Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя
(повне найменування вищого навчального закладу)

Факультет інженерії машин, споруд та технологій
(назва факультету)

Кафедра конструювання верстатів, інструментів та машин
(повна назва кафедри)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

магістр
(освітньо-кваліфікаційний рівень)

на тему: **Оптимізація конструкції станини фрезерного верстата методом комп'ютерного моделювання.**

Виконав: студент (ка) 6 курсу, групи МВнм-61
напряму підготовки (спеціальності)
133 «Галузеве машинобудування»
(шифр і назва напряму підготовки, спеціальності)

		Зазуляк Т.Г.
	(підпис)	(прізвище та ініціали)
Керівник		Гагалюк А.В.
	(підпис)	(прізвище та ініціали)
Нормоконтроль		Ярема І.Т.
	(підпис)	(прізвище та ініціали)
Завідувач кафедри		Кобельник В.Р.
	(підпис)	(прізвище та ініціали)
Рецензент		Окіпний І.Б.
	(підпис)	(прізвище та ініціали)

Тернопіль
2021

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

(повне найменування вищого навчального закладу)

Факультет *Інженерії машин, споруд та технологій*

Кафедра *Конструювання верстатів, інструментів та машин*

Освітньо-кваліфікаційний рівень *магістр*

Напрям підготовки

(шифр і назва)

Спеціальність 133 «Галузеве машинобудування»

(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:
Зав. кафедри ВІ
к.т.н., доц. Кобельник В.Р.
«15» січня 2021 р.

З А В Д А Н Н Я
НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ МАГІСТРА

Зазуляку Тарасу Григоровичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1.Тема роботи: Оптимізація конструкції станини фрезерного верстата методом комп'ютерного моделювання.

Керівник роботи ст. викл. каф. ВІ, к.т.н. Гагалюк А.В.

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджена наказом по університету № 4/7-22 від «15» січня 2021 р.

2.Термін здачі студентом закінченої роботи «27» травня 2021 р.

3.Вихідні дані до роботи: *Технічна документація верстата*

4.Зміст розрахунково – пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) *Вступ, 1. Аналітичний розділ. 2. Дослідно-проектний розділ. 3. Науково-дослідна частина 4. Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях. Загальні висновки. Перелік посилань*

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) *Тема і мета дослідження – 1фА1, Інформаційний пошук – 1фА1,Зовнішній вигляд верстата – 1фА1, Аналіз компонувань – 1фА1, Наукова частина – 5фА1*

6. Консультанти роботи, із зазначенням розділів, що їх стосуються

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях	*Сеник А.А.*		
Нормоконтроль	*Ярема І.Т.*		

7. Дата видачі завдання *5 квітня 2021 р.*

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	*Назва етапів дипломної роботи*	*Термін виконання етапів роботи*	*Примітка*
1.	*Вступ, Аналітичний розділ*	*12.04.2021 р.*	
2.	*Дослідно-проектний розділ*	*19.04.2021 р.*	
3.	*Науково-дослідна частина*	*26.04.2021 р.*	
4.	*Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях*	*3.05.2021 р.*	
5.	*Загальні висновки*	*10.05.2021 р.*	
6.	*Перелік посилань*	*17.05.2021 р.*	
7.	*Додатки, креслення та плакати*	*24.05.2021 р.*	

Студент _____ *Зазуляк Т.Г.*
(підпис) (прізвище, ім'я, по батькові)

Керівник роботи _____ *ст. викл. каф. ВІ, к.т.н. Гагалюк А.В.*
(підпис) (вчений ступінь, посада, прізвище, ім'я, по батькові)

ЗМІСТ

Вступ 7
1. Аналітичний розділ 8
1.1. Огляд та аналіз проблематики дипломної роботи 8
1.2. Інформаційно-патентний пошук 9
1.3. Висновки по розділу, постановка мети та задач дослідження 26
2. Дослідно-проектний розділ 28
2.1. Вибір рухів по забезпеченню виробничого циклу на верстаті. 28
2.2. Обґрунтування структурно-кінематичної схеми верстата. 30
2.3. Обґрунтування модулів верстата (МК, ТМ) 31
2.4. Аналіз типів базових компонувань 34
2.4.1. Вибір верстатів-аналогів 34
2.4.2. Вибір оптимальної схеми компонування 34
2.5. Опис та обґрунтування конструкції станини на основі аналогу 37
2.6. Принцип роботи та технологічні розрахунки 41
2.6.1. Силові та міцнісні розрахунки станини 41
2.6.2. Розрахунок безступеневого приводу 47
2.7. Висновки по розділу 51
3. Науково-дослідний розділ 52
3.1. Методика та план проведення наукових досліджень 52
3.2. Розробка моделі об‘єкта досліджень 52
3.4. Обговорення та аналіз отриманих результатів* (*оприлюднені результати досліджень подаються в додатках) 59
3.5. Висновки за результатами наукового дослідження 60
4. Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях 61
4.1. Охорона праці при роботі на металообробних верстатах. 61
4.1.1. Додаткові вимоги безпеки. 62
4.2. Безпека в надзвичайних ситуаціях 64
4.2.1. Техногенні небезпеки 64
4.2.2. Аварії з викидом радіоактивних речовин у навколишнє середовище 65
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ 67
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ 71
ДОДАТКИ 61

Реферат

Зазуляк Т.Г. «Оптимізація конструкції станини фрезерного верстата методом комп’ютерного моделювання». 133 – Галузеве машинобудування; Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя; м. Тернопіль, 2021 р.

Мета і завдання магістерської роботи - отримання нової конструкції корпусу (станини) фрезерного верстата з подальшим теоретичним дослідженням її жорсткості, а саме 3D-моделі фрезерного верстата для отримання максимальної величини відхилення і її порівняння з аналітичним розрахунками.

Завдання дослідження:

- виконати аналіз компонувань фрезерних верстатів;
- змоделювати колону (станину) фрезерного верстата;
- задати обмеження поверхонь, які повинні залишитися незмінними;
- провести аналіз методики розрахунку жорсткості фрезерних верстатів;
- провести теоретичне дослідження з використанням САПР Fusion 360, Autodesk Inventor 2021;
- порівняти результати відхилень колони фрезерного верстату отриманого МСЕ з аналітичними розрахунками;

Об’єкт дослідження – станина фрезерного верстату.

Предмет дослідження – оптимізація форми станини.

Методи дослідження. Проведення теоретичних досліджень ґрунтується на МСЕ, використання модуля генеративного проектування, морфологічного аналізу.

Загальні висновки:

1. Проведено інформаційний пошук стосовно використання і впровадження сучасних методів проектування таких як топологічна оптимізація та генеративне проектування. Доведено, що ці способи є ефективними і металоощадливими, проте на даний час – енерговитратними. Використання в аеронавтиці, транспорті та

архітектурі доводять їх перспективність впровадження в близькому майбутньому;

2. Проведений аналіз компонування фрезерного верстата і оптимізація його конструкції довела свою функціональність. Використовуючи модуль топологічної оптимізації в Inventor 2021 вдалося зменшити масу виробу до 1834 кг при достатній жорсткості станини.
3. Безконсольне компонування верстату підходить для оброблення важких деталей і вагою до 1500 кг, що особливо актуально в компонуванні верстатів з ЧПК.
4. Теоретичні розрахунки і комп'ютерне моделювання співпали з похибкою до 10%. Проведений аналіз напружено-деформованого стану показав максимальний прогин колони у верхній точці 0,0055 мм;
5. Моделювання колони фрезерного верстата показало, що ні перегородки, ні їх форма не суттєво впливають на жорсткість колони. Що підтверджено теоретичними та експериментальними дослідженнями.
6. Чавун досі залишається найпоширенішим матеріалом для виготовлення корпусних деталей, по при ефективне використання інших сучасних віброізолюючих матеріалів. Це можна пояснити вартістю і відпрацьованістю технології виготовлення.

Zazulyak T.G. "Milling machine body design optimization by computer modeling method". 133 - Industrial engineering; Ternopil Ivan Pul'uj National Technical University; Ternopil, 2021.

The purpose and objectives of the master's work - to obtain a new design of the body (frame) of the milling machine with subsequent theoretical study of its rigidity, namely 3D-models of the milling machine to obtain the maximum deviation and its comparison with analytical calculations.

Objectives of the study:

- perform analysis of the layout of milling machines;
- to model a column (bed) of the milling machine;
- set restrictions on surfaces that must remain unchanged;

- to analyze the method of calculating the stiffness of milling machines;
- conduct a theoretical study using CAD Fusion 360, Autodesk Inventor 2021;
- compare the results of deviations of the column of the milling machine obtained by ITU with analytical calculations;

The object of research is the frame of a milling machine. The subject of research is the optimization of the frame shape. Research methods. Theoretical research is based on ITU, the use of the module of generative design, morphological analysis.

General conclusions:

1. An information search on the use and implementation of modern design methods such as topological optimization and generative design. It is proved that these methods are efficient and metal-saving, but currently energy-intensive. Use in aeronautics, transport and architecture prove their prospects for implementation in the near future;
2. The analysis of the layout of the milling machine and the optimization of its design proved its functionality. Using the topological optimization module in Inventor 2021 it was possible to reduce the weight of the product to 1834 kg with sufficient rigidity of the frame.
3. The consoleless arrangement of the machine is suitable for processing of heavy details and weighing up to 1500 kg that is especially actual in arrangement of machines with ChPK.
4. Theoretical calculations and computer simulations coincided with an error of up to 10%. The analysis of the stress-strain state showed the maximum deflection of the column at the upper point of 0.0055 mm;
5. Modeling of the column of the milling machine showed that neither the partitions nor their shape do not significantly affect the rigidity of the column. Which is confirmed by theoretical and experimental studies.
6. Cast iron still remains the most common material for the manufacture of body parts, with the effective use of other modern vibration-insulating materials. This can be explained by the cost and performance of manufacturing technology.

ВСТУП

Актуальність теми. Фрезерні верстати складають приблизно 25-30% серед усього верстатного обладнання. Зазвичай вони призначені для обробки плоских і фасонних поверхонь торцем або боковою поверхнею фрези, де їй надається головний рух.

Управління фрезерним верстатом відбувається, як правило вручну, проте сучасні фрезерні верстати керуються автоматично за допомогою системи числового програмного керування (ЧПК). Додатково фрезерні верстати можуть бути оснащені механізмами автоматичної зміни інструментів.

Спільною рисою, характерною для всіх фрезерних верстатів є наявність колони до якої кріпиться шпиндельна бабка та рухомий стіл із можливістю переміщення по осі Z для забезпечення встановлювального руху. Підйом стола виконується підйомним гвинтом, який окрім того може виконувати переміщення по осях X та Y. Колону, яка одночасно є і корпусом виготовлюють з чавуну задля забезпечення високої жорсткості й системи верстат – приспосіблення – інструмент – деталь (ВПІД) загалом. Від них залежить точність геометричних розмірів деталі.

Головний параметр точності верстата є його жорсткість, яку визначають теоретичним та перевіряють дослідним шляхом. Теоретичне визначення жорсткості є трудомістким завданням, яке полегшується з використанням 3D-моделювання та використанням методів скінченних елементів (МСЕ). Майбутня конструкція повинна бути стійкою, забезпечувати необхідні параметри і при цьому бути економічно обґрунтованою.

Починаючи з 2005 року у цивільно-промисловому будівництві, авіа та космічній галузі набувають тенденції до зменшенні маси конструкції при збереженні її жорстокості та стійкості. Це стало можливим завдяки використанню генеративного проектування та 3D-друку. Проте у верстато- та важкому машинобудуванні дані підходи ще не отримали поширення.

1. АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ

1.1. Огляд та аналіз проблематики дипломної роботи

Темою магістерської роботи є «Оптимізація конструкції станини фрезерного верстата методом комп'ютерного моделювання».

Фрезерування вважається одним із високопродуктивних методів оброблення деталей. Призначення цих машин обумовлене оброблення великих за площею зовнішніх та внутрішніх поверхонь або поверхонь зі зняттям великих припусків. В процесі оброблення заготовок виникають різноманітні сили, які зумовлені також врізанням фрези (багатолезового інструменту) у заготовку, що супроводжується вібраціями, звуками різної частоти тощо. Тому станини верстатів виготовляють із чавуну, а іноді наповнюють різноманітними бетонними сумішами для гасіння вібрацій. Разом з тим, усе верстатне й загалом виробниче обладнання є достатньо металомістким. І проблема полягає в тому, що зменшення маси до критичного рівня може призвести до деформації конструкції, нестійкості верстата, його перекидання через виникаючі сили різання, що безперечно призведе до неточності оброблення й небезпеки тощо. Метою досліджень є визначення оптимальної межі і величини зменшення маси без погіршення експлуатаційних показників верстата.

Теоретичні та практичні дослідження мають за мету отримати нову конструкцію станини фрезерного верстату з використанням алгоритму генеративного моделювання (Generative Design) [16] та генератора форм (Shape Generator) який реалізовано у САПР Fusion 360, Autodesk Inventor 2021. Аналітичним способом виявити непрацездатні ділянки конструкції колони або інших корпусних деталей не є можливим. Під непрацездатними ділянками маються на увазі ділянки корпусних деталей, які не несуть і не сприймають навантаження. Робота описаних алгоритмів базується на використанні методу скінчених елементів (МСЕ).

У якості дослідного зразку буде використовуватись 3D-модель фрезерного

обробного центра з ЧПК Haas VF-2. Згідно встановленої класифікації цей верстат відноситься до універсальних безконсольно – фрезерних верстатів.

Мету і завдання роботи описано у вступі. Варто звернути увагу на те, що зменшення маси станини при збереженні її жорсткості, дозволить отримати значний економічний ефект за рахунок економії коштів.

Порядок проведення досліджень магістерської роботи наступний:

- виконати інформаційно-патентний пошук з даної проблематики;
- проаналізувати компонування фрезерних верстатів;
- на основі компонування побудувати 3D - модель станини і провести її статистичний аналіз;
- на основі отриманих результатів оптимізувати конструкцію станини
- сформувати висновки і рекомендації.

1.2. Інформаційно-патентний пошук

Конструкції фрезерних верстатів різноманітні. Їх, в загальному випадку фрезерні верстати можна поділити на 2 головних групи:

- Загального призначення або універсальні фрезерні верстати до яких відносяться вертикально-, горизонтально- та поздовжньо-фрезерні;
- спеціалізовані та спеціальні фрезерні верстати, а саме: шліцьо-, шпонко-, карусельно- та копіювально – фрезерні.

Фрезерування характеризується безперервним головним обертовим рухом інструмента й поступального руху подачі заготовки. У певних компонуваннях заготовка виконує обертовий рух або рух подачі. Приводи головного руху і подач, як правило виконують окремими. Додаткові рухи, пов’язані з підведенням та відведенням заготовки до інструменту механізовані і виконуються від привода прискорених переміщень.

Основні елементи верстатів уніфіковані, а головним параметром, який характеризує верстати загального призначення є розмір робочої поверхні стола.

За конструктивними особливостями фрезерні верстати можна поділити на:

- консольні (стіл розташований на підйомному кронштейні-консолі);
- безконсольні (стіл переміщується на нерухомій станині в поздовжньому в поперечному напрямках);
- верстати неперервної дії (карусельні й барабанні).

Консольно – фрезерні верстати є найбільш поширеними (рис.1, а – г). Універсальний консольно-фрезерний верстат (рис. 1, а) має горизонтальний шпиндель 2 і так званий, висувний «хобот» 1, на який кріплять кронштейн 3, який підтримує оправлення з фрезою, консоль 4 переміщається вертикально по напрямних стійки 5. На консолі розташовано салазки 6 і поворотний стіл 7. В цьому верстаті шпиндель не змінює свого місця. Стіл може переміщуватися перпендикулярно до осі шпинделя в двох напрямках - горизонтальному і вертикальному. На відміну від універсального консольного фрезерного верстата робочий стіл не повертається навколо своєї вертикальної осі.

Широко-універсальний консольно-фрезерний верстат (рис. 1б, 1в) окрім горизонтального шпинделя має ще й шпиндельну головку 1, яка може обертатися на «хоботі» у 2-х взаємно перпендикулярних напрямках, через що шпиндель з фрезою можна встановити під будь-яким кутом до площини столу і відповідно до заготовки. На головці 1 монтують накладну головку 2, призначення якої – свердління й розсвердлювання, зенкерування, розточування та фрезерування.

Як зрозуміло із назви вертикальний консольно-фрезерний верстат (рис. 1г) має вертикальний шпиндель 3, який розміщений в поворотній шпиндельній головці 2, встановленій на колоні 1.

Призначення ж *безконсольних вертикально-фрезерних* верстатів (рис.1, д) -- це оброблення великогабаритних заготовок. Верстат має салазки 2 й стіл 3, які переміщуються по напрямних станини 1. Шпиндельна головка (ШГ) 5 переміщується вертикально по напрямних колони 6. Для установлювального руху фрези шпиндель 4 виконує вертикальні переміщення. Стіл може переміщуватися лише в поздовжньому і поперечному напрямках.

Верстат зображений на рис.1, е теж відноситься до безконсольно – горизонтально – фрезерного типу. Його призначення аналогічне до

попереднього. Шпиндельна головка 5 переміщується вертикально по напрямних колони 6 і виконує ще й осьові переміщення для установчого руху фрези.

Поздовжньо – фрезерний верстат (рис.1, ж) – це верстат, який призначений теж для оброблення заготовок великогабаритних деталей. Оброблення виконується торцевою фрезою, але є можливо використовувати циліндричні, кінцеві, дискові та фасонні фрези. На станині 1 встановлено дві вертикальні колони 6, які з'єднані поперечкою 7. На напрямних колон змонтовано фрезерні головки 3 з горизонтальними шпинделями і поперечина 4, на якій закріплено фрезерні головки 5 з вертикальними шпинделями. Стіл 2 переміщується по напрямних колон 4.

Карусельно-фрезерні верстати (рис.1, з), призначені для обробки поверхонь торцевими фрезами, мають один або декілька шпинделів 3, які забезпечують чорнове та чистове оброблення. По напрямних колони 1 переміщується шпиндельна головка 2, а стіл 4, неперервно обертаючись, забезпечує заготовкам обертовий рух подачі. Стіл завдяки салазкам 5 забезпечує установчий рух.

На відміну від попередніх верстатів барабанно-фрезерні верстати (рис.1, и) використовуються в крупносерійному и масовому виробництві. Закріплення заготовки виконують на обертовому барабані 2, який виконує рух подачі. Фрезерні головки 3 (для чорнової обробки) і 1 (для чистової обробки) переміщуються по напрямних колони 4. [2]

Кожен тип описаних, вище верстатів має свої переваги та недоліки. Найпоширенішими верстатами, як було вже описано є консольно-фрезерні верстати. Наявність консолі створює зручність для обслуговування, проте знижує жорсткість у зоні контактування зі станиною, тому в конструкціях сучасних верстатів значно збільшена довжина напрямних консолі.

Найбільш доцільна конструкція фрезерного верстату, з точки зору забезпечення жорсткості конструкції і відповідно точності є конструкція зображена на рис.1, д. Сучасні фрезерні верстати з ЧПУ з деякими незначними відмінностями використовують саме таке компонування.

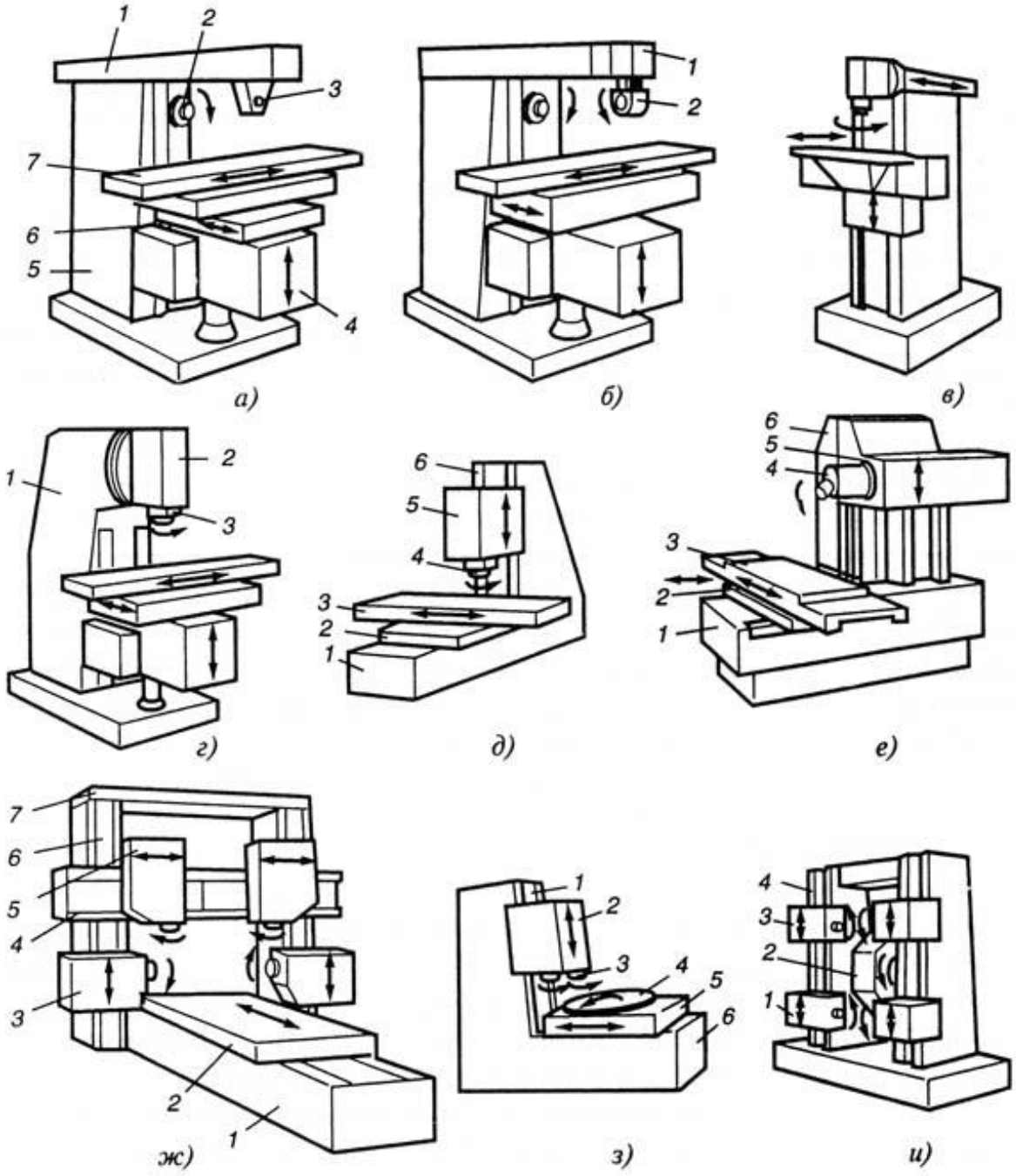


Рис. 1.1 Компонування фрезерних верстатів

а – універсальний консольний горизонтально- фрезерний; б – широкоуніверсальний консольний горизонтально-фрезерний; в – безконсольно-фрезерний; г – консольний вертикально – фрезерний; д – вертикально-фрезерний безконсольний; е – горизонтально-фрезерний безконсольний; ж – поздовжньо-фрезерний; з – карусельно- фрезерний; и – барабанно- фрезерний.

Сучасні фрезерні верстати із ЧПУ об'єднують в собі експлуатаційні якості багатьох верстатів звичайного виконання, при зменшених розмірах і забезпеченні високої жорсткості. Остання визначає точність оброблення при максимальних режими різання.

Жорсткість – це властивість конструкції або конструктивного елемента протидіяти зусиллю, яке викликає їх деформацію на певну величину. Жорсткість прийнято вимірювати в $\frac{\text{Н}}{\text{мм}}$. Коли вимірюють жорсткість (1) то також мова йде про податливість (2) – параметр обернений до жорсткості [2].

$$\text{j} = \frac{\text{F}}{\text{y}} \left(\frac{\text{Н}}{\text{мм}}\right) \tag{1.1}$$

$$\text{w} = \frac{1}{\text{j}} = \frac{\text{y}}{\text{F}} \left(\frac{\text{мм}}{\text{Н}}\right) \tag{1.2}$$

де F – сила, Н; y – прогин, мм

Оскільки, жорсткість верстата це величина векторна, то її чисельне значення у кожній точці прикладання сили буде різне. Як вже згадувалося, жорсткість формує основні вихідні показники верстата – вібростійкість, стійкість інструменту, точність, продуктивність, якість обробленої поверхні, та довговічність конструкцій. Показник якості верстата це його жорсткість. Для металорізального обладнання вона більш значна, ніж міцність [2].

