p.2	p.3	p.4	p.5	Suma	Pořadí
p.1	p.1	p.2	p.3	p.4	p.5	1	5.
p.2	-	p.2	p.2	p.2	p.5	4	2.
p.3	-	-	p.3	p.3	p.5	3	3.
p.4	-	-	-	p.4	p.5	2	4.
p.5	-	-	-	-	p.5	5	1.

Dle stanoveného pořadí významnosti hodnotících parametrů, byly sestaveny „technická a ekonomická kvantifikovaná porovnávací matice“, kde bylo z technického hlediska (Tab. 24) a ekonomického hlediska (Tab. 25) určeno nakolik jsou spolu jednotlivé parametry spojeny. Pro toto hodnocení bylo použito jednoduché klasifikace: 1 – hodně; 2 – středně, 3 – málo.

Tab. 24) Technická kvantifikovaná porovnávací matice (technické hledisko)

Parametr	p.2	p.3	p.4	p.1	p.5	Suma	Váha(q)
p.2	1	1	1	3	2	8	33,33 %
p.3	-	1	1	3	2	7	29,17 %
p.4	-	-	1	3	2	6	25,00 %
p.1	-	-	-	1	1	2	8,33 %
p.5	-	-	-	-	1	1	4,17 %

Tab. 25) Ekonomická kvantifikovaná porovnávací matice (ekonomické hledisko)

Parametr	p.5	p.2	p.3	p.4	p.1	Suma	Váha(q)
p.5	1	2	2	2	1	8	33,33 %
p.2	-	1	1	1	3	6	25,00 %
p.3	-	-	1	1	3	5	20,83 %
p.4	-	-	-	1	3	4	16,67 %
p.1	-	-	-	-	1	1	4,17 %

Následně bylo sestavena „klasifikační předloha“ – Tab. 26 (společná pro technický i ekonomický přístup), které bude využito ke klasifikaci jednotlivých variant z pohledu hodnotících parametrů na škále od 1 do 4 dle skutečných hodnot. Váha klasifikačního stupně vždy závisí na gradientu každého hodnotícího parametru. Pokud je gradient klesající je nejvyšší klasifikačním stupněm 1. Pokud má gradient rostoucí tendenci nejvyšším bodem je číslo 4 a nejnižším 1. Minimum a maximum každého parametru bylo stanoveno dle skutečných hodnot jednotlivých variant. Stejně tak byla poměrově rozdělena škála hodnotících bodů.

Tab. 26) Klasifikační předloha

	min	max	1	2	3	4
hmotnost [kg]	2500	5500	2500	3500	4500	5500
deformace X [μm]	65	127	65	83	94	127
deformace Y [μm]	58	116	58	81	98	126
vlastní frekvence [Hz]	32	42	32	35	37	42
cena [Kč]	95000	250000	100000	150000	200000	250000

Dílčím výsledkem je Tab. 27 (společná pro technickou i ekonomickou analýzu), kdy skutečné hodnoty hodnotících parametrů variant A-D (hmotnost, deformace X, deformace Y, vlastní frekvence a cena) byly porovnávány s milníky a klasifikovány (na stupnici 1–4) dle předchozí klasifikační předlohy (Tab. 26).

Tab. 27) Klasifikace hodnotících parametrů jednotlivých variant A-D

Parametr	Varianta A (litina)		Varianta B (ocel)		Varianta C (ocel + beton)		Varianta D (beton)	
	Skutečná hodnota	body	Skutečná hodnota	body	Skutečná hodnota	body	Skutečná hodnota	body
Hmotnost [kg]	3775	2	2659	1	5543	4	4215	3
Deformace X [mm]	74,6	2	89,5	3	65,5	1	126,6	4
Deformace Y [mm]	64,3	1	78	2	58,9	1	116,2	4
Vlastní frekvence [Hz]	41,95	4	41,98	4	38,5	3	32,63	1
Cena [Kč]	245 375	4	106 360	1	94 967	1	105 375	1

Výsledkem technicko-ekonomické analýzy multi-kriteriální metodou Patternu jsou dvě tabulky – technická analýza a ekonomická analýza. V první (technické analýze) jsme se věnovali srovnáváním variant A-D z technického pohledu. Významným hodnotícím parametrem pro nás byla deformace X a Y. Výstupem analýzy z technického hlediska je Tab. 28). Z tabulky je zřejmé, že jako nejvhodnějším provedením (z technického hlediska) lože a stojanu obráběcího stroje s nejlepší statickou tuhostí se jeví Hybridní struktura (varianta C – ocelová skořepina vylitá betonem). Za vyhovující se dá považovat i rám z litiny (varianta A). Jako nedostačující, z pohledu technické analýzy, se ukázal rám provedený jako svařenec (varianta B) a také odlitý rám z betonu (varianta D).

