

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»  
МЕХАНІКО-МАШИНОБУДІВНИЙ ІНСТИТУТ  
КАФЕДРА КОНСТРУЮВАННЯ МАШИН

«На правах рукопису»

УДК \_\_\_\_\_

До захисту допущено

В.о. завідувача кафедри

\_\_\_\_\_ Олександр ОХРИМЕНКО

(підпис)

(ініціали, прізвище)

“ \_\_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2020 р.

## Магістерська дисертація

на здобуття ступеня магістра  
зі спеціальності 131 Прикладна механіка

на тему Розробка механізованих модулів технологічного оснащення для  
обробки і випробування композиційних матеріалів

Виконав (-ла): студент (-ка) \_\_\_\_\_ ІІ курсу , групи МВ – 81мн

\_\_\_\_\_ Басов Дмитрій Віталійович

\_\_\_\_\_ (прізвище ім'я по батькові)

\_\_\_\_\_ (підпис)

Науковий керівник \_\_\_\_\_ д.т.н., проф, Саленко О.Ф.

\_\_\_\_\_ (посада, науковий ступінь тавчене звання, прізвище, ініціали)

\_\_\_\_\_ (підпис)

Консультант з розділу \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_ (посада, науковий ступінь тавчене звання, прізвище, ініціали)

\_\_\_\_\_ (підпис)

Рецензент:

\_\_\_\_\_ (посада, наукова ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

\_\_\_\_\_ (підпис)

Засвідчую, що у цій магістерській дисертації  
немає запозичень з праць інших авторів без  
відповідних посилань.

Студент \_\_\_\_\_

(підпис)

Київ - 2020

**Національний технічний університет України**  
**“Київський політехнічний інститут**  
**ім. Ігоря Сікорського”**  
**Механіко-машинобудівний інститут**  
**Кафедра конструювання верстатів та машин**

Рівень вищої освіти другий (магістерський) за освітньо-науковою програмою

Спеціальність 131 Прикладна механіка

Спеціалізація «Технології комп'ютерного проектування верстатів, роботів і машин»

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

В.о. завідувача кафедри

\_\_\_\_\_ О.В. Шевченко

(підпис)

(ініціали, прізвище)

“    ”    \_\_\_\_\_ 2019 р.

**З А В Д А Н Н Я**  
**НА МАГІСТЕРСЬКУ ДИСЕРТАЦІЮ СТУДЕНТУ**

\_\_\_\_\_ Басову Дмитрію Віталійовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема дисертації Розробка механізованих модулів технологічного оснащення для обробки і випробовування композиційних матеріалів

науковий керівник дисертації Саленко О. Ф., дтн. професор

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

затверджені наказом по університету від “04” березня 2020 року № 800-с

2. Термін подання студентом дисертації \_\_\_\_\_

3. Об'єкт дослідження: розробка конструкції механізованого модулю для обробки та випробування композиційних матеріалів

4. Предмет дослідження: механізований модуль технологічного оснащення для обробки та випробування композиційних матеріалів

5. Перелік завдань, які потрібно розробити: огляд принципів обробки та випробовування композиційних матеріалів, опрацювання технічних рішень, заданих вузлів механізованого модулю; динамічне моделювання та розрахунок напружено-деформованого стану несучих вузлів.

6. Орієнтовний перелік графічного (ілюстративного) матеріалу 1) Загальний вигляд механізованого модулю; 2) Збиральний кресленик хрестового столу модулю; 3) Збиральний кресленик пристрою для виготовлення дослідних кільцевих зразків; 4) Деталювання пристрою для виготовлення кільцевих зразків; 5) Моделювання напружено-деформованого стану; 6) моделювання динамічних навантажень; 7) розсіювання температурних полів у оброблюваному тілі
7. Орієнтовний перелік публікацій \_\_\_\_\_
8. Консультанти розділів проекту \_\_\_\_\_

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

9. Дата видачі завдання \_\_\_\_\_

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Строк виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Огляд сфер використання композитних матеріалів	2.09 – 13.09	
2	Огляд методів та обладнання для обробки та випробування композитних матеріалів	16.09 – 27.09	
3	Розробка кінематичної схеми механізованого модулю	30.09 – 19.10	
4	Розрахунок та вибір параметрів приводів модулю	21.10 – 18.01	
5	Розробка конструкції механізованого модулю. Створення 3D-моделі для наступних досліджень приводних вузлів.	20.01 – 13.03	
6	Проведення досліджень приводів механізованого модулю	16.03 – 20.04	
7	Оформлення креслень і ПЗ	11.05 – 15.05	

Студент \_\_\_\_\_ Басов Д.В.  
( підпис ) (прізвище та ініціали)

Науковий керівник дисертації \_\_\_\_\_ д.т.н., проф. Саленко О.Ф.