Чіткої норми жорсткості для конструкції нема. Навіть стандарти (ГОСТ, ДСТУ) різні для кожного типу верстата. Здебільшого точність верстата перевіряється набором стандартних перевірок, одна з яких – визначення відхилення прямолінійності переміщення під навантаженням на певній довжині. До прикладу, для верстатів нормальної точності (Н) відхилення прямолінійності повинне бути не більше, ніж 10 мкм на 200 мм, а високої точності (В) не більше, ніж 4 мкм на тій самій довжині. Загалом допустимі значення відхилення показників точності верстатів між класами складають геометричну прогресію із знаменником $\varphi = 1{,}6$ [20].

Точність металорізальних верстатів (МРВ) визначається державними стандартами, а саме:

- ДСТУ 3600-97 (ГОСТ 30527-97) «Верстати металорізальні. Методи перевірки точності оброблення зразка-виробу» [3];
- ДСТУ 3630-97 (ГОСТ 22267-76) – «Верстати металорізальні. Методи перевірки точності та постійності відпрацювання колової траєкторії» [4];
- ДСТУ ГОСТ 27843:2007 (ИСО 230-2:1997) «Випробування станків. Визначення точності та повторюваності позиціювання осей з числовим програмним керуванням» [5].

Забезпечення очікуваної точності деталі при обробленні є головним показником верстата, який залежить від усієї жорсткості МРВ. Слід зазначити, що норма жорсткості визначається для повної жорсткості верстата, яка завжди менша жорсткості найменш жорсткого елемента верстата. Для прикладу визначення повної жорсткості верстата складається із суми жорсткостей станини, шпинделя, регулюючих елементів, напрямних для верстатів з напрямними ковзання, або жорсткості кареток (тіл кочення) для верстатів з напрямними кочення.

Нехай жорсткість станини нашого верстата $j_В = 20000\ \frac{Н}{мм}$, жорсткість шпинделя $j_Ш = 20000\ \frac{Н}{мм}$, жорсткість планок $j_Н = 10000\ \frac{Н}{мм}$. Спочатку визначаємо обернену величину до жорсткості – податливість, а потім результат переведемо назад у жорсткість.

Тобто:

$$W = w_В + w_Ш + w_Н = \frac{1}{20000} + \frac{1}{20000} + \frac{1}{10000} = \\ = 0{,}00005 + 0{,}00005 + 0{,}0001 = 0{,}0002\,\frac{мм}{Н}; \qquad (1.3)$$

Отже, сумарну податливість верстата $W = 0{,}0002\,\frac{мм}{Н}$.

Переведемо її у жорсткість:

$$J = \frac{1}{0{,}0002} = 5000 \frac{Н}{мм} \quad (1.4)$$

Тому, жорсткість усіх складових верстата повинна бути значно вищою за необхідну повну жорсткість.

Способи й засоби вимірювання жорсткості верстату, по суті, зводяться до вимірювання прогину від прикладеної сили, максимально наближеної до умов експлуатації. Силове навантаження реєструють динамометрами, а зміщення - індикаторами, мініметрами або за допомогою електричних перетворювачів.

При вимірюванні жорсткості використовують 3 методи, а саме:

1.динамічний;

2.статичний;

3.виробничий.

Динамічний метод використовують для частотного аналізу динамічної системи верстата. Модуль амплітудно-фазо-частотної характеристики (АФЧХ) відображає собою динамічну податливість верстата при відповідній частоті збурення. Верстат при цьому навантажується періодично змінною силою на різних частотах.

Виробничий метод вимірювання являє собою обробку ділянок заготовки з різними припусками за один прохід (точіння ступінчастого вала, фрезерування ступінчастої заготовки тощо). Величина зміни припуску викликає відповідну зміну сил різання та розміру деталі, по зміні сил різання, що визначається розрахунком, та розмірів виступів, що лишились на обробленій деталі, визначають жорсткість верстата.

Статичний метод дослідження жорсткості полягає у реєстрації відповідних зміщень від послідовного навантаження через рівні інтервали. Потім через такі ж інтервали верстат розвантажують і у координатах сила-зміщення будується графік. Він відображає характеристику силових зміщень. При необхідності верстат навантажують у двох протилежних напрямках (криві 1,2). Рекомендують жорсткість визначати як середнє значення по розвантажувальним

гілкам Р1 та Р2, або після вторинного навантаження (по кривим Р1′, Р2′).

У якості несучих силових елементів верстатів, які прийнято називати станинами, стійками (вертикальні станини) і основами, використовуються балки, коробчасті форми, рамні конструкції, іноді ферми.

Розрізняють три види жорсткості:

1.на стиск або розтяг;

2.на згин;

3.на кручення (зсув).

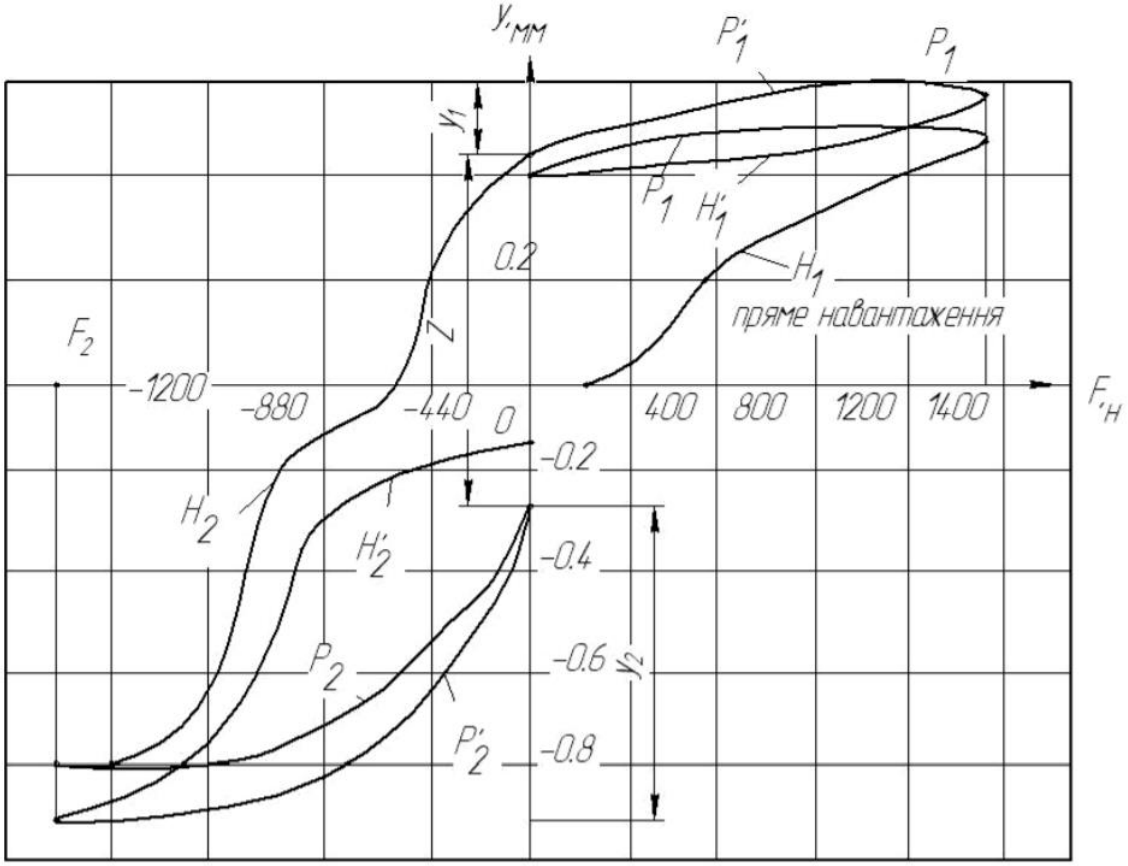


Рис. 1.2 Графік силових зміщень

Жорсткість конструкції визначається модулем пружності деформованого матеріалу, який називають модулем Юнга першого роду, формою й розміром поперечного січення деталі й видом деформації. До прикладу, при деформації на згин, форма П – подібного січення може не поступатися прямокутному суцільному брусу.

Жорсткість на згин, при збільшенні довжини деталі, зменшується обернено

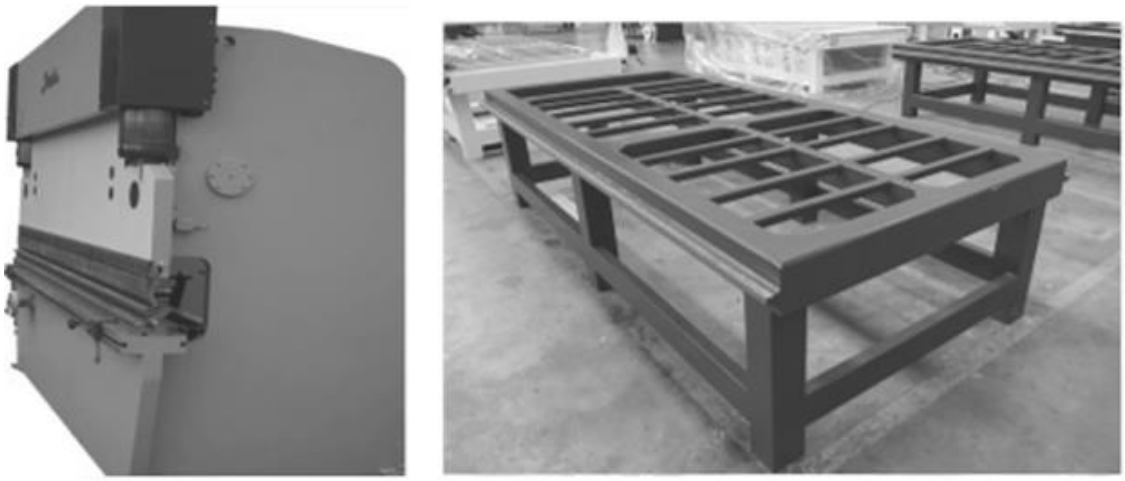
кубічно від довжини. Це означає, що при збільшенні довжини станини верстата у 2 рази, при тих самих розмірах перерізу, її жорсткість на згин зменшиться у 8 разів. Проте, якщо ми збільшимо розміри січення станини верстата у 2 рази, то її жорсткість виросте в 16 разів. Виходячи з цього, змінивши розмір січення, завжди можна компенсувати втрату жорсткості через збільшення довжини. А й, справді, основні положення з теорії міцності та опору матеріалів доводять ці твердження. Але також нам відомо, що жорсткість і міцність конструкції можна забезпечити не лише збільшуючи поперечний переріз чи використовувати міцніші матеріали, а й застосовуючи решітчасті структури або каркасні моделі.

Як зрозуміло з вищеописаного, найбільше вимого ставиться до станини фрезерного верстату, оскільки на неї створюється найбільше навантаження створене різноманітним навісним обладнанням (інструментальний магазин, фрезерна головка тощо). Окрім цього колона піддається тепловим деформаціям. Інженер-конструктор одночасно повинен вирішувати комплексну задачу – знайти баланс між використанням матеріалу, функціональним призначенням, економічною ефективністю. Таким чином оптимізувати конструкцію. Зазвичай станини відливають з чавунів (рис.1.3) або зварюють зі сталі (рис.1.4) заповнюючи пустоти різноманітними бетонами або полімербетонами.

Рис.1.3 Чавунна лита станина фрезерного верстату

Для лиття використовують чавуни СЧ15 і СЧ20, які мають добрі литні

властивості. А чавуни марок СЧ30 і СЧ35 використовують для станин не довших, ніж 3 м. Для зварних станин використовують сталі (Ст3, Ст4) товщиною від 8 мм і не більше 12 мм.



а *б*

Рис.1.4 Зварні станини

а) токарного верстата, б) рама фрезерного верстата

Попри те, що стальні конструкції у порівнянні з чавунними при однакових несучих навантаженнях легші і витримують високі ударні навантаження й модуль пружності сталі майже у 2 – 2,4 рази вищий, але сталь має вагомий мінус. Вона погано гасить вібрації. Це зображено на рис.1.5. [6], [7].

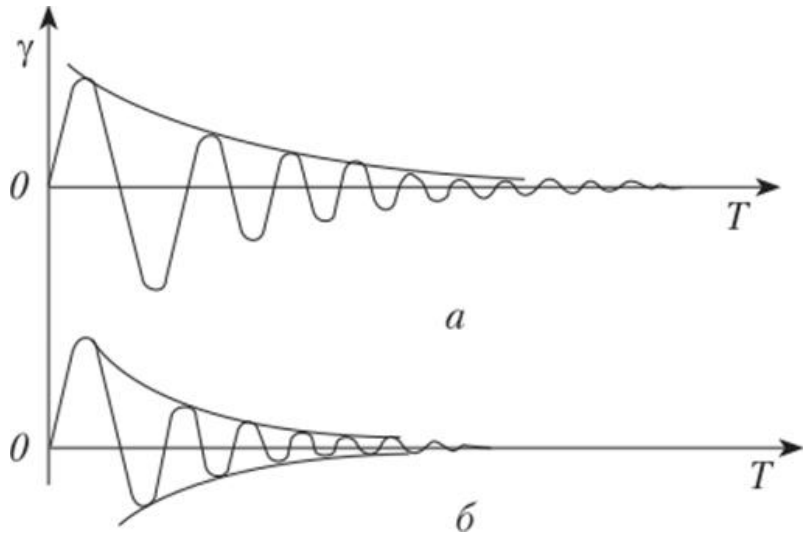
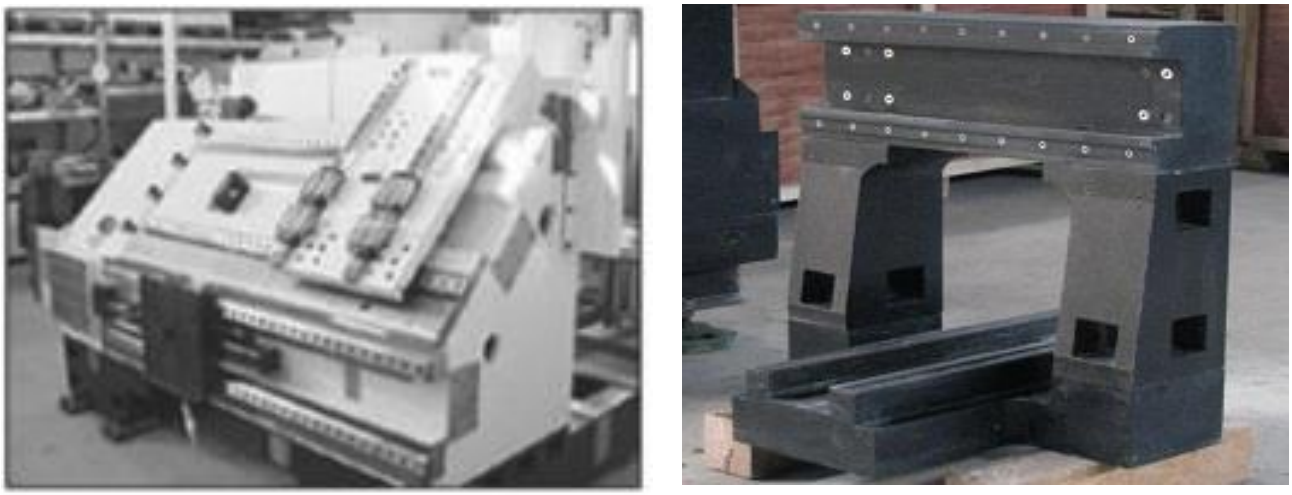


Рис.1.5 Інтенсивність гасіння вібрацій а) Сталь; б) чавун

Бетон є добрим віброгасником і не чутливий до температурних розширень,

але його крихкість, гігроскопічність та схильність до тріщин не дозволяє використовувати у повній мірі [8]. За рахунок пористості бетон легший від чавуну майже на 60%. Тому для станин важких МРВ використовують симбіоз бетону і заліза, що дозволяє зекономити до 60% матеріалу [7]. Цей спосіб використали у Японії, у середині 80 -х років. Фірми Fujita і Hamai виготовили верстат, в якому бетонна станина і колона були армовані сталевим дротом. Це дозволило понизити вібрації наполовину. Маса верстата була значно більшою, проте економі коштів досягла 20%. Отримані переваги переважали недоліки [8].

Постійний пошук нових конструкцій та експерименти дозволили виготовляти станини з полімербетонів (рис.1.6) та композитів (синтегран, гранітан, епоксибетон, акрилбетон) (рис.1.7) [9]. З останнього виготовили складні станини для великих верстатів фірми Landis flixline (США), Fritz Studer (Швейцарія), Burkhard und Weber (Німеччина) [6].



а) б)

Рис. 1.6 Полімербетонні станини

а) станина токарного верстата з нахиленою станиною, б) станина портального фрезера

Синтегран – це композит з покращеними показниками, який містить не більше 10% від загальної маси епоксидну зв’язку. З нього виготовляють основні деталі верстатів (рис.1.7).

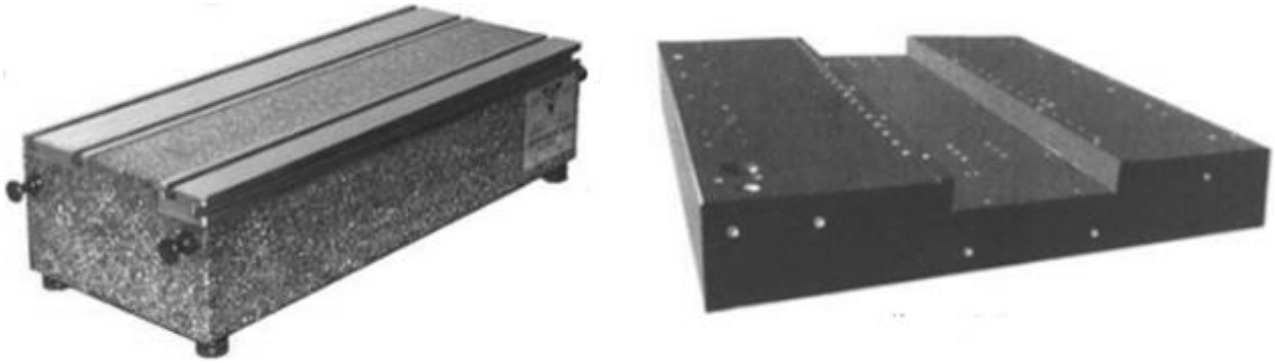


Рис. 1.7 Станини із синтеграну

Покращення жорсткості МРВ будь-яким можливим і раціональним способом завжди актуальна проблема. В Україні дослідження жорсткості токарних верстатів виконували науковці Київського національного технічного університету « Київський політехнічний інститут» Литвин О.В., Струтинський В.Б, Кравець О.М. Розроблена ними методика щодо дослідження шпиндельної групи дозволяють визначити нелінійні параметри жорсткості.

При аналізі інформаційних джерел стосовно проблем, які виникають в процесі оброблення металів, розглянуто методи запобігання негативним впливам, зокрема вимушеним та власним коливаннями при різанні.

Дослідженню фізичних явищ процесів різання, покращенню стійкості несучих систем металорізальних верстатів та різального інструменту, в різний час, написані праці Врагова Ю.Д., Ковальова В.Д., Камінської В.В., Кудінова А.В., Кузнєцова Ю.Н., Лєвіна З.М., Лескіна А.А., Луціва І.В., Пуша В.Е., Решетова Д.Н., Струтинського В.Б., Черпакова Б.І., Чулікова Е.І., Шаріна Ю.С., Шрайбмана С. М., Федотова А. І., Y. Altintas (Й. Алтінтаса), R. N. Arnold (Р.Арнольда), S.T. Chiriacescu (С. Хіріаческу), S. Doi (С.

Доя), R.S. Hahn (Р. Хана), S. Kato (С. Като), H. E. Merritt (Х. Меррітта), S. A. Tobias (С. Тобіаса), J. Tlusty (Дж. Тлустого), W. Fishwick (У. Фішвіка) та багато інших.

Після опрацювання літературних та інших наукових джерел визначено, що на точність деталі в процесі обробки впливають похибка інструменту, відсутність прямолінійності переміщення стола, неправильна схема базування,

деформація несучої системи МРВ через недостатню жорсткість. Більшість існуючих похибок викликані пружними деформаціями, які і є наслідком недостатньої жорсткості конструкції верстата.

Як бачимо, вищеописані конструкції корпусних деталей верстатів були отримані шляхом спроб і помилок. Адже системи автоматизованого проектування на початку 80-х років минулого сторіччя лише зароджувалися і проведення трудомістких розрахунків забирало чимало часу у тогочасних дослідників. Тому у конструкціях переважають прямокутні та строгі форми. Дослідження проведені на початку 2000 – х років в галузі генеративного проектування Airbus Group і Autodesk дають новий поштовх в проектуванні речей. Насправді змінено підходи до проектування. Інженер не може спрогнозувати нову конструкцію деталі. Він задає лише обмеження, а форму деталі формує алгоритм в залежності від мети нашого проектування – зменшення маси при збереженні міцності чи максимальній жорсткості. Дана технологія отримала назву генеративного проектування (Generative Design) або біодизайну через те, що в роботу комп'ютерного алгоритму закладено поведінку найбільшого одноклітинного організму – слизьовика (Mycetozoa). Результатом наполегливих досліджень стало втілення конструкції перегородки (рис.1.8) авіалайнера Airbus A320. Проект унікальний тим, що його конструкцію отримано за допомогою алгоритму, а не інженерних розрахунків.

Після аналізу 10 тис. варіацій форм було відібрано найоптимальнішу, яка стала на 55% легшою від аналога. Конструкцію виготовили по частинах з використанням селективного лазерного плавлення (SLM, англ. – *Selective Laser Melting*) зі сплаву Scalmalloy – (скандієвий сплав – алюміній – магній) [10], [11].

В Airbus Group отримали конструкцію кронштейна (рис.1.9), форма якого розроблена на основі листя амазонської лілії (*Victoria amazonica*). Це дозволило зменшити масу на 30%.

Autodesk, як світовий виробник програмного забезпечення (ПЗ) успішно реалізував цю технологію в САПР Autodesk Inventor і Fusion 360. Їх назвали генератор форм (Shape Generator) і генеративне проектування (Generative

Design). Вони використовують, так би мовити «просунутий» метод скінченних елементів (МСЕ).