Tab. 28) Pattern analýza – technické hledisko

Parametr	Jednotka	Váha	Varianta							
			A		B		C		D	
hmotnost	[kg]	8,33 %	2,00	0,167	1,00	0,333	4,00	0,083	3,00	0,111
			2,00		4,00		1,00		1,33	
deformace X	[N/mm]	33,33 %	2,00	0,667	3,00	0,444	1,00	1,333	4,00	0,333
			2,00		1,33		4,00		1,00	
deformace Y	[N/mm]	29,17 %	1,00	1,167	2,00	0,583	1,00	1,167	4,00	0,292
			4,00		2,00		4,00		1,00	
vlastní frekvence	[Hz]	25,00 %	4,00	0,250	4,00	0,250	3,00	0,333	1,00	1,000
			1,00		1,00		1,33		4,00	
cena	[Kč]	4,17 %	4,00	0,042	1,00	0,167	1,00	0,167	1,00	0,167
			1,00		4,00		4,00		4,00	
Celkem Sj		100,00 %	2,292		1,778		3,083		1,903	
Relativní technická úroveň			74 %		58 %		100 %		62 %	
Pořadí z technického hlediska			2		3		1		4	

Z druhého, ekonomického přístupu, bylo pro nás nejdůležitějším kritériem cena. Teno přístup se může jevit jako neobjektivní. V dnešní době je ale ekonomická náročnost pro spoustu zákazníků často nejdůležitějším faktorem a až potom další technická kritéria, které přímo ovlivňují vlastnosti stroje. Proto byla metoda Pattern použita i na zjištění ekonomické náročnosti jejímž výsledkem je Tab. 29).

Z ekonomického hlediska se jako nejvýhodnější ukázala varianta C (ocelový svařenec vyplněný betonem). Jako dobrou variantou z ekonomického pohledu je i varianta D (betonový rám) i varianta C (svařenec z oceli). Nákladným, a proto nevhodným řešením se z ekonomického přístupu jevil odlitek z šedé litiny (varianta A).

Tab. 29) Pattern analýza – ekonomické hledisko

Parametr	Jednotka	Váha	Varianta							
			A		B		C		D	
hmotnost	[kg]	4,17 %	2,00	0,083	1,00	0,167	4,00	0,042	3,00	0,056
			2,00		4,00		1,00		1,33	
deformace X	[N/mm]	25,00 %	2,00	0,500	3,00	0,333	1,00	1,000	4,00	0,250
			2,00		1,33		4,00		1,00	
deformace Y	[N/mm]	20,83 %	1,00	0,833	2,00	0,417	1,00	0,833	4,00	0,208
			4,00		2,00		4,00		1,00	
vlastní frekvence	[Hz]	16,67 %	4,00	0,167	4,00	0,167	3,00	0,222	1,00	0,667
			1,00		1,00		1,33		4,00	
cena	[Kč]	33,33 %	4,00	0,333	1,00	1,333	1,00	1,333	1,00	1,333
			1,00		4,00		4,00		4,00	
Celkem S _j		100,00 %	1,917		2,417		3,431		2,514	
Relativní ekonomická úroveň			56 %		70 %		100 %		73 %	
Pořadí z ekonomického hlediska			3		2		1		4	

5 ZHODNOCENÍ A DISKUZE

Rychlost rozvoje vědy a techniky dosahuje nebývalých rozměrů, která sebou přináší obrovskou řadu možností a příležitostí. V moderním strojírenství můžeme pozorovat, jak s těmito možnostmi výrobci obráběcích strojů nakládají. Zákazníci vyžadují stroje s absolutní produktivitou, dobrou spolehlivostí, vynikající tuhostí a vysokou přesností. Úkolem výrobce je tyto požadavky spojit v jeden funkční celek (obráběcí stroje), který dokáže dodat v rozumném časovém horizontu za akceptovatelnou cenu.

Tato práce se ze široka dívala na nosné struktury (rámy) obráběcích strojů, zkoumá jednotlivé díly, z nichž se rámy skládají a rozebírá materiály, které se používají v konstrukci OS. Výběr a konkrétní vývoj materiálu, kombinace materiálů a konstrukční provedení stroje nabízí různorodé stupně volnosti výrobcům OS. Nejdostupnějšími materiály, u kterých mají výrobci OS nejdokonaleji zvládnuté technologické postupy výroby a perfektně znají jejich mechanické vlastnosti jsou oceli a litiny. Mezitím jsou vynalézány a zkoumány další materiály, které mohou vykazovat lepší vlastnosti. Vlastnosti těchto materiálů jsou z velké části nositelem výsledných vlastností celého stroje. [39]

Hlavním cílem práce bylo porovnání nosných struktur vyrobených z odlišných materiálů. Proto byly vytvořeny čtyři modely ze čtyř různých materiálů. Tyto modely byly zkoumány pomocí simulačních metod, které jsou dnes běžně součástí procesu vývoje a optimalizace. Vzorem jednotlivých modelů byl společný základní výpočtový model (Obr. 26), který byl vždy lehce aktualizován (profil stěn, síla žeber) s ohledem na rozdílné vlastnosti srovnávaných materiálů. Pro správnou tvorbu sítě konečných prvků a zjednodušení výpočtu byly modely značně zjednodušeny o konstrukční elementy (zaoblení, sražené hrany, odlehčovací otvory). U modelů bylo vždy uvažováno stejné zatížení.

V první variantě (A) byl stojan vyroben jako odlitek z šedé litiny s lupínkovým grafitem ČSN 42 24 30. Vlivem nižší pevnosti v tahu, krutu i ohybu a Youngova modulu pružnosti bylo voleno silnějších stěn i žeber. Oproti litině bylo u varianty B uvažováno o 30% menší profil stěn i žeber stojanu a lože. Tato varianta byla navržena jako svařenec z konstrukční oceli. Varianta C byla navržena jako tenká ocelová skořepina. Dutiny lože a stojanu byly vyplněny betonem. Poslední rám (varianta D) byl konstruován jako odlitek z betonu. Modely A-D byly zatíženy stejně velkými silami, které mají simulovat obráběcí proces a byly postupně podrobeny statické analýze, pro odhalení maximální deformace rámu, a modální analýze jejímž výsledkem jsou vlastní frekvence soustavy. Tlustý [39] poukázal na to, že u stroje nelze dosáhnout vysoké dynamiky při přesunu velkých hmot, a proto bylo provedeno hmotnostní a ekonomické zhodnocení.

Modely jednotlivých variant byly srovnávány technicko-ekonomickou analýzou pomocí multi-kriteriální hodnotící metody PATTERN. Díky této metodě bylo možné provést objektivní srovnání jednotlivých návrhů. Porovnání bylo provedeno pomocí pěti hodnotících kvantifikovaných parametrů: hmotnosti, deformace X, deformace Y, vlastní frekvence a ceny. Hodnotící metoda byla aplikována dvakrát, jednou z technického pohledu a jednou z ekonomického pohledu.

Z technického i ekonomického hlediska se ukázala jako nejvhodnější varianta C (ocelová skořepina + betonová výplň), která vykazovala nejlepší vlastnosti v oblasti tuhosti (technická analýza) a byla i nejvýhodnější řešením z pohledu ekonomické analýzy. Zajímavým výsledkem byl fakt, že například rám z šedé litiny (varianta A) si vedl obstojně z hlediska technického

naproti tomu z ekonomického hlediska byl značně nevýhodný. Opačným extrémem byl rám z betonu, který by byl z hlediska ekonomického výhodný ale z technického hlediska značně nevyhovující. I když rám z betonu nabýval nízkých vlastních frekvencí, hodnoty deformace nabývaly až dvojnásobných hodnot ve srovnání s nejvhodnější variantou C. Podobně tomu bylo u nosných struktur ocelového svařence, který byl sice cenově dostupný ale s jeho parametry neprošel multi-kriteriální metodou z pohledu technické analýzy.

Multi-kriteriální metoda se ukázala jako tím správným přístupem k dosažení komplexních výsledků. Zároveň bylo demonstrováno, že je důležité nazačátku charakterizovat, které parametry jsou pro daný případ významné, neboť výsledky jsou ovlivňovány tím, z jakého hlediska přistupují k řešení daného problému. Proto je nutné k výsledkům přistupovat vždy individuálně a nelze z nich vyvodit globální závěr.

6 ZÁVĚR

Nosné struktury CNC obráběcích strojů mohou být v dnešní době vyráběny z různých materiálů rozdílných vlastností, které výrazně ovlivňují vlastnosti celého stroje a jeho kvalitu a přesnost obrábění. Nejdostupnějším materiálem ve stavbě strojů jsou oceli a litiny. Je to dáno především dokonalým poznáním technologie výroby a mechanických vlastností. Potřeby zákazníků přesnějších, spolehlivějších a ekonomičtějších strojů dává možnost uplatnění v konstrukci nosných struktur novým, nekonvenčním materiálům jako jsou kompozitní materiály, hybridní struktury a přírodní materiály.