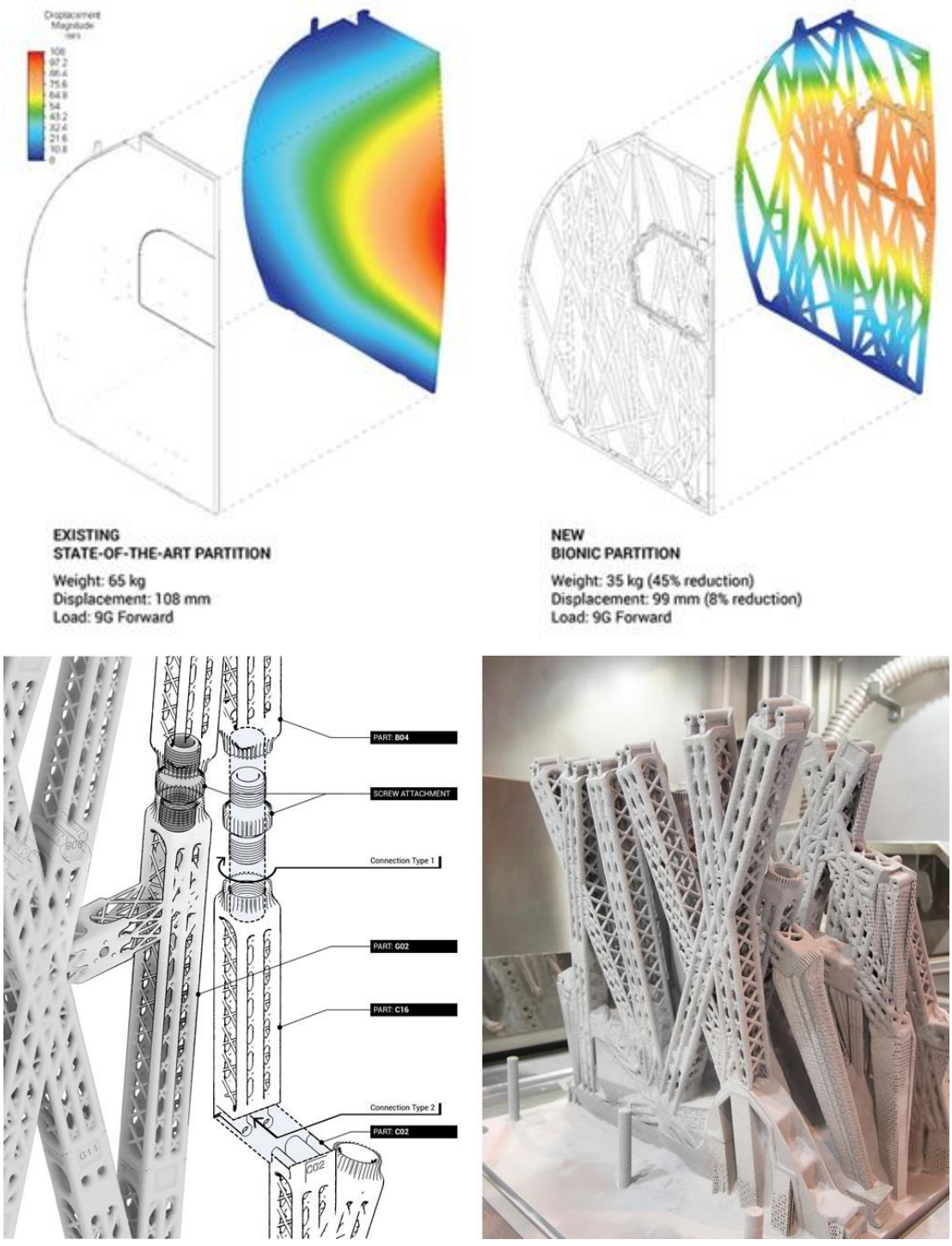


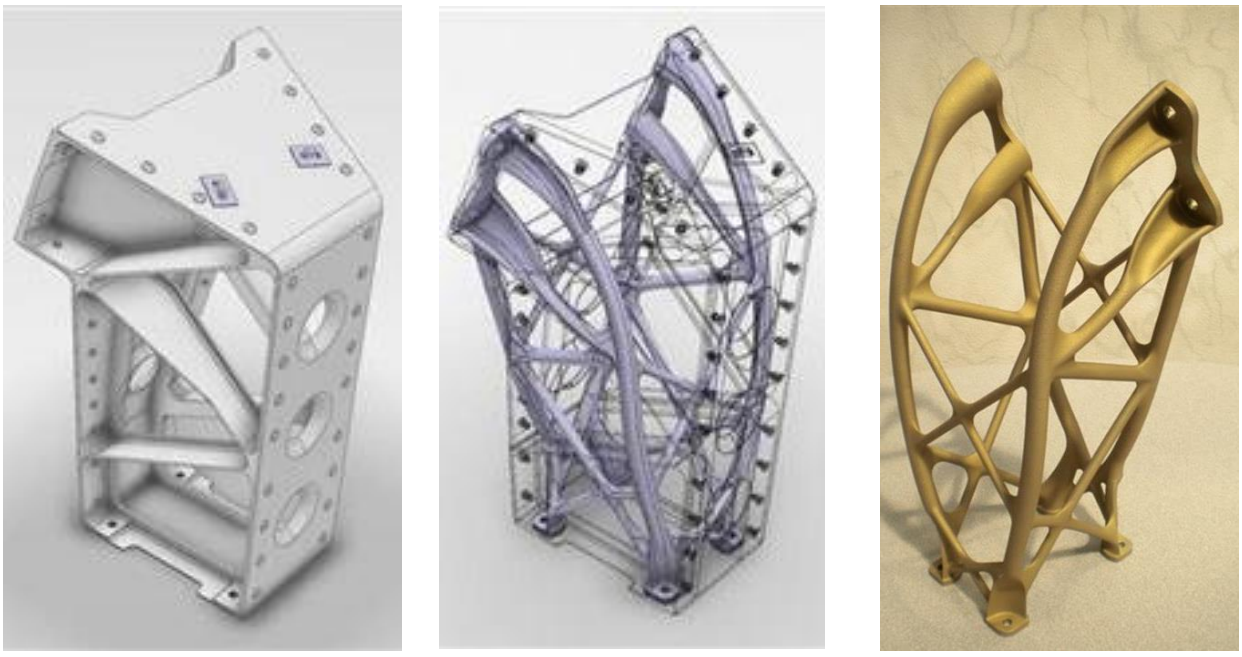
Рис.1.8 Перегородка Airbus A320

Різниця між ними полягає в тому, що за допомогою Shape Generator можна оптимізувати існуючу конструкцію шляхом видалення ділянок, що не несуть навантаження. Generative Design «сам проектує», а інженер має задати

обмеження. Деталі створені з використанням цього способу володіють міцністю, легкістю, обтічністю.

Рис.1.9. Кронштейн на основі лілії

На рис.1.10. зображено еволюцію рами супутника Eurostar E3000, який на початку виготовлявся з листового металу. Реалізація цього проекту в компанії Innovate UK (Великобританія) зайняла біля 2 років. На рис.1.11 показано кронштейн кріплення турбіни того ж Airbus A320, який згенеровано з використанням алгоритму для перегородки (рис.1.8).



а) б) в)

Рис. 1.10. Рама супутника Eurostar E3000

а) – початкова конструкція; б) – оптимізована форма, в –фото деталі виготовленої методом SLM

Рис. 1.11 Кронштейн кріплення турбіни літака

Дана деталь могла бути створена лише спіканням в один суцільний компонент. За рахунок цього вагу зменшили на 35% і збільшили жорсткість на 40% [13].

Німецька BMW відома також й випуском мотоциків. Там «спекли» раму мотоцикла (рис.1.12). Прототип важить 162 кг у порівнянні з серійним мотоциклом, який важить 207 кг.

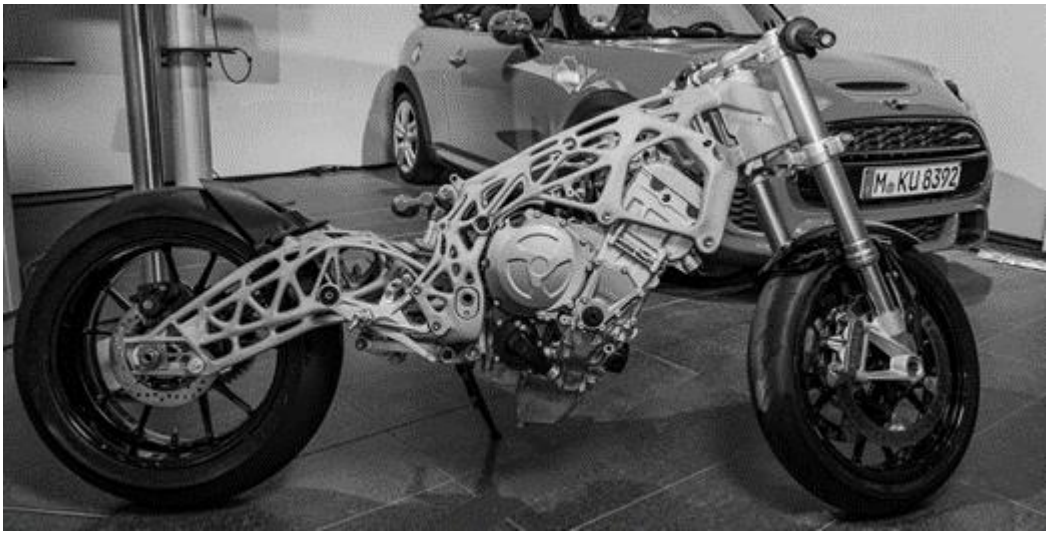


Рис.1.12 Розробка BMW

А дочірня компанія Aibus Group – APWorks теж розробила раму мотоцикла (рис.1.13). в основі якої покладено «екзоскелет». Вага менша від аналогу на 30%. Масу зменшили за рахунок використання корозієстійкого алюмінію, який по

міцності прирівнюється до титану

Рис.1.13 Рама мотоцикла компанії APWorks

Автоконцерн General Motors для своїх автомобілів оптимізував кріплення замка паска безпеки. Нова конструкція була виконана одним шматком, подібно до рами супутника, замість 8 елементів. Оптимізація дозволила збільшити міцність на 20% і зменшити масу на 40%.

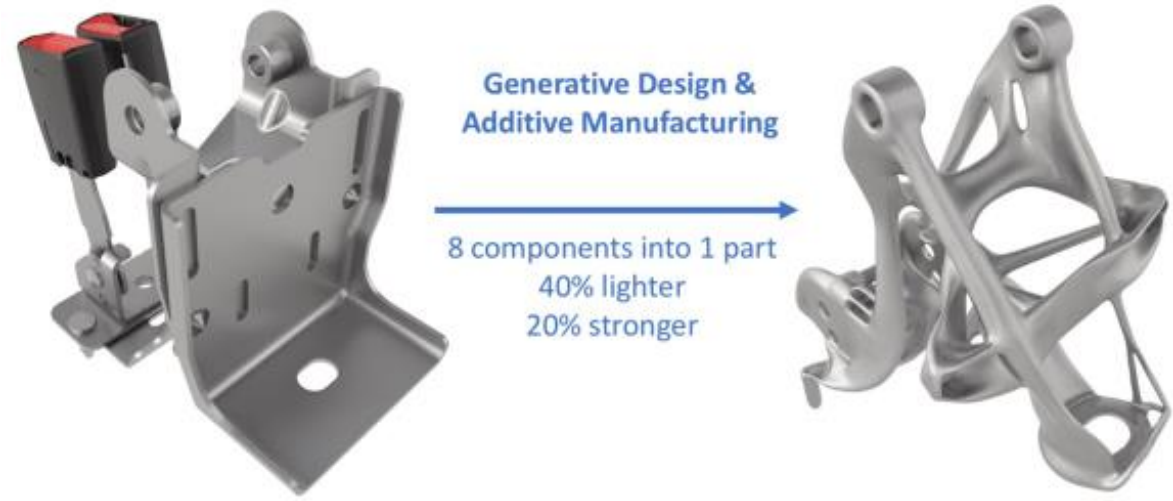


Рис.1.14. Кріплення замка паса безпеки до і після генеративного проектування

Ці нововведення зменшили масу кожного автомобіля в середньому на 160 кг [14]. Це дозволяє в процесі експлуатації споживати менше палива, як

результат менші викиди шкідливих речовин в навколишнє середовище, а це у свою чергу і збільшує перевезення корисної маси.

На рис.1.15 зображено топологічну оптимізацію стійки станції автоматичного зварювання.

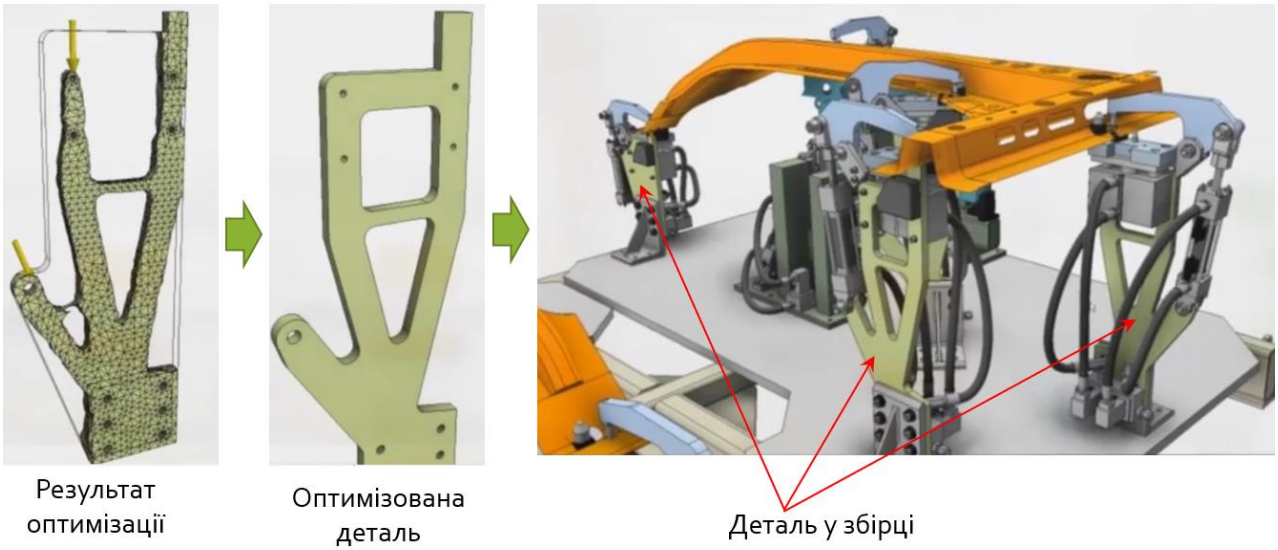


Рис.1.15 Топологічна оптимізація стійки зварної станції

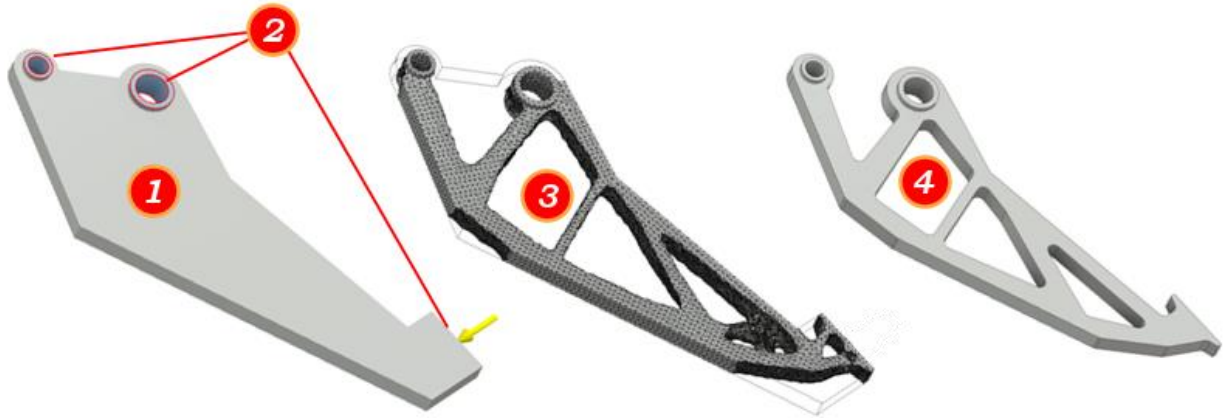


Рис.1.16 Топологічна оптимізація пластини

Генератор форм оптимізує масу деталі (рис.1.15-1.16) з умови забезпечення максимальної жорсткості конструкції [15].

1.3. Висновки по розділу, постановка мети та задач дослідження

Про впровадження і результати генеративного дизайну можна описувати багато, але на основі вищеописаного можна зробити наступні висновки:

1. для покращення експлуатаційних та точністних характеристик верстату в їх конструкціях використовуються різні матеріали (граніти, полімери, бетони). Це зумовлено, іноді, здешевленням виробництва, але більше задля забезпеченням високої жорсткості та вібростійкості конструкції, що для експлуатаційних характеристик верстата є позитивним. Використання полімерних матеріалів у конструюванні корпусних деталей доводить, що не лише чавун здатний ефективно гасити коливання.
2. шляхи досягнення високих експлуатаційних показників не завжди економічно обгрунтовані та доцільні, як на приклад згадуваний верстат із бетону і стального армування. Проте висока жорсткість конструкції переважила неймовірну вагу, що ускладнювала транспортування. Проте найефективнішим способом забезпечення жорсткості конструкції залишаються оболонкові форми станин з перегородками (ребрами жорсткості) заповнені сипкими віброгасними матеріалами або залиті бетоном;
3. технологія топологічної оптимізації суттєво полегшує конструювання багатьох речей, в тому числі верстатів, що дозволяє полегшувати конструкцію в тих місцях, де відсутнє навантаження. Окрім того, як видно з вищеописаного, використання деталей отриманих з використанням генеративного проектування доводять свою ефективність, жорсткість, металоємність. Деталі виготовлені за допомогою спікання успішно впроваджується і в авіації, і транспорті, і в космосі. У місцях, де перепади температур сягають 150°C і більше. Це доводить лише, те що ми могли б забезпечити задану жорсткість конструкції з меншим використанням матеріалу, тобто з кращим його розподіленням і підсилення у місцях високих навантажень.

2. ДОСЛІДНО-ПРОЕКТНИЙ РОЗДІЛ

2.1. Вибір рухів по забезпеченню виробничого циклу на верстаті.

Для деталей, які обробляються на фрезерних верстатах повинні бути виконані певні комплекси рухів. Таке оброблення також передбачає закріплення деталі нерухомо в спеціальному пристосуванні або лещатах, а всі формоутворюючі рухи надаються інструментам.

Для формування отворів в деталі необхідно, щоб інструмент здійснював обертовий рух та рух подачі.

Тому проаналізуємо усі формоутворюючі рухи для типових поверхонь. На операції горизонтально-фрезерній здійснюється фрезерування поверхонь. (див. рис.2.1).

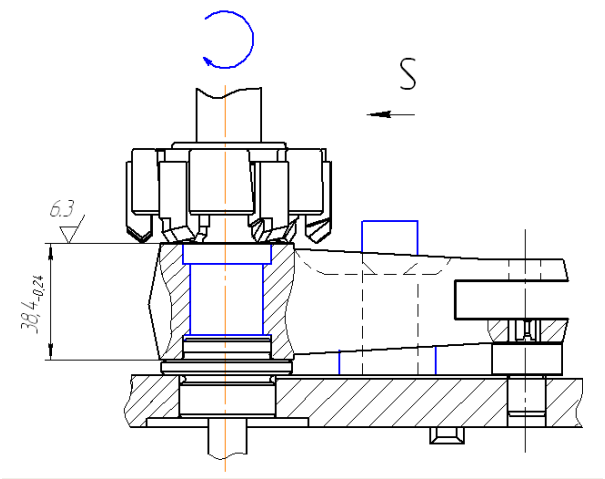


Рис.2.1. Фрезерування площини

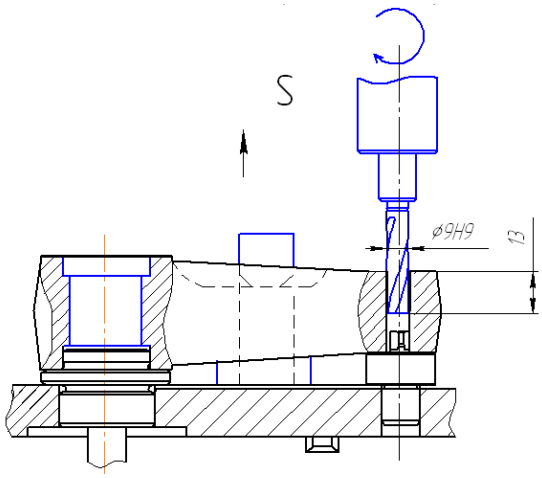


Рис.2.2. Свердління отвору

Для формування плоскої поверхні необхідно 3 рухи: 1 установчий Уст($П_3$) та 2 формоутворюючих $Ф_v(О_1П_2)$. $О_1$ – обертовий рух фрези та $П_2$ – поздовжнє переміщення стола. Таким чином напрямною є пряма (в напрямку протилежному руху стола). Метод формоутворення сліду – $П_2$ та твірна – дуга МФУ сліду.

Для свердління і зенкерування отвору (див.рис.2.2) інструментам надаються формоутворюючі рухи, а саме: обертовий рух $О_1$ і поступальний $П_3$, а заготовка нерухома.

1. Напрямна – коло. Метод сліду $Ф_1$, $Ф_v(О_1)$.

2. Твірна лінія – пряма – Метод сліду Ф=1, $Ф_з = (П_з)$.

Сумарний рух $Ф_Σ = 2$, $Ф_v(О_1)$, $Ф_s(П_3)$.

Для розвертання отвору (див.рис.2.3) рухи аналогічні до рис.2.2.

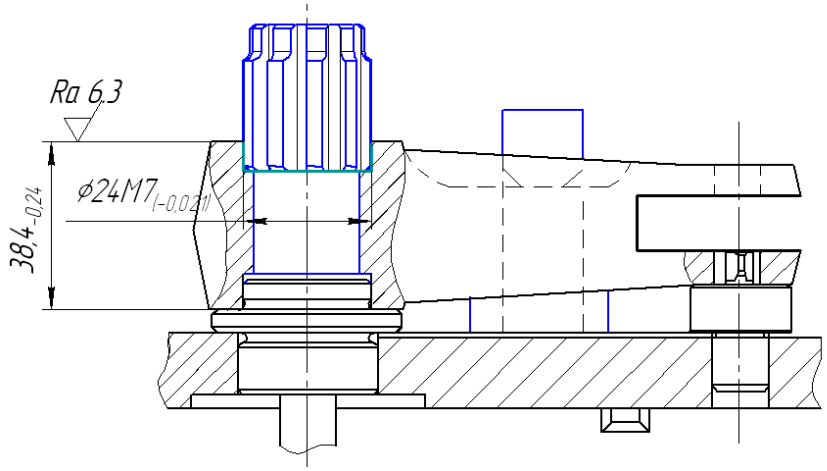


Рис.2.3. Зенкерування і розвертування отвору

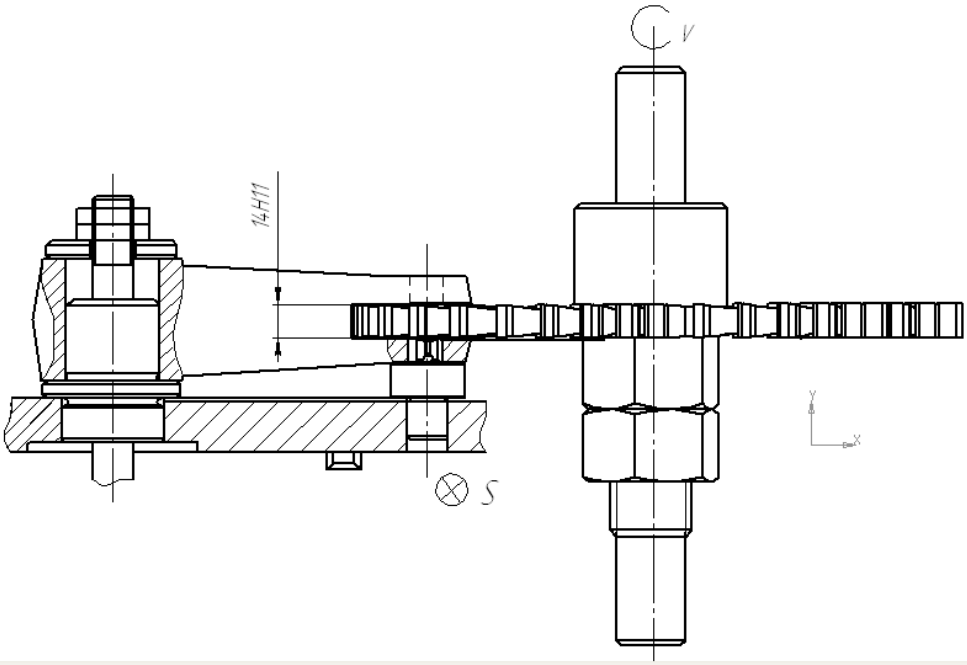


Рис.2.4. Фрезерування пазу

Фреза здійснює головний рух різання $Ф_v(О_1)$, а стіл із заготовкою – рух подачі $Ф_s(П_2)$. Твірна і напрямна є прямими. Причому лінія, яка охоплює фрезу утворюється по методу копіювання, оскільки профіль формується внаслідок геометричних параметрів фрези, а інша пряма – метод сліду.

2.2. Обґрунтування структурно-кінематичної схеми верстата.

Після проведеного аналізу формоутворюючих рухів, достатньою умовою для обробки деталей на фрезерному верстаті є наявність декількох комбінацій рухів, а саме:

1) головний рух та установчий рух виконує інструмент, а рух подач – стіл;

Оптимально коли рухи, розподілені між вузлами верстату, і останній здійснює не комплексний складний рух, а формоутворення відбувається за рахунок взаємних простих рухів вузлів верстату. Відповідно приводи рухів поперечних та поздовжніх подач мають окремі приводи, що характерно для сучасних МРВ з ЧПК. Вибираємо тип приводів за компоновкою базового верстата Haas VF-2.