Nesmírnou kapacitu vnáší do konstrukce OS rozvoj výpočetní techniky a s ní použití sofistikovaných výpočtových programů a simulačních metod. K simulaci například průběhu napětí, deformací, vlastních frekvencí, proudění tekutin využíváme numerickou metodu konečných prvků (MKP). Využití této metody už v procesu navrhování vede ke správné optimalizaci a dimenzování stroje.

Návrh konstrukce obráběcích strojů je velmi komplikovaný proces, do kterého vstupuje spousta důležitých proměnných a mnoho ovlivňujících faktorů. Pro zvýšení objektivity hodnocení zkušenými konstruktéry v rozhodovacím procesu a usnadnění komplexního srovnávání se správnou volbou nejvhodnějšího řešení doporučuji použití multi-kriteriálních metod.

V předložené diplomové práci za využití numerické metody konečných prvků s následnou simulací vytvořených modelů z rozdílných materiálů bylo zjištěno nejlepších technicko-ekonomických vlastností u nosné struktury varianty B (ocelová skořepina vyplněná betonem). Z ekonomické analýzy vyplývá, že u nekonvenčních materiálů (v našem případě betonu) nejsou vysoké pořizovací náklady tak silným argumentem, jak se na začátku zdálo. K vyhodnocení bylo aplikováno multi-kriteriální metody PATTERN. Lze konstatovat, že zkoumané varianty byly pravděpodobně lehce předdimenzované.

7 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] HUMÁR, Anton. *Technologie obrábění - 1. část* [online]. 2003 [cit. 2019-01-03]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/TI_TO-1cast.pdf. VUT
- [2] BORSKÝ, Václav. *Základy stavby obráběcích strojů*. Vyd. 2., přeprac. Brno: VUT, 1991. ISBN 80-214-0361-6.
- [3] HUMÁR, Anton. *Výrobní Technologie II* [online]. [cit. 2019-01-03]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/VyrobníTechnologie_II.pdf
- [4] VRBKA, Martin a Michal VAVERKA. *Metoda konečných prvků* [online]. [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: http://www.shigley.cz/images/texts/file/prednaska1_mkp.pdf
- [5] CRAHMALIUC, Radu. *75 Years of the Finite Element Method (FEM)* [online]. 21.3.2019 [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: <https://www.simscale.com/blog/2015/11/75-years-of-the-finite-element-method-fem/>
- [6] *KOVOSVIT MAS machine your future* [online]. [cit. 2019-01-06]. Dostupné z: <https://www.kovosvit.cz/obrabeci-stroje.html>
- [7] MAREK, Jiří. *Konstrukce CNC obráběcích strojů*. MM publishing, 2006. ISBN 1212-2572.
- [8] K obrábění součástí malých a velkých rozměrů. In: *DOCPLAYER* [online]. [cit. 2019-01-03]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/4871934-K-obrabeni-soucasti-malych-a-strednich-rozmeru.html>
- [9] ORSAG, Petr. *Přestavba ručně řízené frézky na CNC frézku*. Brno, 2016. Bakalářská práce. VUT.
- [10] *Základy frézování* [online]. [cit. 2019-01-04]. Dostupné z: https://www.spszengrova.cz/texty/texty/PRA/zaklady_frezovani.pdf
- [11] KONEČNÝ, Zdeněk a Václav KRYS. *CAD III. - Pevnostní analýzy* [online]. [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: <http://www.kvm.tul.cz/getFile/id:2596>
- [12] MAREK, Jiří. *Konstrukce CNC obráběcích strojů III*. Praha: MM publishing, 2014. MM speciál. ISBN 978-80-260-6780-1
- [13] FUSEK, Martin a Jaroslav ROJÍČEK. *Metoda konečných prvků I* [online]. [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: http://projekty.fs.vsb.cz/463/edubase/VY_01_010/Methodakonecnychprvku/textproelearning/METODA20KONECNYCH20PRVKUAEI2001.pdf
- [14] *Starrag* [online]. [cit. 2019-01-08]. Dostupné z: <https://www.starrag.com/de/v/model-range/portal-and-gantry-machining-centers/5/machine/tfs/24>
- [15] KUBÍČEK, J.: *Základy stavby výrobních strojů, Obráběcí stroje*, Západočeská univerzita v Plzni, 2001, 159 s., ISBN 80-7082-710-6
- [16] BORSKÝ, V.: *Základy stavby obráběcích strojů, skriptum ES VUT Brno*, 2. vydání, Grafia Prostějov, 1991, 214 s., ISBN 80-214-0361-6
- [17] *Soustružení: walter-nastroje* [online]. [cit. 2019-01-13]. Dostupné z: <https://www.walter-nastroje.cz/index.php/soustruzeni>

- [18] *MASTURN Line 550i / 820i Universal centre lathes with CNC system* [online]. In: . s. 12 [cit. 2019-01-13]. Dostupné z: https://www.kovosvit.cz/download/lightproducts_produkty_cs/1540365266_cs_1_113_masturnlineen-web.pdf
- [19] ČEP, Robert. *Technologie II* [online]. [cit. 2019-01-13]. Dostupné z: http://homel.vsb.cz/~cep77/PDF/skripta_Technologie_II_2dil.pdf
- [20] *CompoTech - Kompozity pro stroje* [online]. [cit. 2019-04-04]. Dostupné z: <http://www.compotech.com/cs/technologie/kompozity-pro-stroje/>
- [21] VOOK, Patrik, Ivan DIVIŠ a Eduard STACH. *Těžké obráběcí stroje* [online]. In: . s. 8 [cit.2019-01-22]. Dostupné z: https://www.czspos.cz/akce/20100225.emo2009/12_tezke_obrabeci_stroje.pdf
- [22] *Konstrukce obráběcích strojů* [online]. 20.2.2013 [cit. 2019-01-23]. Dostupné z: https://www.technickytydenik.cz/rubriky/serialy/konstrukce-obrabecichstroju/konstrukce-cnc-obrabecich-stroju-3_20102.html
- [23] JANÍČEK, Přemysl a Jiří MAREK. *Expertní inženýrství v systémovém pojetí*. Praha: Grada, 2013. Expert (Grada). ISBN 978-80-247-4127-7.
- [24] ŠVÉDA, Jiří a Jan SMOLÍK. *Nové kinematické struktury strojů* [online]. [cit. 2019-02-08]. Dostupné z: https://www.czspos.cz/akce/20100225.emo2009/11_nove_kinematicke_struktury_stroju.pdf
- [25] *Soustružení - Hlavní části soustruhu* [online]. [cit. 2019-02-10]. Dostupné z: <https://www.osu.cz/dokumenty/proportal/pdf/kpv/soustruzeni/lekce2.htm>
- [26] HYNEK, Martin. *Výpočtová zpráva: Vřeteník - MKP* [online]. [cit. 2019-02-10]. Dostupné z: https://kks.zcu.cz/export/sites/kks/projekty-ver-fin/OPVK_PU/KA_07_publicace/KA07-VYPOCTOVA-ZPRAVA-VRETENIK--MKP.pdf
- [27] LAŠOVÁ, Václava. *Základy stavby obráběcích strojů* [online]. , 153 [cit. 2019-02-10]. Dostupné z: https://zcu.cz/export/sites/zcu/pracoviste/vyd/online/Zaklady_stavby.pdf
- [28] LAŠOVÁ, Václava. *OS s hlavním rezným pohybem rotačním: Soustruhy, vrtačky* [online]. , 45 [cit. 2019-02-10]. Dostupné z: <http://home.zcu.cz/~lasova/ZSVS/p55.ppt>
- [29] *Svislá soustružnická obráběcí centra* [online]. 2001, , 6 [cit. 2019-02-10]. Dostupné z: <http://www.cnckonstrukce.cz/clanek-118/svisla-soustruznicka-obrabeci-centra.html>
- [30] BAMBUCH, Josef. *Nový vřeteník srdce strojů pro těžké obrábění. Technický týdeník* [online]. 2006 [cit. 2019-02-11]. Dostupné z: https://www.technickytydenik.cz/rubriky/archiv/novy-vretenik-srdce-stroju-pro-tezke-obrabeni_13541.html
- [31] *Drylin® Lineární posuvné stoly SLW* [online]. 12 [cit. 2019-02-11]. Dostupné z: https://www.hennlich.cz/fileadmin/_migrated/Posuvn%C3%A9_stoly_SLW.pdf
- [32] *TOS-MET Slévárna* [online]. [cit. 2019-03-26]. Dostupné z: <http://www.tos-met.com/>
- [33] *DMG MORI* [online]. [cit. 2019-03-26]. Dostupné z: <https://cz.dmgmori.com/produkty/stroje/frezovani/petiose-frezovani/dmu-portal/dmu-600-p>
- [34] *Machinery Trade International* [online]. [cit. 2019-03-26]. Dostupné z: <https://www.mtimagazine.com/2018/02/>