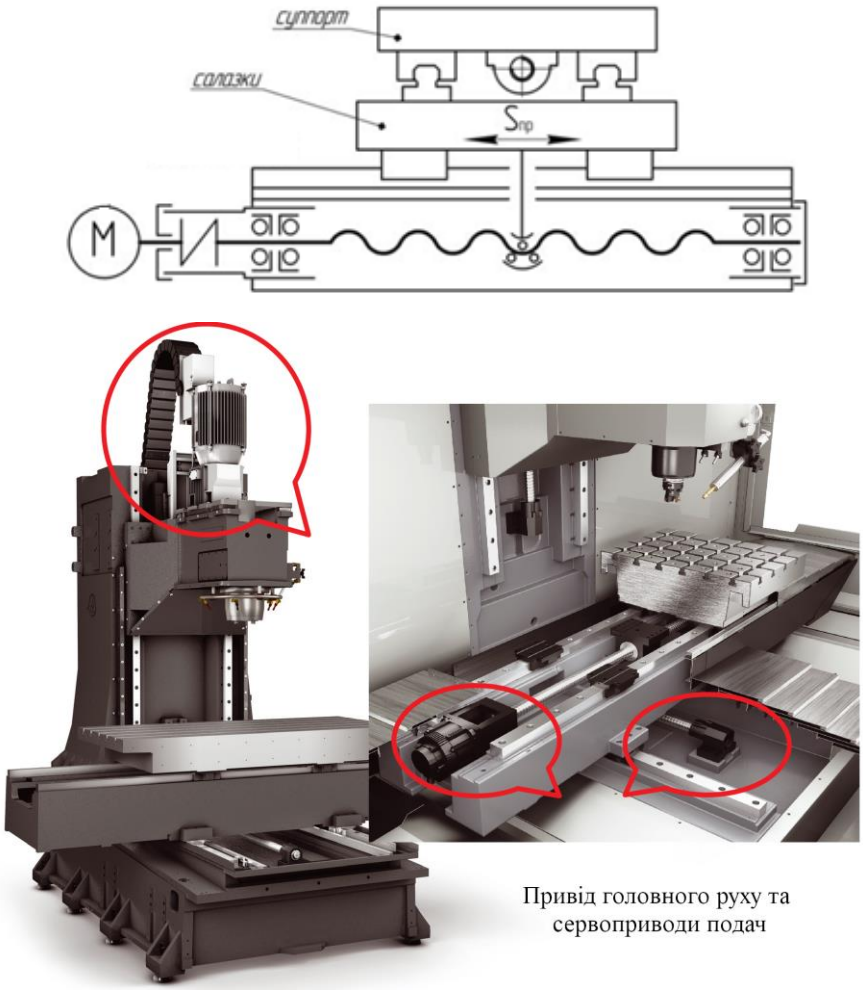


Рис.2.5. Схема і розміщення приводів верстату

2.3. Обґрунтування модулів верстата (МК, ТМ)

Оскільки наш верстат є фрезерним, то на ньому передбачається виконання фрезерних операцій. Про схему компоновки можна проводити після аналізу сукупностей рухів і складання технологічного модуля [20].

Технологічний модуль (ТМ) – це такий мінімальний набір блоків компонування, який необхідний для виготовлення деталі або виконання операції по формоутворенню деталі. В ТМ має входити стаціонарний блок і ряд інших рухомих блоків, що виконують лише формоутворення[6].

Для фрезерування:

1.торцевих поверхонь $\mathrm{TM1} = \{\mathrm{XYZ0C\bar{h}}\}$

2.складних профілів $\mathrm{TM2} = \{\mathrm{XYZ0C\bar{v}}\}$

Склавши технологічні модулі з формоутворення поверхонь складаємо модульний комплект (МК) для забезпечення тих самих формоутворних рухів. Саме визначення модульного комплекту спонукає нас до даної процедури.

Модульний комплект (МК) – це найменша кількість блоків для виконання конкретної операції, тобто комплект блоків, у який входять блоки формоутворення, допоміжних і установчих рухів.

Для фрезерування:

1. торцевих поверхонь $\mathrm{MK1} = \{\mathrm{XYZ0C\bar{h}}\}$
2. складних профілів $\mathrm{MK2} = \{\mathrm{XYZ0C\bar{v}}\}$

У структурні формули фрезерно-свердлильних верстатів входить 5 або 6 позицій (розрядів) -- це блоки координатних переміщень X, Y, Z, O і поворотного столу та інструментального шпинделя.

З метою спрощення аналізу ці структурні формули зводять до 4-ох розрядів, оскільки блок інструментального шпинделя можна не враховувати, тому що його розрядне положення у формулі (крайнє праворуч) повинно завжди залишатися незмінним і перестановкам не підлягає. Щодо поворотних шпиндельних головок, то вони подібні до поворотних столів і їх можна розглядати як конструктивні виконання блоків, що несуть шпиндель.

Отже, на 1 – му етапі аналізу можна оперувати з формулами, що містять чотири позиції X, Y, Z, O. Кількість можливих комбінацій із чотирьох знаків:

$$P4 = 4! = 24.$$

На рис.2.6 зображено приклади можливого утворення типів компонувань верстатів та наведено відповідні узагальнені структурні формули й приклади виконання таких компонувань. Матриця компонувань ділиться на 4 підмножини за структурними ознаками. Границями підмножин є стовпці матриці й східчаста лінія 101, що розділяє компонування з вертикальним переміщенням заготовки від компонувань з вертикальним переміщенням інструмента.

Тип E – компонування, у яких усі рухи формоутворення виконує інструмент, а стіл – нерухомий.

Тип F – компонування, у яких усі рухи, окрім обертання інструмента, виконує заготовка. До цього типу, зокрема, відносять консольно-фрезерні верстати.

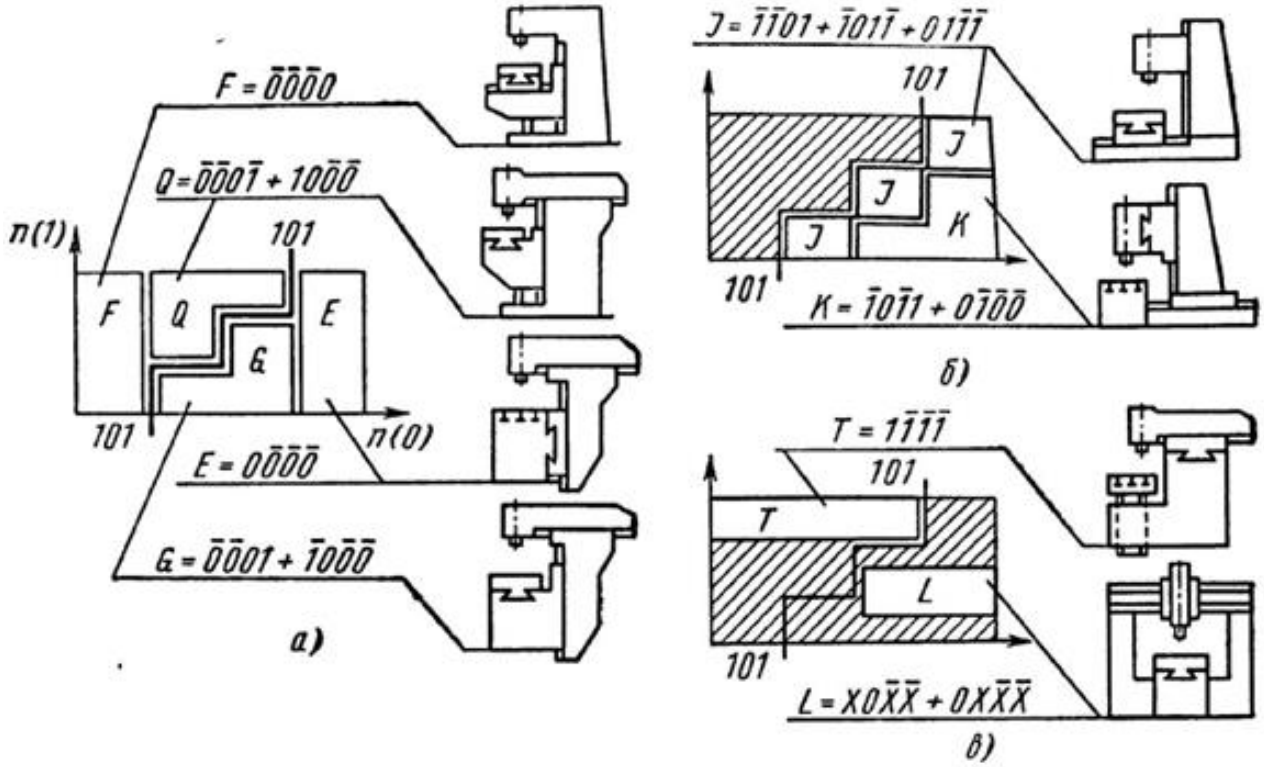


Рис.2.6. Утворення підмножин компонувань

У компонуваннях типів G и Q стаціонарний блок займає проміжні положення в структурних формулах і рухи формоутворення розподіляються між

інструментом і заготовкою. Тип G – компоновки з вертикальним переміщенням інструмента, а Q – з вертикальним переміщенням заготовки. У компонуваннях типів E і G робочий простір розташований над станиною, а в компонуваннях типів F і Q збоку основної частини станини.

Так при умові, що блок, у якому розміщений шпиндель є нерухомий, то узагальнена формула компонування буде мати вигляд:

$$\mathrm{F} = \bar{0}\bar{0}\bar{0}0$$

Стіл нерухомий, а всі рухи виконує інструмент:

$$\mathrm{E} = 0\bar{0}\bar{0}\bar{0}$$

Заготовка має тільки горизонтальне переміщення:

$$\mathrm{G} = \bar{1}\bar{0}01 + 10\bar{0}\bar{0}$$

Інструмент має тільки горизонтальне переміщення:

$$\mathrm{Q} = \bar{0}\bar{0}0\bar{1} + 10\bar{1}\bar{1}$$

Додатковий тип верстатів з вертикально-рухомим столом:

$$\mathrm{T} = 1\bar{1}\bar{1}\bar{1}$$

За ознакою рухомості колони компонування верстатів можна класифікувати на два типи: тип I – нерухома колона і тип К – рухома.

Нерухома стійка, яка з'єднана із стаціонарним блоком або виконана як одне ціле, визначає, що вертикально-рухомий блок займає розрядне положення, сусіднє зі стаціонарним блоком з боку інструмента. Відповідно узагальнена структурна формула компонувань типу I (не J):

$$\mathrm{I} = \bar{1}\bar{1}01 + \bar{1}01\bar{1} + 01\bar{1}\bar{1}$$

В компонуваннях з рухомою колоною, навпаки, блоки сусідні із стаціонарним повинні бути лише горизонтально-рухомими.

Заготовка із столом горизонтально рухома або нерухома, а решта блоків сусідніх з стаціонарним – горизонтально рухомі. Конструктивно передбачена рухома колона.

$$\mathrm{K} = \bar{1}0\bar{1}1 + 0\bar{1}\bar{0}\bar{0}$$

Поздовжньо рухомий стіл або сусідній блок. Або стіл нерухомий. Конструктивно передбачена можливість значного збільшення поздовжнього

ходу. Виконання може бути з рухомим або не рухомим порталом.

$$L = 0X\overline{XX} + X0\overline{XX}$$

Кожна з узагальнених структурних формул типів компонувань може бути записана таким способом. При цьому, для повноти запису конкретних формул і при деталізуванні узагальнених формул необхідно приписувати знак $\hat{C}$ справа блоку інструментального шпинделя, наявність якого передбачається в скороченому записі формули компоновки.

2.4. Аналіз типів базових компонувань

2.4.1. Вибір верстатів-аналогів

Загальна схема розгортання множини компонувань трьохкоординатних верстатів наступна: на першому етапі (К1) з множини блоків $X, Y, Z, 0$ шляхом перестановок знаків утворюють 24 горизонтальних і стільки ж вертикальних координатних компонувань; на другому етапі (К2) на основі структурних ознак утворюють базові компоновки різних типів; на третьому етапі (К3) кожну базову компоновку перетворюють у множину компонувань шляхом перебору варіантів блоків по заздалегідь складеному переліку з можливих виконань.

Третій етап супроводжується уточненням формул компонувань, яке досягається проставлянням біля блоків індексів, що вказують найбільш важливі умови конструкційного виконання.

Вибір тих або інших умов для відбору компонувань визначають конкретні вимоги виробництва, він залежить від розмірів проектованого верстата, форми координатного простору компоновки, передбачуваного способу використання верстата в комбінації з іншими верстатами й від умов проектування.

2.4.2. Вибір оптимальної схеми компонування

З конструкції інструменту (обертовий, осьовий) обертовий блок компонування має бути кінцевим із сторони вітки інструменту.

$$I = \bar{1}\bar{1}01 + \bar{1}01\bar{1} + 01\bar{1}\bar{1}$$

Також слід врахувати, що стіл верстату повинен мати переміщення вздовж осей X, Y, а шпиндельна група вздовж Z.

Тоді матриця компонувань матиме вигляд:

$$A = \overline{Z}\overline{Z}\overline{Z}Z \tag{2.1}$$

$$A = \begin{vmatrix} XYOZ \\ YXOZ \\ XOYZ \\ YOXZ \\ OXYZ \\ OYXZ \end{vmatrix} \tag{2.2}$$

Умови структурного відбору компонувань базуються на технологічних і конструктивних міркуваннях. Для зручності аналізу верстати в загальній матриці розділили на групи [20]:

M_1 - умови що виключають вплив ваги заготовки і вузлів верстата;

M_2 - різні умови, спрямовані на підвищення точності верстата;

M_3 - умови, пов'язані з динамічними властивостями компонування;

M_4 – умови, пов'язані із завантаженням і зміною заготовок;

M_5 - умови, пов'язані з уніфікацією варіантів виконань компонувань.

Основними умовами відбору для конструювання безконсольно-фрезерного верстату є [20]:

Умова 1: виключення впливу маси заготовки і вузлів верстата.

- виключення впливу маси заготовки при вертикальних переміщеннях. Це означає, що заготовка не має вертикального переміщення.

Умова 2: Спрямованість на підвищення точності верстата:

- можливість збільшення холостого аксіального ходу для автоматичної заміни інструменту без вильоту напрямних; Це означає, що аксіально-рухомий блок з’єднаний із стаціонарним через ланку інструменту;
- скорочення розмірного ланцюга, що забезпечує паралельність осі

шпинделя з аксіальним переміщенням, тобто шпиндельний блок компонування має осьове переміщення;

- підвищення жорсткості за рахунок рамних і гвинтових підтримок, тобто вертикально-рухомий блок примикає до стаціонарного блоку;
- зменшення впливу температурних деформацій шпиндельного блока, тобто шпиндельний (інструментальний) блок є аксіально – рухомим;

Умова 3: пов’язана з динамічними властивостями компонування:

- зменшення вертикально-рухомих і консольних мас, тобто вертикально-рухомий блок є кінцевим;
- зменшення переважно-рухомих мас, тобто рухомий блок (блок Z) є кінцевим блоком компонування;
- підвищення стійкості мас по їх розташуванню в компонуванні (у зв’язку з величинами координатних переміщень). Чим більший хід має блок, тим ближче він має знаходитися до стаціонарного блоку.

$$M1.1 = \bar{Z}\bar{Z}O\bar{Z} + \bar{Z}O\bar{Z}\bar{Z} + OZ\bar{Z}\bar{Z} \quad (2.3)$$

$$M2.1 = \bar{Z}\bar{Z}OZ + \bar{Z}OZ\bar{Z} + 0Z\bar{Z}\bar{Z} \quad (2.4)$$

$$M2.2 = \bar{Z}\bar{Z}\bar{Z}Z \quad (2.5)$$

$$M2.3 = \bar{1}\bar{1}10 + \bar{1}\bar{0}0\bar{0} + \bar{0}0\bar{0}\bar{1} + 01\bar{1}\bar{1} \quad (2.6)$$

$$M2.5 = \bar{Z}\bar{Z}\bar{Z}Z \quad (2.7)$$

$$M3.1 = 1\bar{1}\bar{1}\bar{1} + \bar{1}\bar{1}\bar{1}1 \quad (2.8)$$

$$M3.2 = Z\bar{Z}\bar{Z}\bar{Z} + \bar{Z}\bar{Z}\bar{Z}Z \quad (2.9)$$

$$M3.4 = ZYXO + Z\bar{Z}O\bar{Z} + Z\bar{O}\bar{Z}Z + OXYZ \quad (2.10)$$

$$M = \emptyset + \emptyset + XYOZ + \emptyset$$

Раніше було прийнято, що будемо вибирати компонування з рухомим блоком ШВ, то в результаті ми можемо отримати схеми, що описуються такими різними компонувальними формулами. Як приклад на рис. 2.7 представлено компоновки за формулами $XY0ZC\bar{v}$.

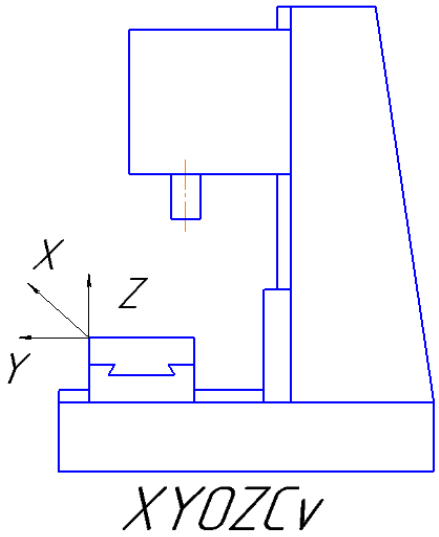


Рис.2.7 Компонування запропонованого фрезерного верстату

2.5. Опис та обґрунтування конструкції станини на основі аналогу

За аналог взято корпус верстату американського виробництва Haas VF-2. Станина – це головний корпусний елемент системи верстата, яка призначена для монтажу деталей і вузлів верстата. За рахунок прикріплених до неї напрямних забезпечується орієнтація і переміщення інших рухомих вузлів.

Станина разом з іншими елементи несучої системи, повинні забезпечити закладену базову точність протягом усього терміну експлуатації верстата. Цього можна досягти за рахунок правильного вибору матеріалу станини, її форми й поперечного перерізу, технології виготовлення. Форма перерізу типових горизонтальних станин (рис. 2.1) визначається багатьма факторами, описаними в [20].

Станини розраховують на да основних показники – жорсткість і температурні деформації. Жорсткість конструкції забезпечує точність обробки і характеризує величиною зміщення інструменту відносно заготовки. Жорсткість базових деталей визначається власною їх жорсткістю на згин, кручення, зсув тощо [20].

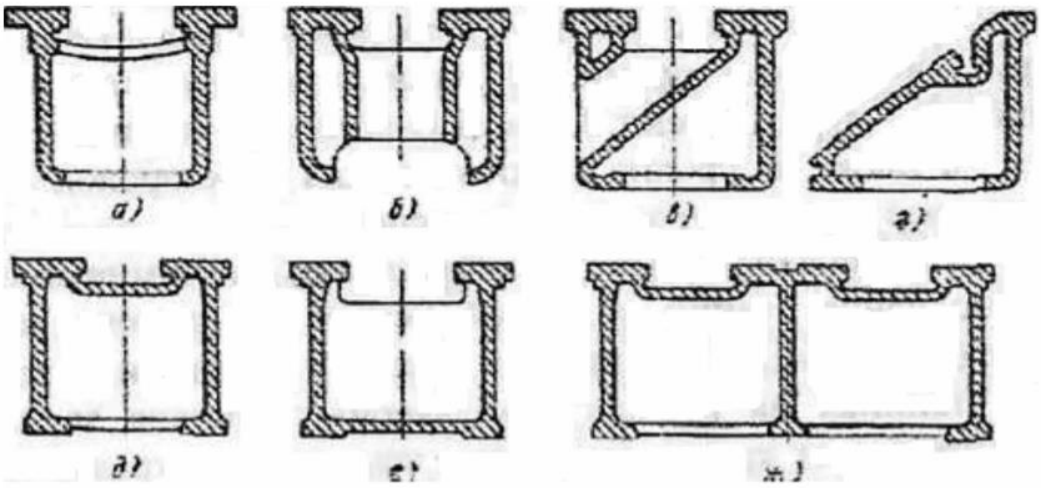


Рис. 2.1 Типові перерізи горизонтальних станин

У станинах фрезерних верстатів, для прикладу у 6Р13Ф3 розміщується коробки швидкостей, в консолі – подач, що створює ще більше вібронавантаження на конструкції окрім вібрацій від зони оброблення. Судячи з абревіатури верстат оснащений ЧПК і мав би мати безступеневе регулювання, проте він має таку ж коробку швидкостей, як і без ЧПК у якій перемикання виконується з використанням електромагнітних муфт.

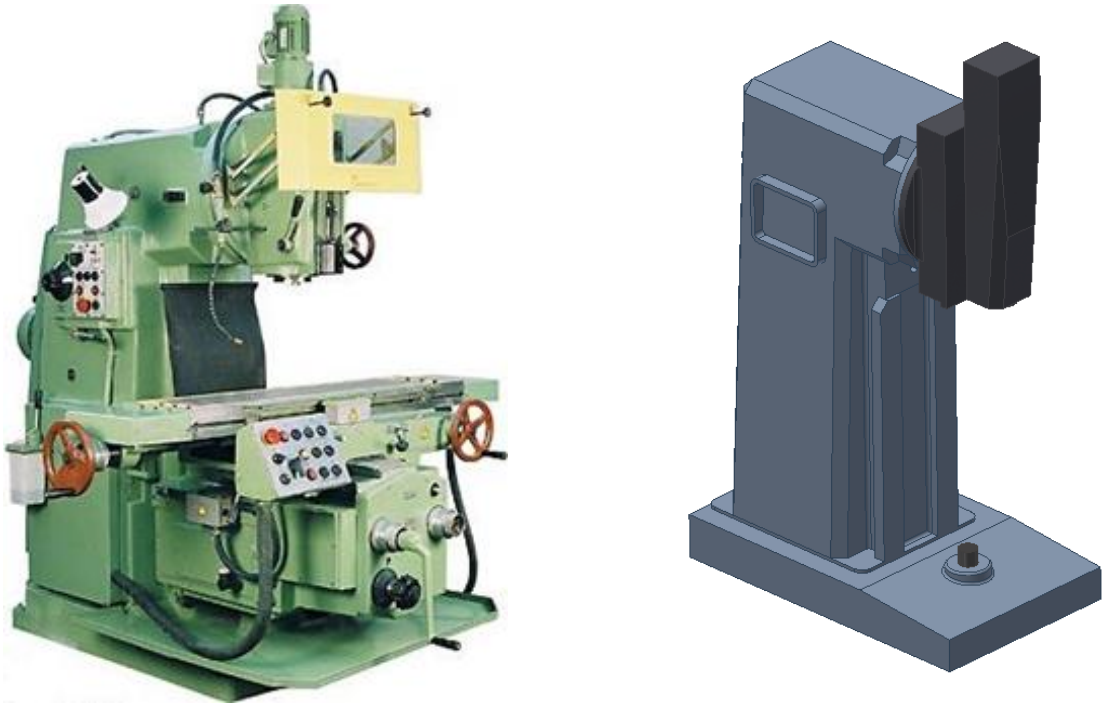


Рис.2.2 Зовнішній вигляд верстату 6Р13Ф3 і 3D-модель станини

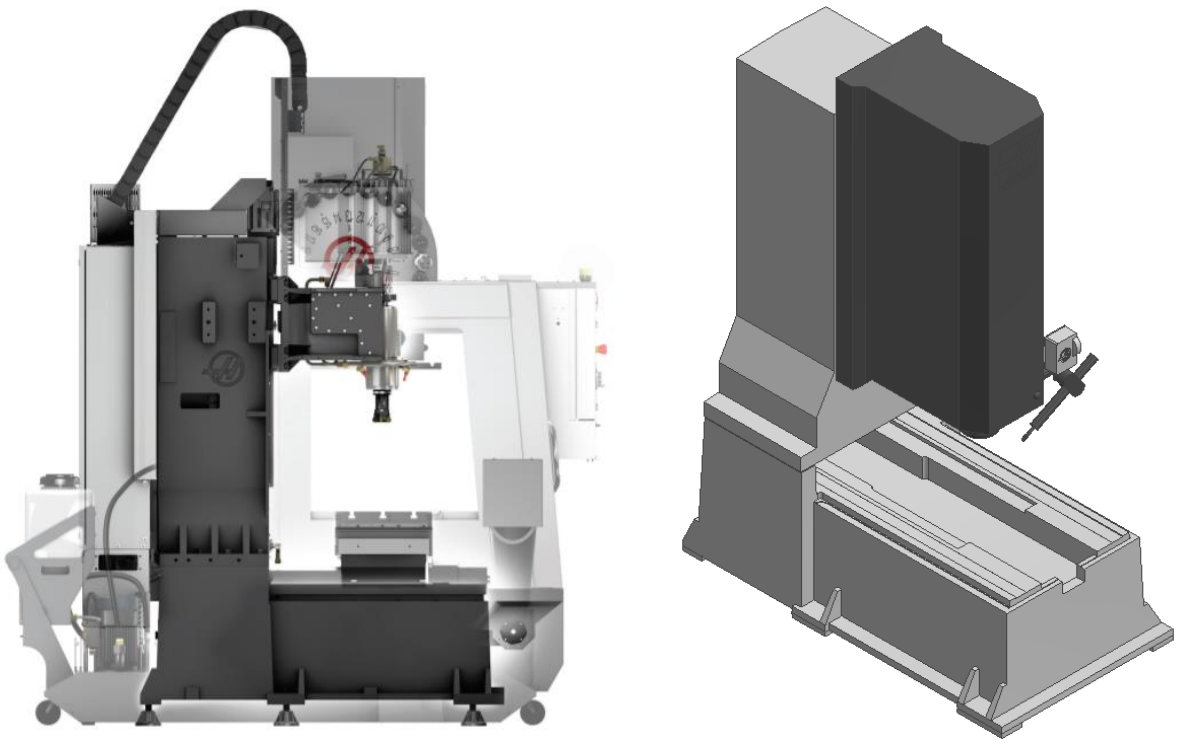


Рис.2.3 Зовнішній вигляд верстату Haas VF-2 і 3D-модель станини

Модель верстату Haas VF-2 відноситься до безконсольного типу. Його конструкція вважається менш універсальною, у порівнянні з 6Р13Ф3, проте володіє більшою жорсткістю. В 6Р13Ф3 станина виконана суцільною, коробчастого типу з перегородками і отворами для підшипників КШ у верхній частині корпусу. У нижній відведено місце для насосної станції. КШ, як і будь-яка зубчаста пара створює шум. Верстат не має балансирних валів для нівелювання обертових сил. Станина кріпиться до так званої основи. Консоль має 3 точки контакту (рис.2.4) – дві напрямних і одна точка опори на гвинті. Теплова деформація через напрямні може передаватися на консоль і далі на стіл, що погіршить точність.