- [35] *Kompozitní materiál DemTec* [online]. [cit. 2019-04-01]. Dostupné z: <https://www.demmeler.com/cs/vyrobky-a-obchod/zakazkova-vyroba/kompozitni-material-demtecr/>
- [36] *Hydropol - Special concrete* [online]. [cit. 2019-04-01]. Dostupné z: <https://www.framag.com/en/products/base-framebase-frame/special-concrete-4695.html>
- [37] *Obráběcí stroje a technologie na EMO Milano 2009* [online]. [cit. 2019-04-01]. Dostupné z: https://www.czspos.cz/akce/20100225.emo2009/sbornik_final_maly.pdf
- [38] *Composites in Production Machines* [online]. 2017 [cit. 2019-04-01]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827117305218?via%3Dihub>
- [39] *Materials in machine tool structures* [online]. 2015 [cit. 2019-04-01]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0007850615001444>
- [40] ŠIKUTA, Lukáš. *Kompozitní materiály ve stavbě obráběcích strojů*. Brno, 2011. Bakalářská práce. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ. Vedoucí práce Michal Holub.
- [41] WECK, Manfred a Christian BRECHER. *Werkzeugmaschinen - Fertigungssysteme Band 2: Konstruktion und Berechnung*. Berlin: VDI Verlag, 2006. ISBN 31-840-1384-7.
- [42] *TOS Kuřim* [online]. [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: <http://www.tos-kurim.cz/cz/produktove-portfolio/svisle-soustruhy-karusely/ckd-skdy>
- [43] BRADLEY, Jim. *Evaluation methods in environmental assessment ONTARIO MINISTRY OF THE ENVIRONMENT a VHB RESEARCH & CONSULTING INC.* 1990. ISBN 0772973164

8 SEZNAM ZKRATEK, SYMBOLŮ, OBRÁZKŮ A TABULEK

8.1 Seznam zkratk a symbolů

ω	[Hz]	budící frekvence
Ω_0	[Hz]	kruhová frekvence
m	[kg]	hmotnost
Ψ	[–]	fázový úhel
E	[GPa]	Youngův modul pružnosti
F_y	[N]	zatěžující síla v Y
F_x	[N]	zatěžující síla v X
k	[N/mm]	tuhost
X_A	[mm]	posunutí A
X_B	[mm]	posunutí B
X_C	[mm]	posunutí A
X_D	[mm]	posunutí A
F_1	[Hz]	první vlastní frekvence
F_2	[Hz]	druhá vlastní frekvence
F_3	[Hz]	třetí vlastní frekvence
F_4	[Hz]	čtvrtá vlastní frekvence

8.2 Seznam obrázků

Obr. 1) Univerzální CNC hrotový soustruh bez krytován – MASTURN 550i [18]....	19
Obr. 2) MKP – vřeteník [28]	20
Obr. 3) Stroj MASTURN Kovosvit Mas – pohled na lože, vřeteník, support a koník [18].....	20
Obr. 4) Dvoustožanový karusel s pojízdným portálem ČKD SKDY [42].....	21
Obr. 5) Vertikální frézovací stroj KOVOSVIT MCV 1000 (s krytováním a bez krytování) [6].....	22
Obr. 6) Optimalizace nosné struktury stroje MKP [6].....	23
Obr. 7) Teoretické možnosti žebrování stojanů [41]	26
Obr. 8) Teoretické možnosti žebrování loží [41].....	26
Obr. 9) Průřez a model nosníku [11]	28
Obr. 10) Systém stroje a soustava stroje.....	29
Obr. 11) Nejistota výroby a pracovní nejistota [12]	30
Obr. 12) Kmitání volné: a) netlumené b) s tlumením [2]	32
Obr. 13) Vliv různých parametrů na dynamickou stabilitu [2].....	32
Obr. 14) Reprodukční princip samobuzeného kmitání [12]	33
Obr. 15) Princip polohové vazby samobuzeného kmitání [12]	33
Obr. 16) Rozměry svarů [12].....	35
Obr. 17) Základní typy tvaru uhlíku: lamelární (vlevo), červíkovitý (uprostřed), kuličkový (vpravo)[40]	36
Obr. 18) Odlité lože stroje DMU 210P firmy DMG Mori [33].....	36
Obr. 19) Moderní nosná struktura obráběcího centra firmy DMG Mori s jednodílným ložem z tvárné litiny EN-GJS-600 [34]	37
Obr. 20) Částicové a vláknové výztuže v kompozitním materiálu [40]	37
Obr. 21) Vřeteník z kompozitu a detail na duté uhlíkové nanovláknó [20]	38
Obr. 22) Nosná struktura z hybridního materiálu Hydropol od společnosti Framag...39	
Obr. 23) Kmitavé vlastnosti svařované konstrukce s výplní DemTec a bez výplně [35].....	40
Obr. 24) Žula [40].....	40
Obr. 25) Nosník portálu laserového obráběcího centra z keramiky [40].....	41
Obr. 26) Základní zjednodušený simulační model horizontálního obráběcího centra	46
Obr. 27) Zvolená kombinace žebrování lože [41]	46
Obr. 28) Zvolená kombinace žebrování stojanu [41]	47
Obr. 29) Schématické znázornění uložení válečků [43].....	47
Obr. 30) Zvolené válečkové lineární vedení SKF LLUHC 55 LA [43]	47
Obr. 31) Celková deformace nosných struktur z litiny.....	49
Obr. 32) Maximální deformace ocelového rámu.....	50