У верстаті Haas VF-2 стіл рухається по станині, а шпиндельна головка по колоні. Деформація колони через тепло від шпиндельного вузла не передаватиметься на стіл, оскільки вони не мають прямого контакту на відміну від 6Р13Ф3.

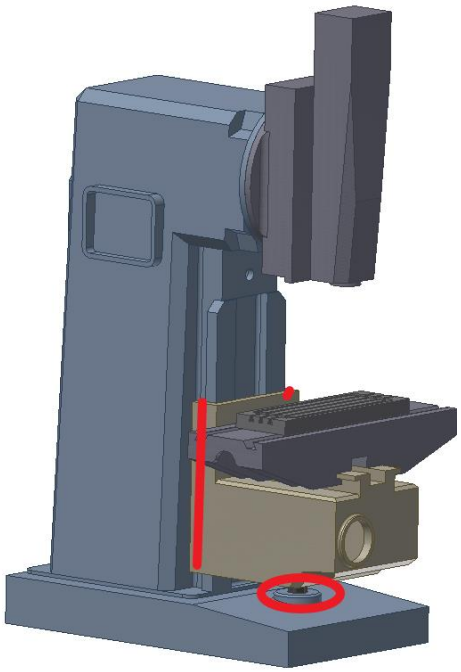


Рис.2.4 Контакт консолі зі станиною 6Р13Ф3

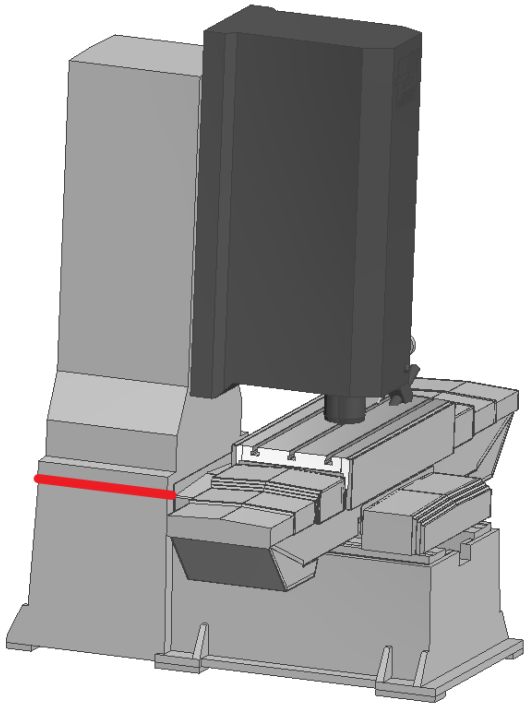


Рис.2.5 Зона контакту колони і станини Haas VF-2

Порівнювати їх не зовсім доцільно з точки зору технологічності, адже різниця між ними, майже у 50 років. Але насправді, це не змінює того, що станина повинна витримувати навантаження і забезпечувати жорсткість. Обидва верстати приблизно однакового розміру. Розміри столів Haas VF-2 і 6Р13Ф3 наведено у табл. 2.1.

Таблиця 2.1 Характеристики Haas VF-2 і 6Р13Ф3

Модель верстата	Haas VF-2	6Р13Ф3
Розмір стола, мм (Д×Ш)	914×356	1600×400
Хід переміщення стола, мм (X×Y×Z)	762×406×508	1000×400×430
Вага оброблюваної деталі, кг	1361	630
Потужність шпинделя, кВт	22,4	11
Частота обертання шпинделя, об/хв.	8100	1600
Габарити, мм (Д×Ш×В)	3073×2311×2769	2570×2252×2430
Вага верстату, кг	3539	4300

Для теоретичного та комп'ютерного дослідження верстат Haas VF-2 представляє більший інтерес.

2.6. Принцип роботи та технологічні розрахунки

2.6.1. Силові та міцнісні розрахунки станини

Даними для аналітичного розрахунку є розміри і форма перерізу станини, яка змодельована нами в SolidWorks і досліджена з використанням модуля Shape Generator в Autodesk Inventor (рис.4.6). Станина обробного центру Haas VF-2 складається з двох частин – основи і колони. Розрахунок основи П- подібного профілю виконуємо подібно до розрахунку станини токарного верстату, а колони, як стержня.

а) Жорсткість станини у вигляді двох стінок з перпендикулярними перегородками

Основні розміри станини, мм:

$$a = 777 \text{ мм},\ \ b = 620 \text{ мм},\ \ c = 450 \text{ мм},\ \ \delta = 35 \text{ мм},\ \ L = 135 \text{ мм}$$

Основні параметри станини:

$$L_1 = 1400 \text{ мм}, \qquad d = 220 \text{ мм},\ N_{дв} = 22.4 \text{ кВт}, V_{хв.} = 50\frac{\text{м}}{\text{хв}}.$$

Визначаємо сили, які діють на верстат:

$$Pz := \frac{1000 \cdot N_{dv}}{V_m} = \left(1.613 \cdot 10^9\right) N$$

Для визначення інших сил використаємо співвідношення:

$$P_z : P_x : P_y = 1 : 0{,}5 : 0{,}3$$

$$P_x = 0.5 \cdot P_z = 13445 \text{ Н};$$

$$P_y = 0.3 \cdot P_z = 8067 \text{ Н}$$

$$Pz := \frac{1000 \cdot N_{dv}}{V_m} = \left(1.613 \cdot 10^9\right) N$$

$$Px := Pz \cdot 0.5 = \left(8.064 \cdot 10^8\right)\ N \quad Py := 0.3 \cdot Pz = \left(4.838 \cdot 10^8\right)\ N$$

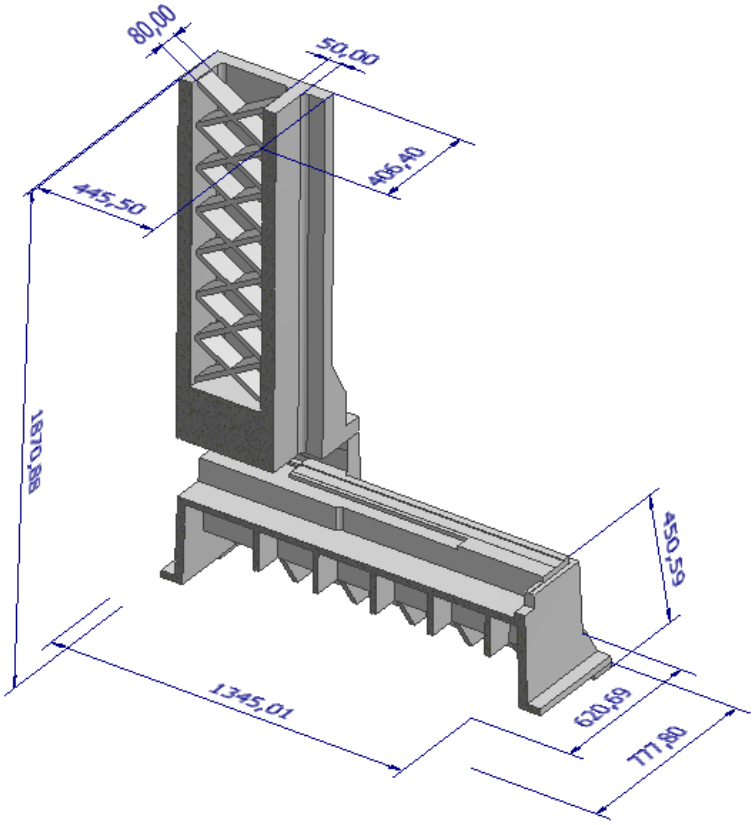


Рис.2.6 3D-модель станини з колоною

Визначаємо приведену жорсткість.

При проведенні технічних розрахунків деформація станин визначається як для балок постійного перерізу, які мають деяку приведену жорсткість.

$H_1 = 450$ мм – висота станини;

$H_2 = \frac{1}{2} \cdot H_1 = 450 = 225{,}5$ мм – відстань від напрямних станини до осі, яка проходить через центр ваги станини;

Для розрахунку центру ваги відтворюють еквівалентну схему заміщення станини (рис.2.7).

Розрахунок центра маси виконується по схемі, наведеній на рис.2.7. Для цього необхідно розрахувати площу F_n і центри мас Y_{c_n} відповідних ділянок станини n =1-4. Для цих розрахунків використаємо пакет Mathcad.

$$F_1 := \frac{a-(b-2\ \delta)}{2} \cdot 2\ \delta = (7.945 \cdot 10^3)\ mm^2 \qquad F_2 := (c-3\cdot\delta)\cdot\delta = (1.208\cdot 10^4)\ mm^2$$

$$F_3 := \left(\frac{1}{4}\cdot b\right)\cdot\delta = (5.425\cdot 10^3)\ mm^2 \qquad F_4 := \delta^2 = (1.225\cdot 10^3)\ mm^2$$

$$Y_{c1} := \delta = 35\ mm \qquad Y_{c2} := \frac{(c-3\cdot\delta)}{2} = 172.5\ mm$$

$$Y_{c3} := c - \frac{\delta}{2} = 432.5\ mm \qquad Y_{c4} := 3\ \delta = 105\ mm$$

Відстань від площини напрямних станини до осі, яка проходить через центр ваги станини визначають за формулою, але ми його визначили геометрично:

$$H_2 = \frac{\sum_n (F_n \cdot Y_{c_n})}{\sum_n F_n}$$

Визначаємо крутний момент на фрезі:

$$n := 8100\ rpm$$

$$M_{kr} := \frac{N_{dv}\cdot 30\cdot 10^3}{\pi\cdot n} = (2.522\cdot 10^5)\ N\cdot m$$

Визначаємо момент інерції на згин площини меншої жорсткості бокової стінки станини:

$$J_{stZ} := \frac{(c-3\cdot\delta)\cdot\delta^3}{12} = (1.233\cdot 10^6)\ mm^4$$

$E = 1.5 \cdot 10^5$ Н/мм^2 – модуль пружності для чавуну; s – коефіцієнт, який залежать від кількості перегородок станини.

Для станини з П – подібними перегородками в кількості $n_п$=5.

$$\nu := \frac{L}{b\cdot(5+1)} = 0.036 \qquad w := \frac{F_2}{(c-4\ \delta)\cdot(b-2\ \delta)} = 0.071$$

$$\psi := \frac{J_{stZ}}{F_2\cdot b} = 0.165\ mm \qquad J_{nZ} := \frac{(c-4\ \delta)\cdot(b-2\ \delta)^3}{12} = (4.298\cdot 10^9)\ mm^4$$

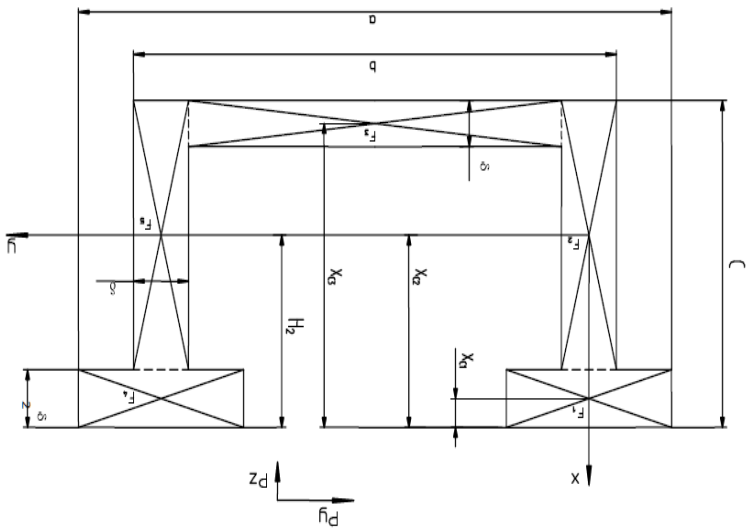


Рис.2.7. Спрощена розрахункова схема станини

$$\xi := \frac{1}{\nu} \cdot \left(\frac{J_{stZ}}{J_{nZ}} \right) \cdot (36 \cdot \psi \cdot w) = 0.003 \ mm$$

$$\eta_1 := 1 + \left(\frac{36 \cdot 0.165}{0.036} \right) = 166$$

$$\eta_2 := \frac{(3 + 4 \cdot 0.003)}{3 + 0.003} + \frac{36 \cdot 0.165}{0.036^2} \cdot \left(1 + \frac{9 \cdot 0.036 \cdot 0.071}{(3 + 0.165)^2} \right) = 4.595 \cdot 10^3$$

$$\eta_1 = 1 + \frac{36\psi}{v} = 165; \ \eta_2 = \frac{3 + 4\xi}{3 + \xi} + \frac{36\psi}{v^2} \cdot \left[1 + \frac{9 \cdot v \cdot w}{(3 + \xi)^2} \right] = 1.131$$

$$s_1 = \frac{32}{\eta_2} = 28.304$$

Тоді:

$$EJ_{zg_pr} = s_1 EJ_{стZ} = 8{,}5 \times 10^{11}$$

б) жорсткість станини на кручення

Визначаємо момент інерції на згин в площині, більшій за площину січення бокової стінки:

$$J_{stX} := \frac{(c - 3 \cdot \delta) \cdot \delta^3}{12} = \left(1.233 \cdot 10^6 \right) \ mm^4$$

Визначаємо приведену площу перерізу:

$$F_{stX} := \delta \cdot L = \left(4.725 \cdot 10^3\right)\ mm^2$$

Модуль матеріалу чавуну:

$$G = 4.5 \times 10^5\ Н/мм^2$$

Приймаємо K = 0,95, тоді:

$$GJ_{kr_pr} = \frac{b^2 \cdot E \cdot J_{стX}}{\frac{K \cdot L^2}{6} + \frac{2 \cdot E \cdot J_{стX}}{G \cdot J_{стX}}}$$

$$GJ_{kr_pr} := \frac{620^2 \cdot 1.5 \cdot 10^5 \cdot 1.233 \cdot 10^6}{\left(\frac{0.95 \cdot 1500}{6}\right) + \left(\frac{2 \cdot 1.5 \cdot 10^5 \cdot 1.233 \cdot 10^6}{4.5 \cdot 10^5 \cdot 1.233 \cdot 10^6}\right)} = 2.985 \cdot 10^{14}$$

Розрахунок колони

У загальному випадку стійки піддаються деформації згину і зсуву в двох площинах кручення. Жорсткість колон на згин визначають за моментом інерції розрахункового перерізу, тобто поперечного перетину, який найбільш точно відображає конструктивні особливості колони. При зміні перетинів по висоті колони за розрахунковий вибирають перетин, віддалений від найбільшого на відстань, приблизно рівне 1/3 (рис.2.8) довжини ділянки змінної жорсткості. Вплив поперечних ребер і перегородок на жорсткість згину не дуже спливає і може не враховуватися.

Жорсткість колони на згин обчислюють за площею розрахункового перерізу. Величину переміщення точки прикладання сили можна визначити за формулою:

$$f = \frac{P \cdot l^3}{3EJ} + \frac{NPl}{GF}$$

Спочатку визначаємо відношення розмірів поперечного перерізу:

$$h := 372.6\ mm \qquad b := 406.4\ mm \qquad t := \frac{h}{b} = 0.917$$

$$h_1 := 302.14\ mm \qquad b_1 := 336.4\ mm$$

Визначаємо коефіцієнт розподілення зсуву:

$$N := \frac{3 \cdot (t+1) \cdot \left(2 \cdot t^3 + 10 \cdot t^2 + 15 \cdot t + 5\right)}{5 \cdot t^2 \cdot (t+3)^3} = 0.55$$

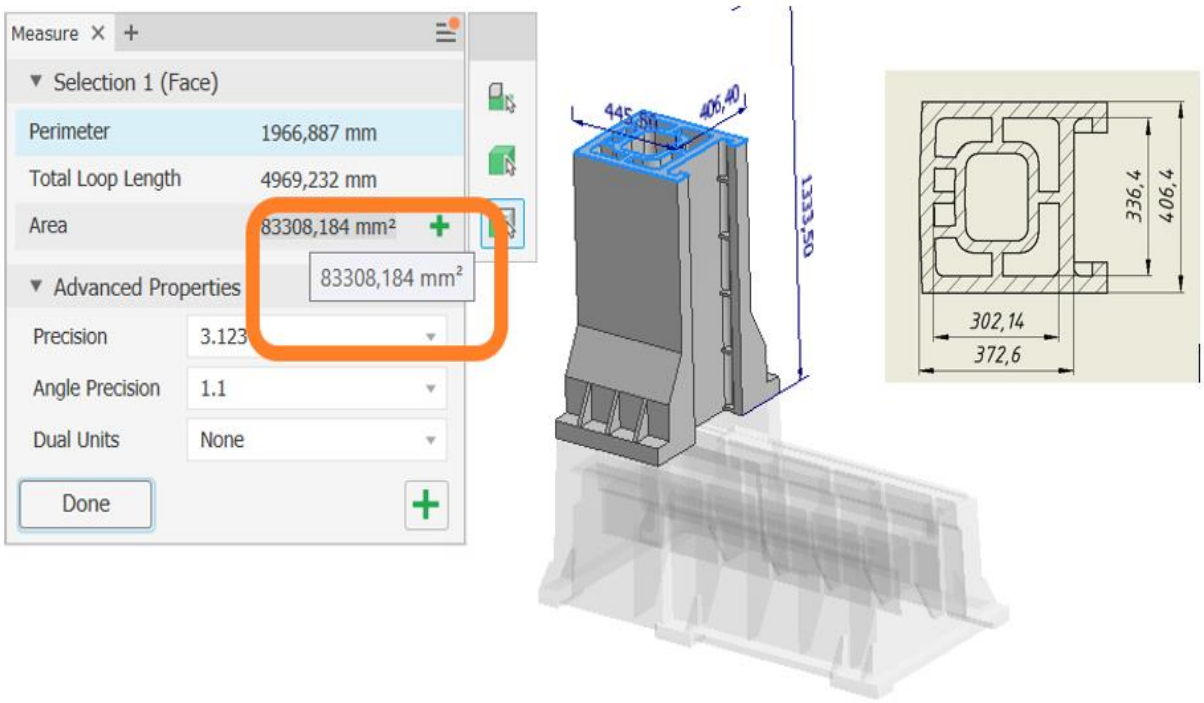


Рис.2.8. Поперечний переріз колони

Площа поперечного перерізу зображена на рис.2.8

$$F := 83308.184 \ mm^2$$

Знаходимо момент інерції перерізу станини:

$$J := \frac{b \cdot h^3 - b_1 \cdot h_1^{\ 3}}{12} = \left(9.787 \cdot 10^8\right) \ mm^4$$

Визначаємо величину жорсткості і податливості:

$$f := \frac{Px \cdot l^3}{3 \cdot E \cdot J} + \frac{N \cdot Px \cdot l}{G \cdot F} = \left(1.303 \cdot 10^3\right) \ mm$$

$$j := \frac{1}{f} = \left(7.672 \cdot 10^{-4}\right) \ \frac{1}{mm}$$

2.6.2. Розрахунок безступеневого приводу

Металорізальні верстати мають забезпечувати найефективніші режими різання. В зв'язку з тим, що фрезерні верстати з ЧПК обробляють заготовки із різноманітних матеріалів з різними фізико-механічними властивостями, то вони повинні забезпечити регулювання режимів різання в широкому діапазоні.

Як відомо у більшості верстатів з ЧПК відсутня коробка швидкостей, оскільки використовують або прямий привід, або мотор шпиндель. У деяких конструкціях ШВ використовують проміжний редуктор. Загальна методика розрахунку приводу наведена нижче.

Виконаємо розрахунок приводу головного руху із безступеневим регулюванням частоти обертання шпинделя.

Частоти обертання електродвигуна постійного струму наступні:

$$n_{dmin} := 125\ rpm \qquad n_{dmax} := 8100\ rpm \qquad n_{dn} := 10000\ rpm$$

$$n_{max} := 1000\ rpm \qquad n_{min} := 50\ rpm$$

Визначаємо загальний діапазон регулювання шпинделя:

$$R_n := \frac{n_{max}}{n_{min}} = 20$$

Визначаємо загальний діапазон регулювання електродвигуна:

$$R_D := \frac{n_{dmax}}{n_{dmin}} = 64.8$$

Розраховувємо діапазон регулювання електродвигуна при постійній потужності:

$$R_{dP} := \frac{n_{dmax}}{n_{dn}} = 0.81$$

Розраховуємо діапазон регулювання електродвигуна при постійному моменті:

$$R_{dM} := \frac{R_D}{R_{dP}} = 80$$

Визначаємо загальний діапазон регулювання шпинделя при постійній потужності:

$$R_P := \frac{R_n}{R_{dM}} = 0.25$$

Визначаємо необхідну кількість ступенів коробки швидкостей :

$$Z_k := \frac{\log(R_P)}{\log(R_{dP})} = 6.579$$

Тоді, приймаємо:

$$R_k := 8$$

Визначаємо діапазон електричного регулювання привода:

$$R_e := \frac{R_n}{R_k} = 2.5$$

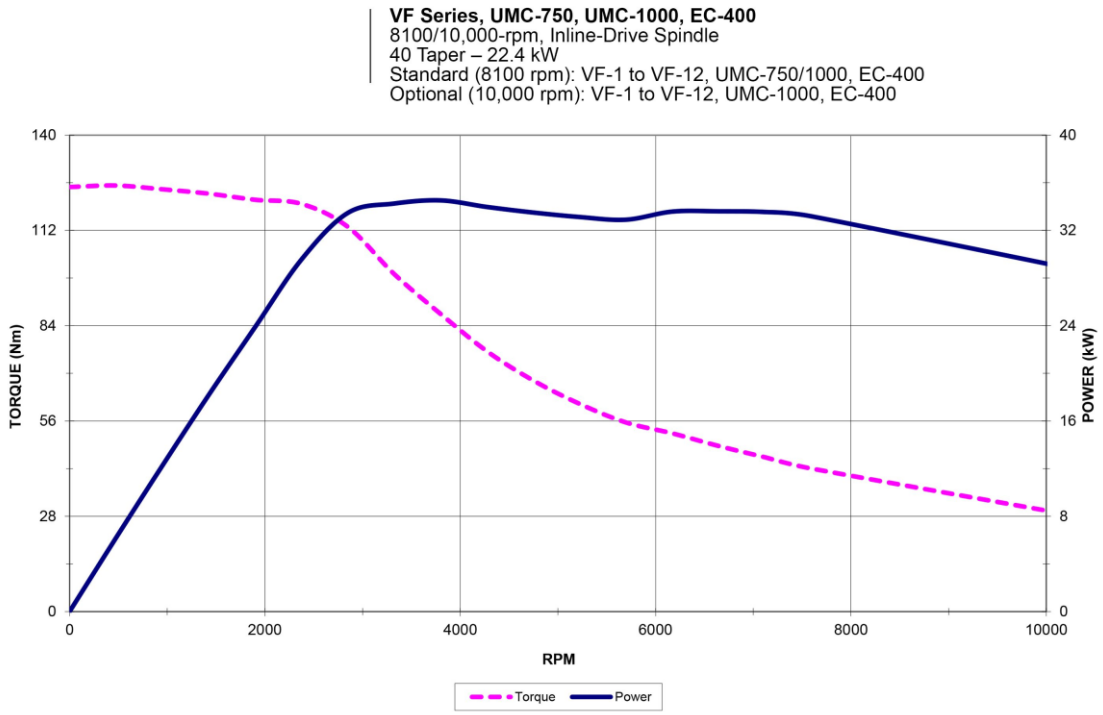


Рис.2.9. Графіки крутного моменту і потужності шпинделя із прямим приводом, 22 кВт, n=10000 об/хв.

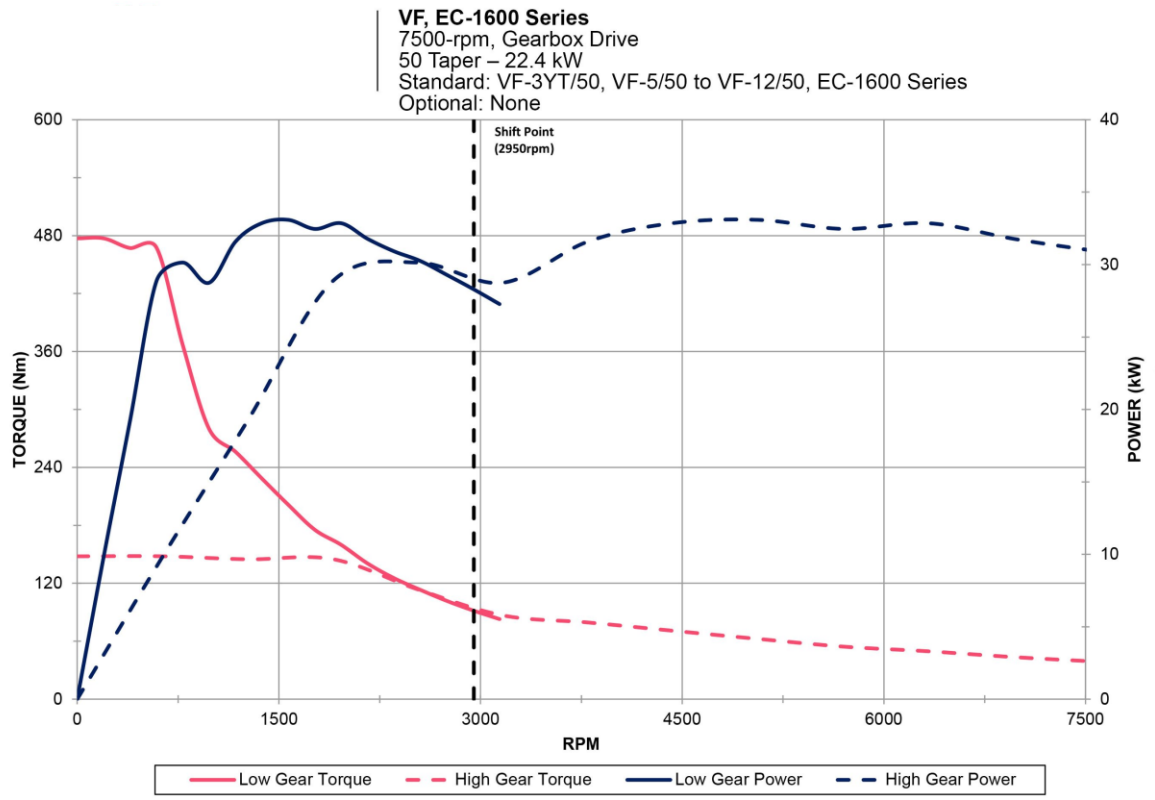


Рис.2.10. Графіки крутного моменту і потужності шпинделя із редуктором 22 кВт, n=7500 об/хв.

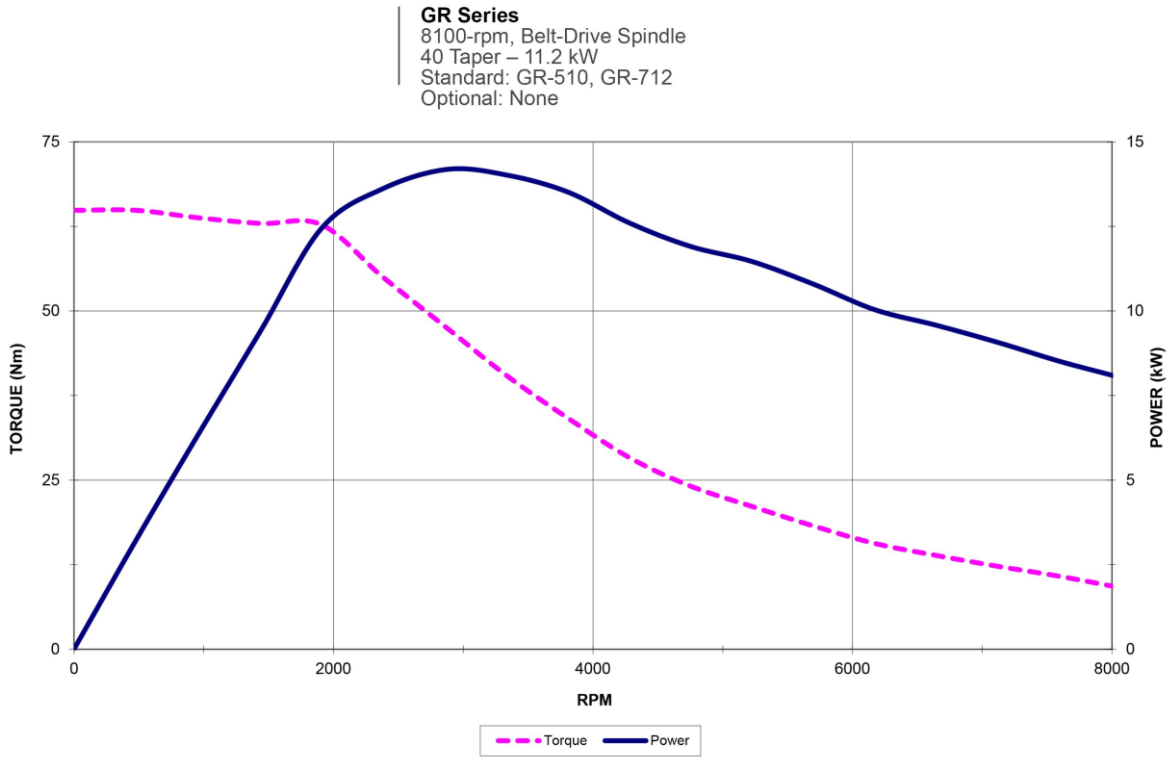


Рис.2.10. Графіки крутного моменту і потужності шпинделя із пасовою передачею 11 кВт, n=8000 об/хв.

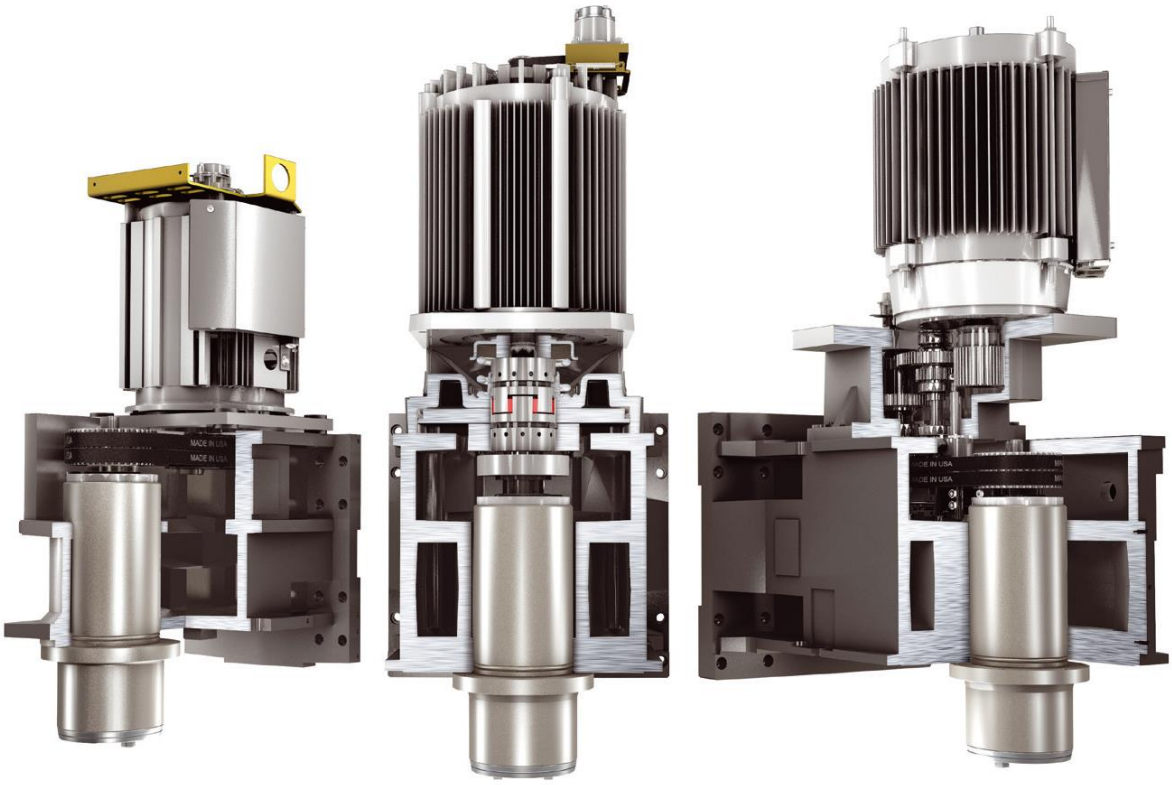


Рис.2.11. Шпиндельні бабки (в розрізі) із пасовою передачею, прямим приводом і редуктором

В цих верстатах використовуються шпинделі картриджного типу, тобто вони знаходяться в корпусі і герметизовані від забруднення МОР. На відміну від інших верстатів шпиндель не поливається мастилом, а навпаки подається дозовано до підшипників. Тут використовується так званий сухий картер. Вони мають високу навантажувальну здатністю. Така конструкція дозволяє сприймати високі осьових навантаження і мінімально нагріватися. Отвори з передньої і задньої сторони шпинделя і його зовнішній діаметр обробляються за одну установку, що гарантує співвісність між отворами і зовнішніми діаметрами, а це зменшує тепловиділення в підшипниках. Радіально-упорні підшипники є попередньо навантажені. Передні опори розміщені на відстані 60 – 80 мм від середніх площин підшипників що збільшує радіальну стійкість.

2.7. Висновки по розділу

Після проведення і виконання розрахунків можна провести пені висновки, а саме:

1. Не всі технологічні операції, які виконується на фрезерному верстаті показано. Це зумовлено тим, що з точки зору формоутворення виконавчі механізми виконують одинакові рухи, які є типовими;
2. Найбільш раціональне компонування для фрезерних верстатів, в тому числі з ЧПК є безконсольне. Воно дозволяє при відносно невеликих габаритах обробляти важкі заготовки;
3. Технічні рішення щодо використання сухого картера та змащування в дозованого змащення з точки зору екології і впливу на здоров’я працівників дуже корисне. Адже працівник не дихає парами ЗОР, а система фільтрації допомагає очищувати повітря;
4. Результати аналітичного розрахунку показали, що станина має досить високу жорсткість на згин кручення, а веичина податливості колони складає 0,00076 мм.

3. НАУКОВО-ДОСЛІДНИЙ РОЗДІЛ

3.1. Методика та план проведення наукових досліджень

Теоретичні дослідження напружено-деформованого стану конструкції (статичний аналіз) проводять з метою визначення внутрішніх напружень конструкції, прогину та коефіцієнту запасу міцності. Таке дослідження дозволяє побачити досліднику зони прикладення сил та вектори їх поширення і визначити вплив на інші елементи конструкції. Аналітично зробити це практично неможливо.

Після проведення статичного аналізу необхідно провести ще модальний аналіз для визначення власних частот і форми коливань конструкції та форми конструкції з використанням модуля Shape Generator. Про алгоритм їх дії і мету використання описано в 1 розділі. Нагадуємо, що усі ці дослідження проводяться з використанням САПР Inventor 2021 на основі методу МСЕ.

Серед названого, при конструюванні станин верстатів та верстатів загалом нас цікавить два параметри – переміщення елементів конструкції (прогин) від прикладених сил та частота і форма коливань. Завдання, які необхідно вирішити в порядку їх виконання сформульовано у вступі.

3.2. Розробка моделі об‘єкта досліджень

На рис.2.3, 2.5 і 2.6 показано 3D-модель станини і колони верстату Haas VF-2. Варто зазначити, що на його основі виготовляють гаму верстатів із розширеними технологічними можливостями, а саме:

- VF – 2YT – збільшене переміщення по осі Y;
- VF – 2SS – шпиндель із швидкістю обертання 12000 об/хв і збільшеним інструментальним магазином до 30 інструментів.

Тому проведені дослідження будуть актуальними і для модифікацій, адже використовується одна й та ж станина.

3.3. Зміст наукових досліджень з використанням елементів CAD, CAM, CAE систем

Спочатку ми досліджуємо основу без колони, а потім конструкцію загалом. Станину (рис.3.1) моделюємо як суцільну деталь без пустот і перегородок. У якості силових факторів задаємо сили створені вагою стола із заготовкою (0,01 МПа), які через напрямні діють на станину, крутний момент $M_{кр} = 135$ Нм, який діє на шпинделі, та сила з якою тисне колона $F = 11000$ Н. Вага колони попередньо складає майже 1100 кг, а станини 2497 кг.

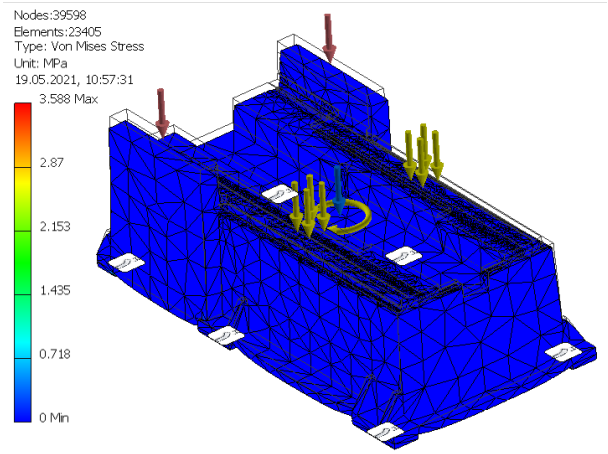


Рис.3.1. Сітчаста модель станини і напруження за фон Мізесом

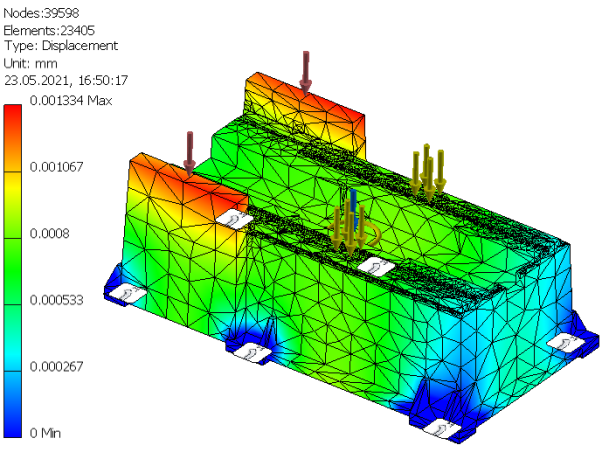


Рис. 3.2. Візуалізація прогину основи від прикладених сил

Після чого отримуємо результати моделювання. Сила реакції в опорах складає 35444,7 Н і реактивний момент 5440,85 Нм

Reaction Force and Moment on Constraints

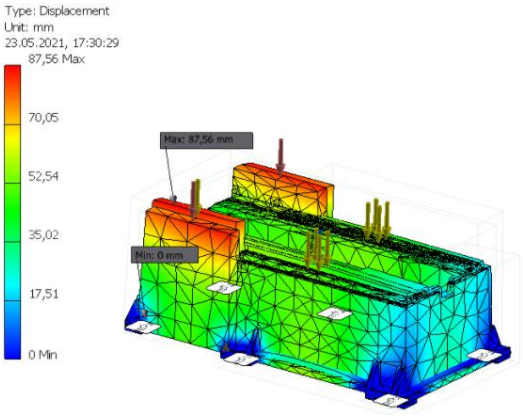
Constraint Name	Reaction Force		Reaction Moment	
	Magnitude	Component (X,Y,Z)	Magnitude	Component (X,Y,Z)
Fixed Constraint:1	35444,7 N	0 N	5440,85 N m	5439,17 N m
		116,841 N		0 N m
		35444,5 N		135,08 N m

Далі отримуємо сумарні результати по мінімальних та максимальних значеннях. Нас цікавить, як вже описували вище, дві величини це максимальне переміщення (Displacement), тобто прогин при мінімальній масі. В цьому

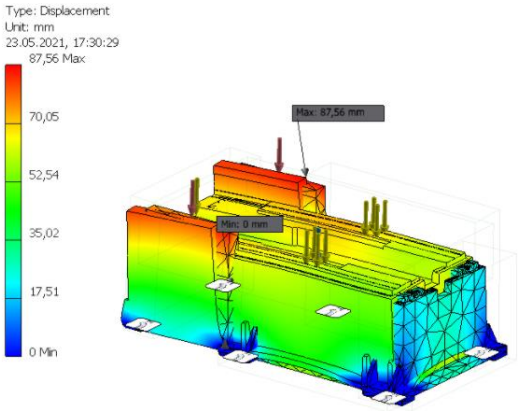
дослідженні показує 0,00133 мм. Це дуже хороший результат.

Name	Minimum	Maximum
Volume	349232000 mm^3	
Mass	2497,01 kg	
Von Mises Stress	0,000338208 MPa	3,58777 MPa
1st Principal Stress	-1,00639 MPa	1,13766 MPa
3rd Principal Stress	-3,90079 MPa	0,0579834 MPa
Displacement	0 mm	0,00133365 mm
Safety Factor	15 ul	15 ul
Stress XX	-1,39118 MPa	0,24841 MPa
Stress XY	-0,34371 MPa	0,330361 MPa
Stress XZ	-0,901269 MPa	0,921423 MPa
Stress YY	-1,55897 MPa	0,379419 MPa
Stress YZ	-2,03812 MPa	1,02867 MPa
Stress ZZ	-3,33666 MPa	0,33615 MPa
X Displacement	-0,000305255 mm	0,000333403 mm
Y Displacement	-0,000203843 mm	0,000164081 mm
Z Displacement	-0,00128755 mm	0,0000256127 mm
Equivalent Strain	0,0000000029804 ul	0,0000260431 ul
1st Principal Strain	-0,00000000635477 ul	0,0000178726 ul
3rd Principal Strain	-0,0000282823 ul	-0,00000000112597 ul
Strain XX	-0,00000500006 ul	0,0000028256 ul
Strain XY	-0,00000370807 ul	0,00000356406 ul
Strain XZ	-0,00000972324 ul	0,00000994066 ul
Strain YY	-0,00000664541 ul	0,00000342368 ul
Strain YZ	-0,0000219881 ul	0,0000110977 ul
Strain ZZ	-0,0000221963 ul	0,00000228554 ul

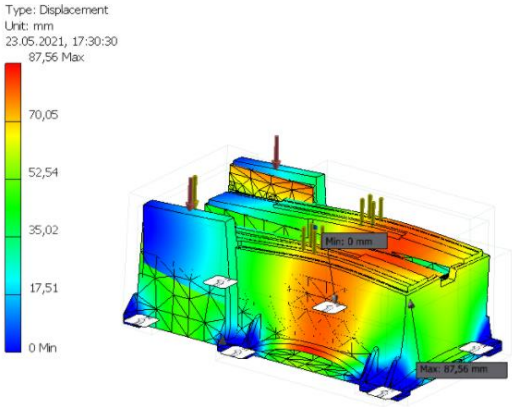
Після дослідження напружено-деформованого стану було проведено модальний аналіз. Цей аналіз дозволяє отримати власні частоти з якими вібрує деталь і форму коливань. На рис.3.3 показано відображення при певній частоті коливань.



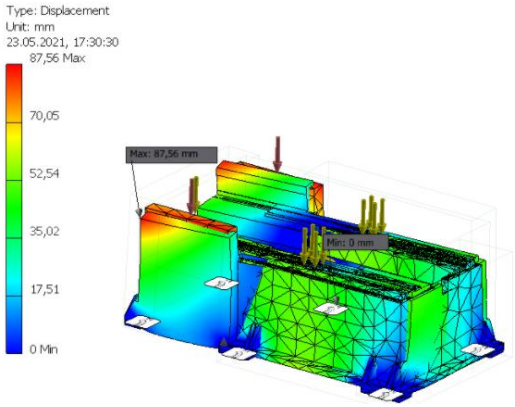
F1 566,30 Hz



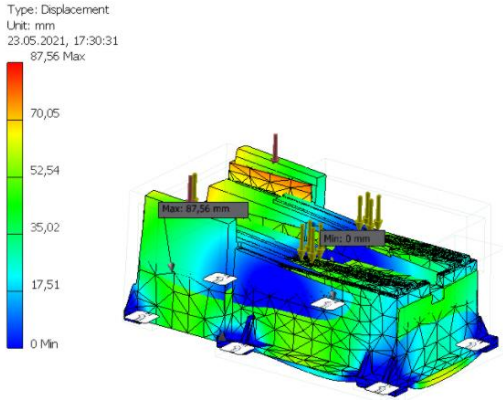
F2 573,50Hz



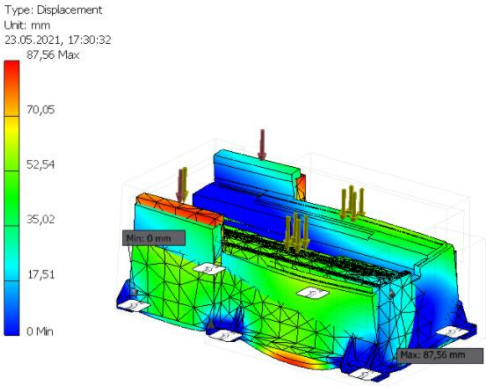
F3 324,62 Hz



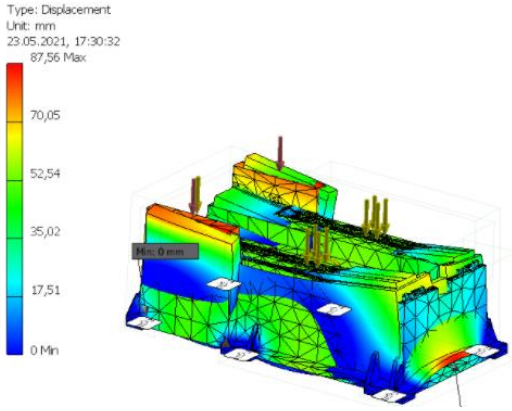
F4 701,23 Hz



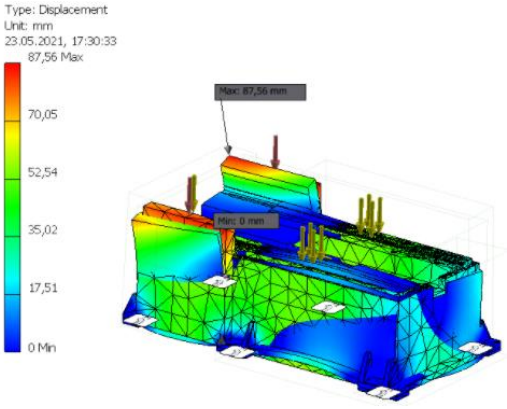
F5 797,93 Hz



F6 838,22 Hz



F7 1082,6 Hz



F8 1084,88 Hz

Рис.3.3 Власні частоти коливань

Модальний аналіз можна виконувати і без прикладення сил чи попереднього дослідження напружено-деформованого стану. Наступний крок це – дослідження зменшення маси. Спочатку ми вибираємо ті ділянки моделі, які не повинні змінюватися (рис.3.4). Це як правило приєднувальні поверхні, опори, площини для кріплення напрямних тощо. Задаємо умову зменшення маси на 20%.