Obr. 33) Deformace stojanu z ocelové skořepiny vylité betonem	52
Obr. 34) Kontrola napětí betonové výplně.....	53
Obr. 35) Deformace stojanu z betonu	54
Obr. 36) Kontrola napětí v rámu	55

8.3 Seznam tabulek

Tab. 1) Velikostní kategorie CNC obráběcích strojů.....	18
Tab. 2) Třídění CNC obráběcích center pro nerotační součásti s vodorovnou osou vřetena [12]	24
Tab. 3) Třídění CNC obráběcích center pro nerotační součásti se svislou osou vřetena [12]	25
Tab. 4) Počet elementů a počet rovnic [11]	28
Tab. 5) Důležité vlastnosti při volbě materiálu [7]	34
Tab. 6) Fyzikální vlastnosti materiálů nosných struktur [12]	35
Tab. 7) Základní vstupní parametry stroje	45
Tab. 8) Základní parametry lože a stojanu z litiny.....	48
Tab. 9) Deformace nosných struktur z litiny	48
Tab. 10) Vlastní frekvence rámu z litiny	49
Tab. 11) Základní parametry lože a stojanu z oceli	50
Tab. 12) Deformace nosných struktur ocelového svařence	50
Tab. 13) Vlastní frekvence ocelového rámu	51
Tab. 14) Základní parametry skořepiny lože a stojanu	52
Tab. 15) Deformace nosných struktur ocelové skořepiny vyplněné betonem	52
Tab. 16) Vlastní frekvence rámu ocel – beton	53
Tab. 17) Základní parametry lože a stojanu z betonu	54
Tab. 18) Deformace nosných struktur z betonu	54
Tab. 19) Vlastní frekvence rámu z betonu	55
Tab. 20) Hmotnosti a potřebné náklady na jednotlivé díly z jednotlivých materiálů ..	56
Tab. 21) Výběr hodnotících parametrů pro technicko-ekonomickou analýzu.....	57
Tab. 22) Párové porovnání významnosti parametrů – technické hledisko	57
Tab. 23) Párové porovnání významnosti parametrů – ekonomické hledisko	57
Tab. 24) Technická kvantifikovaná porovnávací matice (technické hledisko).....	58
Tab. 25) Ekonomická kvantifikovaná porovnávací matice (ekonomické hledisko)....	58
Tab. 26) Klasifikační předloha.....	58
Tab. 27) Klasifikace hodnotících parametrů jednotlivých variant A-D.....	59
Tab. 28) Pattern analýza – technické hledisko.....	59
Tab. 29) Pattern analýza – ekonomické hledisko.....	60