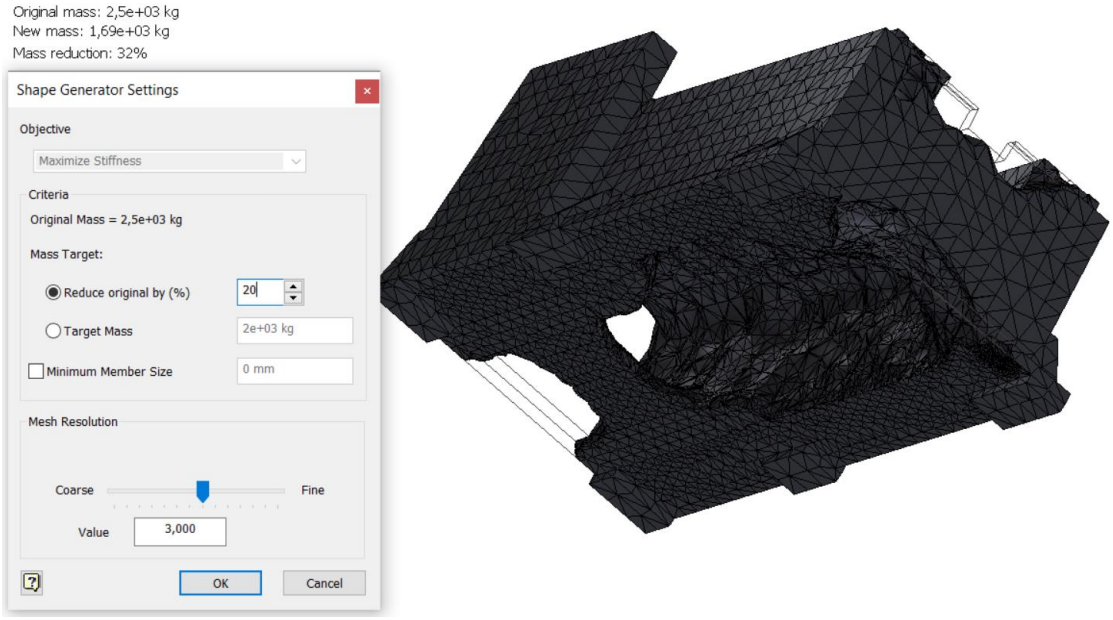


Рис.3.4. Зони ділянок, які можна видалити

Після певних маніпуляцій, ми видаляємо зайвий матеріал, потоншуємо стінки основи, проте додаємо ребра жорсткості. Після чого проводимо описану процедуру повторно.

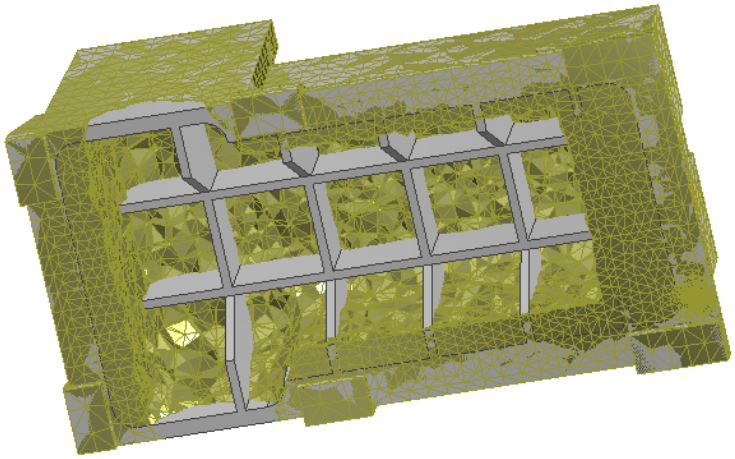


Рис.3.5. Відображення основи з ребрами жорсткості

У результаті використання модуля «Генератор форм» масу основи вдалося зменшити із майже 2500 кг до 880 кг (рис.3.6), що складає 35% початкової ваги. Фактично ми провели топологічну оптимізацію.

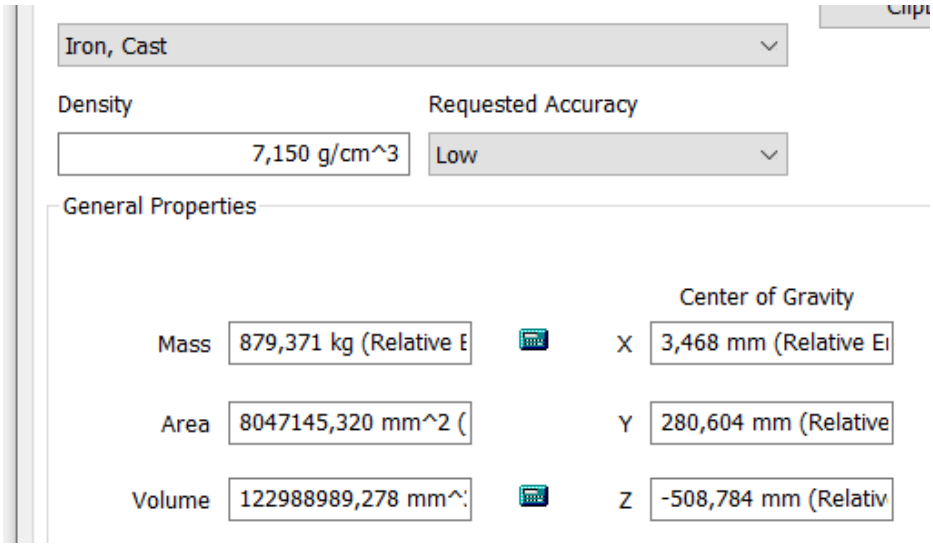


Рис.3.6. Фізичні властивості основи після топологічної оптимізації

Проводимо аналіз напружено-деформованого стану усієї станини – основи та колони.

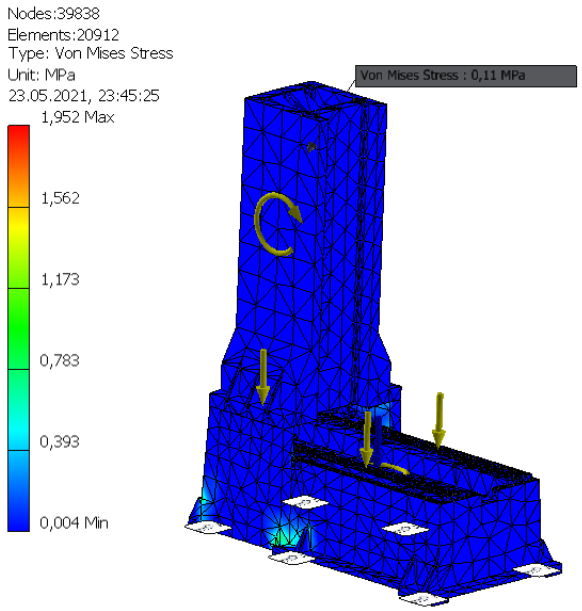


Рис.3.7. Прикладання силових факторів до усієї станини

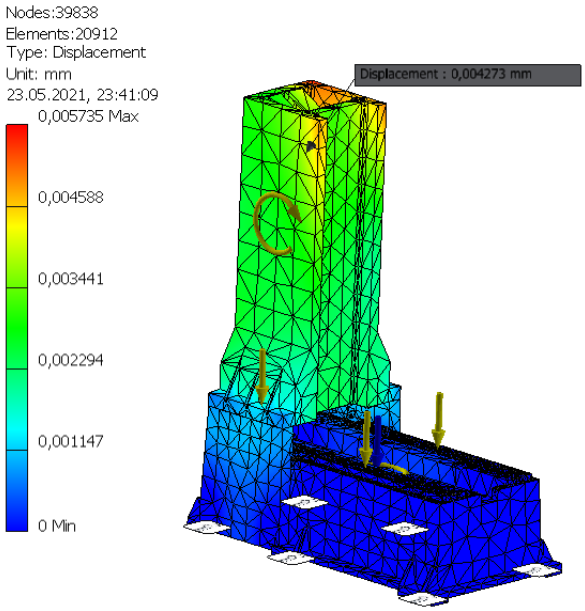


Рис.3.8. Візуалізація прогину станин від прикладених сил

До основи прикладено крутний момент 135 Нм, який надається шпинделю

верстату, і який може бути переданий на основу через деталь і стіл. Крутний момент на колоні складає 2000 Нм, що значно перевищує крутний момент, створений вагою шпиндельної головки. Прогин на вершині колони складає 0,0034 мм.

На рис. 3.9 показано модальний аналіз станини.

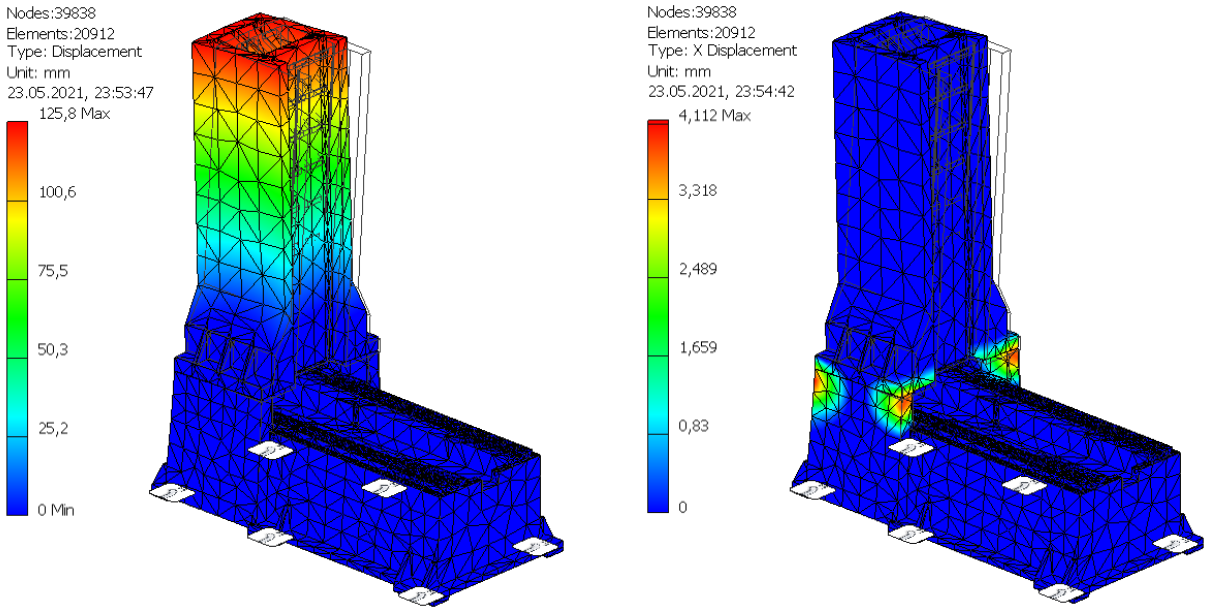


Рис. 3.9 Сумарний модальний аналіз станини та по координаті X

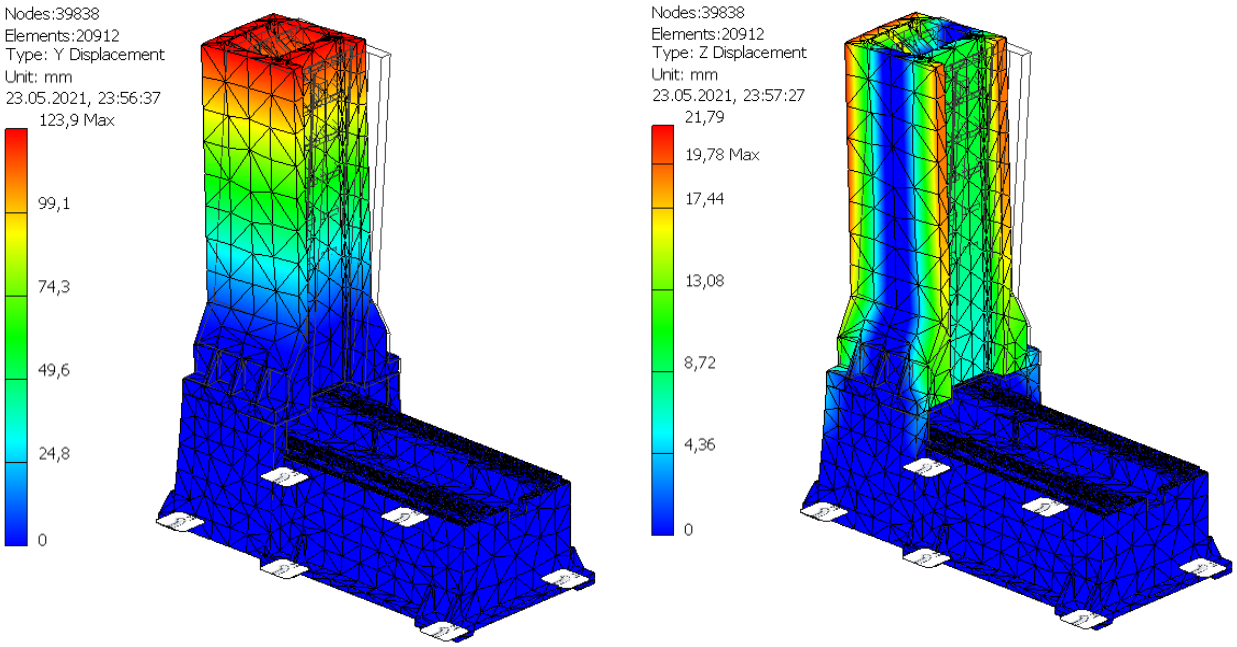
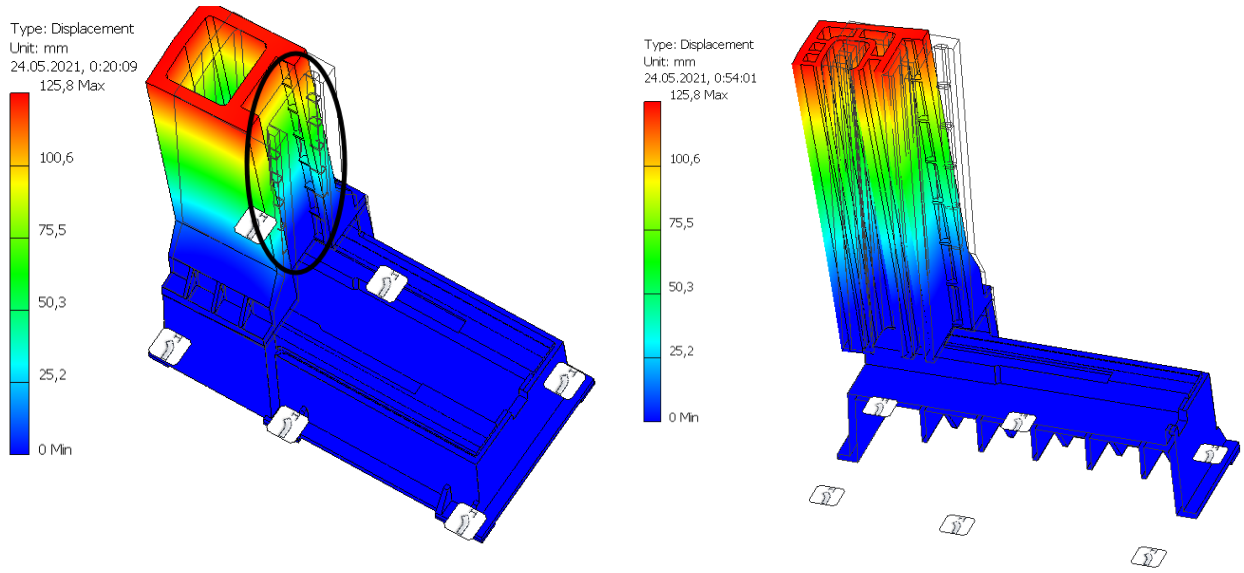


Рис. 3.10 Модальний аналіз станини по координаті Y і Z

Як видно з рис.3.9. при частоті 70,8 Гц відбувається резонанс, що дуже мало. Тому потрібно змінити деякі конструктивні елементи. Видалення

внутрішніх перегородок колони і додавання ребер жорсткості у місці кріплення напрямних до колони збільшили частоту внутрішніх коливань до 73,16 Гц (рис.3.11, а). На рис.3.11, б, задля збільшення жорсткості конструкції змінено форму і напрям перегородок паралельно осі колони. Як видно з моделювання форма перегородок не впливає на частоту коливань 70,71 Гц.



а) б)

Рис.3.11. Приклад колони без перегородок а) і з паралельними перегородками б)

3.4. Обговорення та аналіз отриманих результатів* (*оприлюднені результати досліджень подаються в додатках)

В процесі виконання магістерського дослідження і проведених інформаційно-патентних пошуків, які передбачали вивчення перспектив використання технологій генеративного проектування та можливості впровадження їх у виробництві деталей верстатів було опубліковано тези [36]:

Гагалюк А. В. Перспективність застосування SLM-деталей у верстатобудуванні / А. В. Гагалюк, І. Ю. Фесина, Т. Г. Зазуляк // Збірник тез доповідей IX Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених та студентів „Актуальні задачі сучасних технологій“, 25-26 листопада 2020 року. — Т. : ТНТУ, 2020. — Том 1. — С. 49–50. — (Сучасні технології в будівництві,

машино- та приладобудуванні).

3.5. Висновки за результатами наукового дослідження

На основі проведеного моделювання можна зробити наступні висновки та дати рекомендації.

1. Тривимірне моделювання таких об’єктів, як верстат для подальшого дослідження методом комп’ютерного моделювання із застосуванням сучасних алгоритмів це скоріше необхідність, яка значно пришвидшує і скорочує розрахунки;
2. Результати модального аналізу показали, що внутрішні частоти дуже важливі в роботі МРВ. Важливо працювати на дорезонансних частотах. Аналітично їх обчислити було б неможливим. А використання МСЕ для їх розрахунку вкотре підтверджує необхідність використання САПР в студентських наукових роботах;
3. Безконсольне компонування верстату підходить для оброблення важких деталей і вагою до 1500 кг, що особливо актуально в компонуванні верстатів з ЧПК.
4. Використання в дослідженнях модуля «Генератор форм» дозволили скоротити сумарну масу несучої частини верстата до 1800 кг. Без навісного обладнання. Аналог Haas VF-2 повністю в зборі важить 3539 кг. Зміна перегородок (рис.3.11, б) дозволили зменшити прогин колони до 0,0055 мм.

4. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

4.1. Охорона праці при роботі на металообробних верстатах.

Загальні вимоги безпеки, які ставляться до металообробного обладнання, визначені державним стандартом, а додаткові вимоги, викликані особливостями його конструкції та умовами експлуатації, описані в нормативно-технічній документації на верстати.

Захисні пристрої, які огороджують зону обробки, повинні захищати працівника від стружки і змащувально-охолоджувальної рідини (ЗОР). Конструкції захисних пристроїв не мають обмежувати технологічних можливостей верстата і викликати незручностей при роботі, прибиранні, налагодженні, а при відкриванні - не забруднювати підлогу відходами обробки. Кріплення захисних пристроїв повинно бути надійним і не допускати самовідкривання.

Автомати та напівавтомати обладнують автоматичним блокуванням, що не допускає включення робочого циклу при відкритому захисному кожусі, якщо це може призвести до травмування. Поверхні захисних кожухів, як і самих верстатів, органів управління, верстатних приладдя і пристосувань, не повинні мати гострих країв і задирок, які можуть травмувати працюючого.

В універсальних токарних і токарно-револьверних верстатах, призначених для обробки заготовок діаметром до 500 мм, час зупинки шпинделя з патроном (без закріпленої заготовки) після виключення не повинен перевищувати 5 с, а у верстатах для обробки заготовок діаметром до 630 мм – 10 с. Цей час для свердлильних верстатів не повинен перевищувати 3 с, для розточувальни верстатів – 6 с, для універсально-фрезерних – 5 с.

В зубообробних верстатах автоматичне вимкнення руху інструменту та елементів кінематичного ланцюга по закінченні циклу обробки заготовки має відбуватися за час не більше: для зубошевінгувальних, зубохонінгувальних і зубонакатних верстатів – 5 с; для зубошліфувальних верстатів, що працюють

конусним, профільним, абразивним кругом, – 30 с; для зубошліфувальних верстатів, що працюють черв'ячним кругом – 40 с.

Складальні одиниці і деталі масою більші за 16 кг повинні мати спеціальні пристрої у вигляді припливів, отворів, рим-болтів і т. д., призначені для безпечного підйому і переміщення їх під час монтажу, демонтажу та ремонту обладнання.

На верстатах або автоматичних лініях для установки заготовок масою більше 8 кг, а також інструментів та пристосувань масою більше 20 кг встановлюють підйомні пристрої індивідуального типу. Підйомний пристрій повинен утримувати вантаж в будь-якому положенні, навіть у разі несподіваного припинення подачі електроенергії, масла, повітря. Для установки заготовок масою більше 250 кг належить використовувати внутрішньо цехові підйомні засоби.

4.1.1. Додаткові вимоги безпеки.

Для токарних верстатів товщина матеріалу захисного пристрою збільшується не менш ніж у два рази при обробці заготовки зі швидкістю різання більш 5 м/с. Оглядові вікна в захисних пристроях (екранах) повинні виготовлятися з прозорого спеціального матеріалу в кілька шарів загальною товщиною не менше 10 мм.

Пруткові токарні автомати і пруткові револьверні верстати слід по всій довжині прутків оснащати огородженнями, що мають шумопоглинаючі пристрої.

Поздовжньо-стругальні верстати повинні мати гальмові й пружно-обмежувальні пристрої, що запобігають небезпеці при викиді столу, в разі виходу його із зачеплення з приводним елементом.

В абразивно-відрізних верстатах необхідно передбачати можливість приєднання до них індивідуальних відсмоктуючих пристроїв для видалення продуктів різання з робочої зони.

Шліфувальні верстати повинні мати підвищену надійність кріплення захисного кожуха, що забезпечує утримання його на місці в разі розриву круга. Круглошліфувальні верстати, що працюють зі швидкістю круга 60 м/с і вище, повинні мати зону обробки (звернену до працівника), повністю закриту захисним пристроєм. Захисний кожух і його оглядове вікно обладнуються відповідно до вимог до швидкісного різання.

Стрічкові пилки для різання металу огороджують так, щоб відкритою залишалася тільки робоча частина пилки. Огорожа огинає шківи, по яких проходить стрічка, при цьому шківи додатково огороджують з бічних сторін.

У верстатів стругального типу огороджуються зони руху стола або повзуна, що виходять за габарити верстата. Огородження може бути виконане у вигляді бар'єру або іншого пристрою, що перегороджує доступу працюючих в цю зону.

Для швидкохідних поздовжньо-стругальних верстатів обов'язкові гальмуючі і обмежуючі рух столу пристрої для запобігання викиду столу (платформи) при виході його з зачеплення. Механізми подачі, реверсивний механізм для зміни ходу, проміжки між стійками і столом огороджують щитами.

На верстатах свердлильного типу заготовок встановлюють і закріплюють в лещатах, кондукторах та інших пристосуваннях, надійно укріплених на столі або плиті верстата. Механізм кріплення патронів повинен забезпечувати надійний затиск і точне центрування інструменту. Автоматична лінія по механічній обробці виробів складається з окремих, взаємно пов'язаних верстатів-автоматів.

Управління автоматичною лінією здійснюється з центрального пульта, що забезпечує роботу у налагоджувальному і автоматичному режимах. При цьому система автоматичного управління повинна виключати можливість самоперекючення лінії з налагоджувального режиму на автоматичний. При роботі на налагоджувальному режимі всі верстати і агрегати автоматичної лінії мають самостійні органи управління для їх пуску і зупину.

Обов'язково повинні бути передбачені сигнальні пристрої про включення

лінії на налагоджувальний або автоматичний режим.

Необхідно також, щоб всі верстати і агрегати автоматичної лінії (як на автоматичному, так і на налагоджувальному режимах) щоб уникнути аварій, працювали в послідовності, встановленій технологічним процесом, і мали справну систему блокування для дотримання цієї послідовності. Рухомі частини верстатів, агрегатів та інших пристроїв автоматичної лінії, а також інструмент і оброблюваний виріб, огороджують надійними кожухами, що виключають можливість доступу робочого до небезпечної зони під час роботи лінії.

Видалення стружки від місця її утворення за межі автоматичної лінії повинно відбуватися автоматично, наприклад змив її рідиною, використання скребкових конвеєрів, вакуумних пристроїв і т. п.

Контроль виробів під час роботи лінії на автоматичному режимі повинен здійснюватися тільки за допомогою контрольних приладів на лінії.

4.2. Безпека в надзвичайних ситуаціях

4.2.1. Техногенні небезпеки

Техносферою називають середовище, яке містить технічні споруди на планеті Земля. Небезпечні ситуації техногенного характеру виникають в результаті виходу із ладу механізмів, що супроводжується порушенням виробничого процесу, вибухами, пожежами, радіоактивним і хімічним забрудненням чи біологічним забрудненням місцевості, які призводять до великих матеріальних втрат, ураження чи загибелі людей. Серед причин, що викликають НС, особливо слід виділити аварії і катастрофи [45].

Визначення аварії – це пошкодження, вихід із ладу машин і механізмів, раптова зупинка технологічного процесу, що створює загрозу для життя і здоров‘я людей і призводить до руйнування будівель, споруд, обладнання, завдає шкоди довкіллю. Аварії бувають таких видів:

- з витоком СДОР;
- з викидом р/а речовин у навколишнє середовище;
- пожежі та вибухи;
- аварії на транспорті та ін.

Особливо важкі аварії можуть призвести до катастроф. Катастрофа – це великомасштабна аварія, яка призводить до важких наслідків для людини, тваринного й рослинного світу, змінюючи умови середовища існування [45].

4.2.2. Аварії з викидом радіоактивних речовин у навколишнє середовище

Найнебезпечнішими за наслідками є аварії на АЕС з викидом в атмосферу р/а речовин, внаслідок яких має місце довгострокове забруднення місцевості на величезних площах, наприклад аварія на Чорнобильській АЕС, яка сталася 26 квітня 1986 року. За оцінками спеціалістів, відбулись викиди 50 мегакюрі небезпечних ізотопів і радіоактивних газів. Сумарне р/а забруднення еквівалентне випаданню р/а речовин від вибуху декількох десятків атомних бомб, які були скинуті на Хіросіму. Під р/а ураження потрапили території України, Білорусі та Росії, де зараз проживає 5 млн. осіб. З вини невдалого керівництва найбільше було забруднено територію України, а саме – 3,5 млн. га сільськогосподарських угідь, 1,167 млн. га лісів, 1687 населених пунктів. 30 травня 1986 р. усю територію р/а забруднення умовно поділили на 3 зони: 1. Зона відчуження з рівнем радіації більше 20 мР/год і річною дозою 40Р (бер). З неї проведено евакуацію населення; 2. Зона обов‘язкового відселення з рівнем радіації від 5 до 20 мР/год; 3. Зона добровільного відселення з рівнем радіації від 2 до 5 мР/год.

Крім цього, була зона посиленого радіаційного контролю і зона помірного радіаційного контролю. Враховуючи те, що після аварії на ЧАЕС в атмосферу було викинуто майже 450 різних радіонуклідів, багато з яких короткоживучі – ніобій–95; йод–131; стронцій–89 та ін., значну частину становив р/а йод–131 з

періодом піврозпаду 8,04 доби, котрий накопичується в щитовидній залозі. Цей радіонуклід на 50–70% створив небезпечну радіоактивність на ранній фазі аварії. За минулі десятиліття довгострокове опромінення малими дозами іонів за рахунок р/а речовин збільшило захворювання різних хвороб і щитовидної залози більше ніж 10 разів. Актуальним для жителів багатьох районів України є питання про виживання в умовах підвищеної радіації. [45].

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Проведено інформаційний пошук стосовно використання і впровадження сучасних методів проектування таких як топологічна оптимізація та генеративне проектування. Доведено, що ці способи є ефективними і металоощадливими, проте на даний час – енерговитратними. Використання в аеронавтиці, транспорті та архітектурі доводять їх перспективність впровадження в близькому майбутньому;
2. Проведений аналіз компонування фрезерного верстата і оптимізація його конструкції довела свою функціональність. Використовуючи модуль топологічної оптимізації в Inventor 2021 вдалося зменшити масу виробу до 1834 кг при достатній жорсткості станини.
3. Безконсольне компонування верстату підходить для оброблення важких деталей і вагою до 1500 кг, що особливо актуально в компонуванні верстатів з ЧПК.
4. Теоретичні розрахунки і комп’ютерне моделювання співпали з похибкою до 10%. Проведений аналіз напружено-деформованого стану показав максимальний прогин колони у верхній точці 0,0055 мм;
5. Моделювання колони фрезерного верстата показало, що ні перегородки, ні їх форма не суттєво впливають на жорсткість колони. Що підтверджено теоретичними та експериментальними дослідженнями.
6. Чавун досі залишається найпоширенішим матеріалом для виготовлення корпусних деталей, по при ефективне використання інших сучасних віброізолюючих матеріалів. Це можна пояснити вартістю і відпрацьованістю технології виготовлення.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Основні вузли горизонтально фрезерного. Схеми основних вузлів і технологічні можливості верстатів фрезерної групи. URL: https://kd43.ru/uk/business-plans/osnovnye-uzly-gorizontalno-frezernogo-shemy-osnovnyh-uzlov-i.html
2. Манжилевський О. Д. Точність та випробування верстатів. Конспект лекцій: URL: http://manzhilevskyy.vk.vntu.edu.ua/file/eaeb30da1b3438c05b5956e597e75bf0.pdf.
3. ДСТУ 3600-97 (ГОСТ 30527-97) «Верстати металорізальні. Методи перевірки точності оброблення зразка-виробу».
4. ДСТУ 3630-97 (ГОСТ 22267-76) – «Верстати металорізальні. Методи перевірки точності та постійності відпрацювання колової траєкторії».
5. ДСТУ ГОСТ 27843:2007 (ИСО 230-2:1997) «Випробування станків. Визначення точності та повторюваності позиціювання осей з числовим програмним керуванням».
6. Проектирование металлореущих станков и станочных систем: Спровочник-учебник. В 3-х т. Т2. ч.2 / А.С. Проников, Е.И. Борисов, В.В.Бушуев и др.; под общ. ред. А.С. Проникова. – М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана: Машиностроение, 1995. – 320 с.
7. Марголит Р.Б. Технология машиностроения : учебник для среднего профессионального образования / Р. Б. Марголит. - Москва: Издательство Юрайт, 2017. – 413 с.
8. Бочков В.М, Сілін Р.І., Гаврильченко О.В. Розрахунок та конструювання металорізальних верстатів: Підручник / За ред. Сіліна Р.І. – Львів: Видавництво «Бескид Біт», 2008. – 448 с.
9. Барт, В. Е. Применение полимербетонов в станкостроении / В.Е.Барт, Г.С.Санина, С.А.Шевчук // Технология, оборудование, организация и экономика машиностроительного производства.

Серия 6-3. Технология металлообрабатывающего производства. Обзорная информ., вып. 11. - М.: ВНИИТЭМР, 1985. -40 с.

10. Бионический дизайн — решение трудных технических задач с помощью природы - URL: https://can-touch.ru/blog/bionics-design/
11. Легкие конструкции с помощью генератора форм (autodesk netfabb) – URL: https://www.pointcad.ru/istorii-uspexa/legkie-konstrukczii-s-pomoshhyu-generatora-form-(porozhdayushhego-proektirovaniya)
12. Инновационные решения компании Altair Engineering и её партнеров в области аддитивных технологий (3D-печати) и аддитивного производства позволяют создавать сложные структуры и конструкции – URL: http://fea.ru/news/6000
13. Next Eurostar E3000 satellite to feature Airbus 3D printed aluminum parts – URL: https://www.3ders.org/articles/20150321-next-eurostar-e3000-satellite-to-feature-airbus-3d-printed-aluminum-parts.html
14. Why GM’s Electric Future Is Also an Additive Future. URL: https://www.additivemanufacturing.media/articles/why-gms-electric-future-is-also-an-additive-future
15. Генератор форм. URL: https://knowledge.autodesk.com/ru/support/inventor/learn-explore/caas/CloudHelp/cloudhelp/2020/RUS/Inventor-Help/files/GUID-D74F47F3-FE22-44EF-85BE-7C6B1F56DCF9-htm.html
16. What Generative Design Is and Why It's the Future of Manufacturing. URL: https://www.newequipment.com/research-and-development/article/22059780/what-generative-design-is-and-why-its-the-future-of-manufacturing
17. Think Generative Design Is Overhyped? These Examples Could Change Your Mind. URL: https://www.autodesk.com/redshift/generative-design-examples/
18. Li, Haibing & Lachmayer, Roland. (2018). Generative Design Approach

for Modeling Creative Designs. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 408. 012035. 10.1088/1757-899X/408/1/012035.

19. Elie Daher & Sylvain Kubicki & Annie Guerriero, 2017. Data-driven development in the smart city: Generative design for refugee camps in Luxembourg. Entrepreneurship and Sustainability Issues, VsI Entrepreneurship and Sustainability Center, vol. 4(3), pages 364-379, March.
20. Врагов Ю.Д. Анализ компоновок металлорежущих станков: (Основы компонетики). – М.: Машиностроение, 1978. – 208 с.
21. Металлорежущие станки: Учебник для нач. проф. образования / Б.И.Черпаков, Т.А.Альперович. – М.: Издательский центр «Академия», 2003. – 368 с.
22. Металлорежущие станки / под ред. В.Э.Пуша. – М.: Машиностроение, 1986. – 575 с.
23. Ковальов В.Д. Натурні випробування крутної жорсткості станин важких токарних верстатів / В.Д. Ковальов, Я.С. Антоненко, Б.Ю. Виганяйло // Вісник Нац. техн. ун-ту «ХПІ»: зб. наук. пр. Сер.: Технології в машинобудуванні = Bulletin of the National Technical University «KhPI» : coll. works. Ser.: Techniques in a machine industry. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 26 (1248). – С. 94-98.
24. Методические указания к выполнению контрольной работы и экзамена по дисциплине «Конструирование и расчет станков и станочных комплексов» для студентов заочного отделения специальности 6.050.503 / Сост.: В.Д.Ковалев, М.В. Шаповалов – Краматорск: ДГМА, 2012.- 38 с.
25. Ачеркан Н.С и др. Металлорежущие станки. В двух томах. Т1. М.: «Машиностроение», 1965. – 764 с.
26. Ачеркан Н.С и др. Металлорежущие станки. В двух томах. Т2. М.: «Машиностроение», 1965. – 629 с.
27. Кирилин, Ю.В. Применение полимербетона для изготовления

базовых деталей тяжелых фрезерных станков / Ю.В. Кирилин // Технология машиностроения. – 2007. - №12. – С. 32-35.

28. Кирилин, Ю. В. Методика моделирования несущей системы станка / Ю.В.Кирилин, В. И. Табаков, И. В. Еремин// СТИН. - 2004. - № 6. - С. 13-17.
29. Грановский Г.И. Кинематика резания. – М.: Машгиз, 1948. – 200 с.
30. Радкевич Я. М., Тимирязев В. А., Схиртладзе А. Г., Островский М. С. Расчет припусков и межпереходных размеров в машиностроении: Учеб. пособие для машиностроит. спец. вузов – М.: Высш. шк., 2004 – 272 с.
31. К.Ф. Антипов, Б.И. Горбунов, С.Н. Калашников и др./ Под ред. А.Г. Косіловой и Р.К. Мещерякова. Справочник технолога-машиностроителя. Т1/. Изд. 3-е М.: Машиностроение, 1972. 694 с.
32. Кочергин А.И. Конструирование и расчет металлорежущих станков и станочных комплексов. Курсовое проектирование. Учеб. пособие для вузов — Мн,: Выш, шк., 1991. – 382 с.
33. Кузнецов В.Т. Приводы станков с программным управлением. – М.: Машиностроение, 1983. – 217с.
34. Шанайда В.В. Пакет MathCAD в інженерних розрахунках / В.В.Шанайда. Тернопіль: Видавництво ТДТУ, 2001. − 163 с.
35. Гагалюк А.В. Дослідження навантажувальної здатності несучої системи токарного верстата аналітичним методом / Гагалюк А.В., Духнич Ю.П., Дерлиця К.А. // Актуальні задачі сучасних технологій: зб. тез доповідей міжнар. наук.-техн. конф. молодих учених та студентів, (Тернопіль, 27–28 листоп. 2019.) – Тернопіль: ТНТУ, 2019. С.59 – 60.
36. Гагалюк А. В. Перспективність застосування SLM-деталей у верстатобудуванні / А. В. Гагалюк, І. Ю. Фесина, Т. Г. Зазуляк // Збірник тез доповідей IX Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених та студентів „Актуальні задачі

сучасних технологій“, 25-26 листопада 2020 року. — Т. : ТНТУ, 2020. — Том 1. — С. 49–50. — (Сучасні технології в будівництві, машино- та приладобудуванні).

37. Конструкции и расчет направляющих металлорежущих станков: учеб. пособие / В. Г. Гусев [и др.] ; Владим. гос. ун-т. – Владимир: Изд-во Владим. гос. унта, 2011. – 96 с.
38. Кривий П.Д. Трудомісткість конструювання та виготовлення металорізальних і деревообробних верстатів: Навчальний посібник/ Кривий П.Д., Шарик М.В., Сотник І.П. – Тернопіль: ТДТУ, 2005. – 128 с.
39. Никитина И.П. Моделирование несущей системы станка с использованием 3D-принтера Dimension Elite / Никитина И.П. Романенко К.С., Сердюк А.И., Поляков А.Н. – Оренбург: БИБКОМ, 2013. – 140 с.
40. Атаманчук П.С., Мендерецький В.В., Панчук О.П., Чорна О.Г. Інтегрований курс безпеки життєдіяльності (теоретичні основи): Навч. посіб. - Кам'янець-Подільський: Буйницький О .А. ,2009 . - 200 с .
41. Атаманчук П.С., Мендерецький В.В., Панчук О.П., Чорна О.Г. Безпека життєдіяльності та охорона праці (Практичний курс): Навчальний посібник . - Кам'янець-Подільський: "Думка", 2010 - 152 с
42. Безпека життєдіяльності . Лабораторно-практичні заняття: Навч посібник для студентів вищих педагогічних навчальних закладів /За ред . С . П . Величка . - Кіровоград: КДПУ ім . В Винниченка, 2004 - 140 с.
43. Толок А.О. Крюковська О.А. Безпека життєдіяльності: Навч. посібник. –2011. – 215 с.
44. Голубець М А., Кучерявий В.П., Генсірук С.А. та ін. Конспект лекцій з курсу «Екологія та охорона природи» (теоретичні основи загальної

екології, охорони природи, комплекс природоохоронних заходів). — К.: УМКВО, 1990. — 216 с.

45. Безпека життєдіяльності та основи охорони праці: Навчально-методичний комплекс для підготовки спеціалістів ступеня «бакалавр» III-IVрівнів акредитації для всіх напрямків підготовки / М.М.Сакун, І.В.Москалюк, В.Ф.Нагорнюк; за редакцією Сакуна М.М. – Одеса: Видавництво, 2017. – 400 с.

ДОДАТКИ

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя (Україна)
Національна академія наук України
Університет імені П'єра і Марії Кюрі (Франція)
Маріборский університет (Словения)
Технічний університет у Кошице (Словаччина)
Вільнюський технічний університет ім. Гедимінаса (Литва)
Шяуляйська державна колегія (Литва)
Жешувський політехнічний університет ім. Лукасевича (Польща)
Білоруський національний технічний університет (Республіка Білорусь)
Міжнародний університет цивільної авіації (Марокко)
Національний університет біоресурсів і природокористування України (Україна)
Наукове товариство ім. Шевченка
ГО «Асоціація випускників Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя»

АКТУАЛЬНІ ЗАДАЧІ СУЧАСНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Збірник

тез доповідей

Том І

IX Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених та студентів

25-26 листопада 2020 року

УКРАЇНА
ТЕРНОПІЛЬ – 2020

УДК 621.7

А. В. Гагалюк, канд. техн. наук, І. Ю.Фесина, Т. Г. Зазуляк
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Україна

ПЕРСПЕКТИВНІСТЬ ЗАСТОСУВАННЯ SLM – ДЕТАЛЕЙ У ВЕРСТАТОБУДУВАННІ

A. V. Gagalyuk, Ph.D, Sen. Lecturer, I. Yu. Fesyna, T. G. Zazulyak

PERSPECTIVITY OF APPLICATION OF SLM – PARTS IN MACHINE TOOL CONSTRUCTION.

Верстатобудування є достатньо консервативною галуззю виробництва. Впровадження новітніх або експериментальних технологій не завжди доцільне, а іноді вкрай необхідне. Інертність до впровадження новітніх технологій щодо виготовлення самих верстатів пов'язана з високою вартістю та трудомісткістю виробництва. Разом з тим верстатобудування є також і достатньо металомістким виробництвом. Історично так склалося, що всі передові технології в інші галузі виробництва приходять з аерокосмічної галузі. Не виключенням є SLM (Selective laser melting).

Це метод лазерного пошарового спікання порошку по попередньо створених 3D моделях. Суть його полягає в тому, що з 3D моделі деталі за допомогою алгоритму створюються поперечні січення з кроком 2 мкм і лазер спікає порошок. Таким чином ми отримуємо наплавлену модель. По суті це є друкування деталі. У якості порошку донедавна використовували INCONEL 718. Це жароміцний, корозійностійкий сплав на основі нікелю, хрому, молібдену. Сімейство цих сплавів використовують в аерокосмічній галузі. Оскільки сплав зберігає міцність в широкому проміжку температур, тому його використовують там де сталь і алюміній не підходять. Проте він має і недоліки, а саме схильний до наклепу при механічному обробленні, а щодо зварювання INCONEL 718 джерела суперечать одне одному. В дослідженнях українського вченого [1] описано характеристики дослідних зразків з цього сплаву. Німецька компанія APWORKS (група Airbus) запатентувала порошок Scalmalloy – це алюмінієво (Al) – магнієво (Mg) – скандієвий (Sc) порошок з унікальною мікроструктурою, міцністю та пластичністю, який можна використовувати на всіх SLM – машинах. Scalmalloy має дуже добру зварюваність, корозійна стійкість, низький коефіцієнт теплового розширення, стійку мікроструктура при високих температурах до 250°C, відмінні характеристики для звичайного процесу обробки тощо. Його також використовують в аерокосмічній галузі, зокрема для друкування перегородки салону літака Airbus 380 (співпраця з Autodesk) та кронштейна супутника Eurostar 3000. У табл. 1 наведено характеристики Scalmalloy порівняно з аналогічними матеріалами.

Таблиця 1. Порівняльні характеристики матеріалів

	AlSi10Mg	Scalmalloy	Ti6Al4V	СЧ30
Границя текучості, $\sigma_{0,2}$, МПа	230	470	1020	240
Границя розтягу, МПа	350	520	1070	100-350
Питома міцність, МПа	131	195	243	
Видовження при розриві (%)	6	13	14	9,6
Твердість по Віккерсу	119	180	320	~243
Густина, г/см^3	2,67	2,67	4,41	7

В таблиці 1 наведено характеристики чавуну СЧ30 – основного матеріалу для виготовлення станин та інших несучих частин верстатів. За своїми характеристиками чавун є крихким, а не пластичним матеріалом, тому порівняння може здатися недоречним. Проте є певні властивості наведених сплавів, які майже відповідають

чавуну.

Компанія Directed Manufacturing виготовила (2013 р.) і випробувала інжектор ракетного двигуна (РД). Ця подія мала вагоме значення в галузі SLM, оскільки це був найбільший 3D-друкований компонент РД (табл.2), що складався з двох частин, в той час як схожі інжектори складалися з 115 деталей, причому витримав збільшення тяги в 10 разів.

Таблиця 2. Порівняльні характеристики виготовлення ракетного інжектора

Параметри	3-D друк методом SLM	Традиційні способи обробки
Термін виготовлення деталі	3 тижні (з них 40 годин на виготовлення)	6 місяців
кількість компонентів деталі	1 частина	4 частини
Кількість спаяних (зварних) з'єднань	0	5 спайок
Вартість деталі	$5 тис.	$10 тис.

З 2011 року наукові розробки багатьох металознавців спрямовані на виготовлення порошків, а кількість їх виробників у 2017 році складала 32, а полімерних – 23. За даними [2] 2012-2013 років зафіксовано зростання попиту SLM обладнання на 76%, а в щорічній доповіді компанії Gartner за даними 2016 року ринок складав $13,2 млрд. на основі якого було зроблено прогноз на 2020 рік щодо збільшення ринку 3D – друку до $29 млрд. Загалом щорічний приріст склав 22,3%. Згідно статистики [3] IDC Worldwide Semiannual 3D Printing Spending Guide в 2016 році максимальний дохід від застосування припав на автомобілебудування - $3,9 млрд. і авіакосмос - $2,4 млрд.

Очевидно, що дана технологія створює нові перспективні можливості для виготовлення деталей, проте SLM машини не замінять використання верстатного обладнання. Принаймні в найближчому майбутньому. Навіть у деталях виготовлених наплавленням є поверхні, яким необхідно забезпечити відповідну шорсткість, що можна виконати лише на металорізальних верстатах. Проте у розрізі співвідношення «маса деталі – міцність», SLM метод, на сьогодні є найкращим з досягнень.

Цілком реально, що SLM метод міг би мати майбутнє у виготовленні верстатів, що могло б забезпечити зменшення ваги, навіть до 20%. Проте головною характеристикою верстата є точність, яка залежить від багатьох факторів, зокрема від вібрацій. Тому основним матеріалом для виготовлення несучих частин верстатів залишається чавун, який попри свою вагу добре гасить вібрації та коливання. Враховуючи, що життєвий цикл металообробного обладнання складає 20 років [3], то в класичній компоновці верстатів найближчим часом нічого не зміниться, адже виготовлення комплектуючих методом спікання є невиправдано дорогими, допоки SLM принтери не стануть доступнішими.

Література

1. Чумаков Д.М. Перспективы использования аддитивных технологий при создании авиационной и ракетно-космической техники. *Труды МАИ.* 2014. № 78. URL: http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=53682

2. Аджамский С. В. Реализация SLM - технологии для изготовления образцов из жаропрочного сплава INCONEL 718, применяемого в авиационно-космической технике. *Авиационно-космическая техника и технология.* 2019. № 2. С. 69–75. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/aktit_2019_2_11.

3. Н.М.Максимов. Мировой рынок аддитивных технологий. *Аддитивные технологи*. – 2017. №2. С. 16 – 23. URL: https://additiv-tech.ru/publications/mirovoy-rynok-additivnyh-tehnologiy.html

СЕКЦІЯ: СУЧАСНІ ТЕХНОЛОГІЇ В БУДІВНИЦТВІ, МАШИНО- ТА ПРИЛАДОБУДУВАННІ

1. **Ю. О. Апостол, Я. Ю. Гарник, Д. О. Деркач, С.В. Попович** 35
S-МОДЕЛЬ ДЛЯ ОЦІНКИ ПОХИБОК ВИМІРЮВАННЯ ДОВЖИНИ КАБЕЛЮ ЧЕРЕЗ НЕРІВНОМІРНЕ ПРОКРУЧУВАННЯ ВАЛА

2. **А.В. Бабій, О.В. Січкоріз; М.В. Вовк** 37
ДОСЛІДЖЕННЯ СПОСОБУ ПІДВИЩЕННЯ МАНЕВРЕНОСТІ МАШИНИ ДЛЯ ХІМІЧНОГО ЗАХИСТУ

3. **В.В. Батюк, М.О. Стрембіцький** 39
АДАПТИВНА СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ДЛЯ МЕХАТРОННИХ СИСТЕМ

4. **Є.Б. Береженко** 40
РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ГИЧКОЗБИРАЛЬНОГО МОДУЛЯ

5. **І.Р Брикайло, Т.Т.Бартош, В.М.Матвіїшин, Т.С. Дубиняк** 42
НАДІЙНІСТЬ ТА ТЕХНІЧНА ДІАГНОСТИКА ВІДМОВ ЕЛЕКТРОННОЇ АПАРАТУРИ, ЩО МАЮТЬ ВИПАДКОВИЙ ХАРАКТЕР

6. **О.С. Брощак, В.Р. Медвідь, І.Р. Козбур** 44
АВТОМАТИЗАЦІЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ЗГУЩЕННЯ ТОМАТНОЇ ПАСТИ НА БАЗІ УСТАНОВКИ ВАКУУМНОГО ВИПАРОВУВАННЯ

7. **В.В. Бухта, Г.М. Крамар** 45
ОСОБЛИВОСТІ ПРОЕКТУВАННЯ СЕЙСМОСТІЙКИХ СТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ

8. **В.Н. Волошин, С.С. Корніцький** 46
ПОРІВНЯЛЬНИЙ ДИНАМІЧНИЙ АНАЛІЗ ШПИНДЕЛЬНОГО ВУЗЛА ТОКАРНОГО ВЕРСТАТА З ЧПК ПРИ РІЗНИХ СПОСОБАХ ЗАТИСКУ ЗАГОТОВКИ

9. **Д. В. Гаврилюк, В. В. Моліцький** 48
ДОСЛІДЖЕННЯ АДАПТИВНИХ СИСТЕМ КОНТРОЛЮ ПРОЦЕСУ ФРЕЗЕРУВАННЯ

10. **А. В. Гагалюк, І. Ю.Фесина, Т. Г. Зазуляк** 49
ПЕРСПЕКТИВНІСТЬ ЗАСТОСУВАННЯ SLM – ДЕТАЛЕЙ У ВЕРСТАТОБУДУВАННІ

11. **К.А. Грабовська** 51
ПТИМІЗАЦІЯ КОНСТРУКЦІЇ ВЕНТИЛЬОВАНИХ ФАСАДІВ ШЛЯХОМ АНАЛІЗУ ВПЛИВУ ТЕРМІЧНОГО МОСТА НА ВЕНТИЛЬОВАНІ ФАСАДИ