9 SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1 – Ohybová a torzní tuhost stojanu s různým žebrováním

Příloha 2 – Porovnání uzavřených tvarů loží

PŘÍLOHY

PŘÍLOHA 1 – OHYBOVÁ A TORZNÍ TUHOST STOJANU S RŮZNÝM ŽEBROVÁNÍM

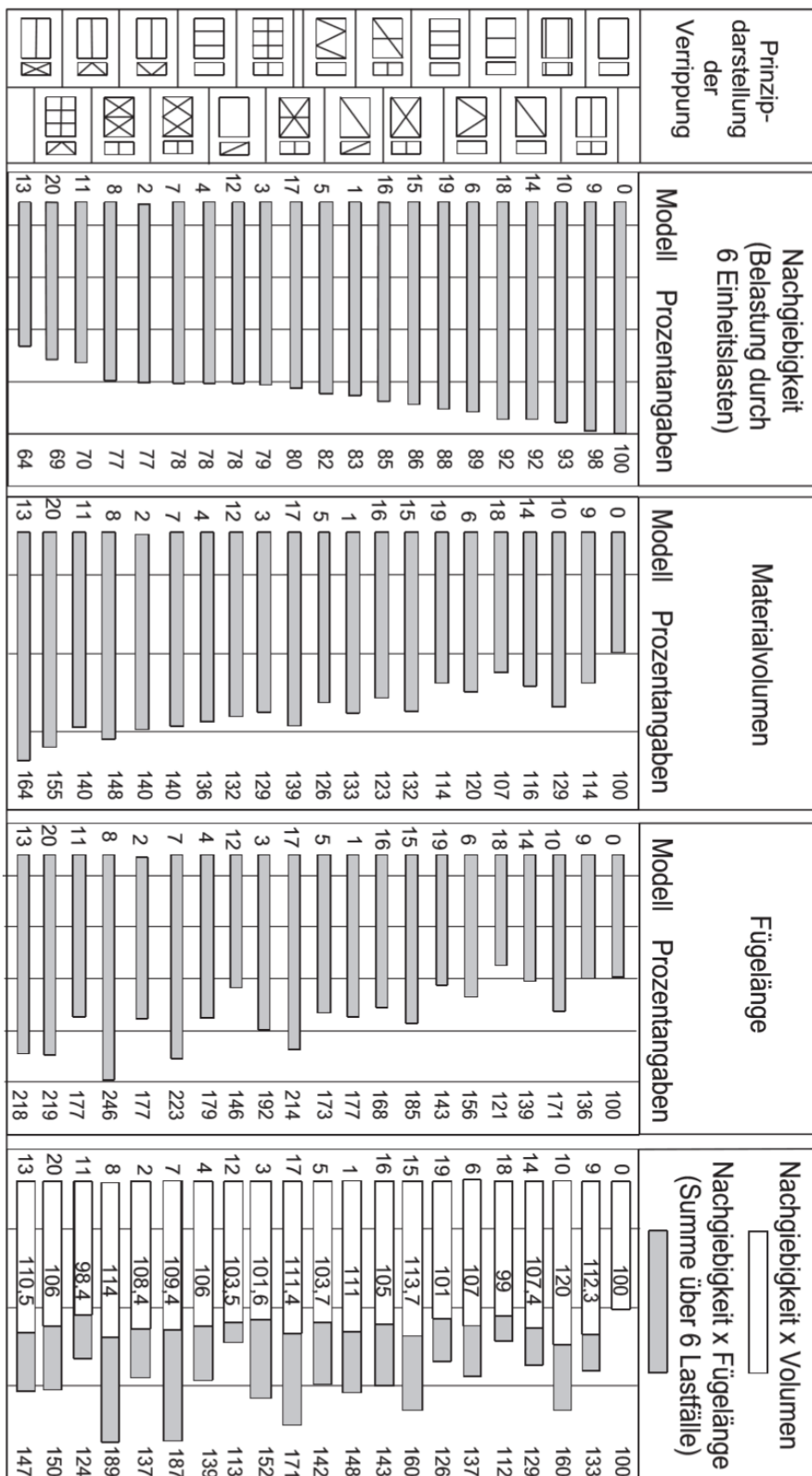
Fall	rel. Biegefestigkeit		rel. Torsionssteifigkeit		relatives Volumen		Abmessungen L = 455 mm b = 154 mm h = 154 mm s = 4 mm
	50 %	100 %	50 %	100 %	100 %	150 %	
OR m.Kpl	100	100	100	100	100	100	
OR o.Kpl	100	100	9,4	101	93	107	
A m.Kpl	120	120	101	101	122	115	
A o.Kpl	111	111	12,1	101	115	107	
B m.Kpl	120	120	101	101	145	115	
B o.Kpl	112	112	18,2	116	138	107	
C m.Kpl	118	118	116	104	132	115	
C o.Kpl	118	118	104	104	125	107	
D m.Kpl	142	142	119	117	163	115	
D o.Kpl	142	142	117	104	157	107	
E, F	100	100	104	104	107	107	
G, H	100	100	109	109	115	115	

o.Kpl = ohne Kopfplatte

m.Kpl = mit Kopfplatte

OR = ohne Rippen

PŘÍLOHA 2 – POROVNÁNÍ UZAVŘENÝCH TVARŮ LOŽÍ



Zdroj: WECK, Manfred a Christian BRECHER. *Werkzeugmaschinen - Fertigungssysteme Band 2: Konstruktion und Berechnung*. Berlin: VDI Verlag, 2006. ISBN 31-840-1384-7.