## РЕФЕРАТ

**Структура і обсяг роботи.** Дисертація складається з вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Робота містить 82 сторінки, 65 рисунків 12 таблиць і списку літератури з 39 джерел.

**Актуальність теми.** Сучасні композитні матеріали потребують принципово нових підходів до питань ефективного їх оброблення. Незважаючи на можливості формування властивостей на етапі створення структури композиту, потреба в кінцевій обробці, а також у визначенні фізико-механічних властивостей наразі є надзвичайно актуальною. Однак ефективне оброблення матеріалів можливе не тільки за рахунок відповідного інструментального забезпечення, а й за рахунок допоміжних пристроїв, до яких належать пристрої: мікро переміщень, фіксації та орієнтації оброблюваної заготовки. Тож зазначена тема є актуальною.

**Мета і задачі дослідження.** Метою даної роботи є розробка механізованого модулю технологічного оснащення для обробки та випробовування композиційних матеріалів. Використання модульного оснащення є універсальним і може бути використаним разом з різноманітним обладнанням.

Для досягнення поставленої мети було вирішено наступні задачі:

1. Огляд наявного обладнання для обробки та випробовування композиційних матеріалів.
2. Планування експериментальних досліджень
3. Розробка кінематичної схеми, конструкції та складального креслення механізованого модулю.
4. Розробка конструкції хрестового столу, та пристрою для виготовлення дослідних кільцевих зразків з композитної труби.
5. Моделювання динаміки та напружено-деформованого стану вузлів розробленого модулю.



**Практичне значення результатів дослідження.** Представлено конструкцію механізованого модулю технологічного оснащення для обробки та випробовування композиційних матеріалів, з достатньою точністю та універсальністю.

**Ключові слова:** композиційні матеріали, механізований модуль, струминно-лазерна обробка, гібридна обробка, обробка композиційних матеріалів.

## ABSTRACT

**Structure and scope of work.** The dissertation consists of an introduction, three chapters, conclusions, a list of sources used. The work contains 82 pages, 65 figures and 12 tables, a list of literature from 39 sources.

**Relevance of a subject.** Modern composite materials require fundamentally new approaches to their effective processing. Despite the ability to form properties during the composite structure phase, the need for final processing as well as the determination of physical and mechanical properties is now extremely urgent. However, efficient processing of materials is possible not only by means of appropriate tools, but also by means of auxiliary devices, which include devices such as micro movements, fixation and orientation of the workpiece to be processed. Therefore, this topic is relevant.

**Purpose and objectives of the study.** The purpose of this work is to develop a mechanized tool module for processing and testing composite materials. The use of modular equipment is versatile and can be used together with a variety of equipment.

To achieve this goal, the following objectives have been done:

1. Overview of existing composite processing and testing equipment.
  2. Planning of pilot studies
  3. Development of kinematic diagram, design and assembly drawing of mechanized module.
  4. Development of a cross table design, and a device for making test ring samples from a composite pipe.
  5. Simulation of dynamics and stress-strain state of units of the developed module.
1. Overview of possible options for diagnostics of the state of metal cutting machines, determination of possible ways to reduce vibration acoustic activity of machines.

**The Practical significance of the study results.** The design of the power-driven equipment for processing and testing of composite materials with sufficient accuracy and versatility is presented.

**Key words:** composite materials, mechanized module, jet-laser treatment, hybrid treatment, processing of composite materials.

## РЕФЕРАТ

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка использованных источников. Работа содержит 82 страницы, 65 рисунков и 12 таблиц, список литературы из 39 источников.

**Актуальность темы.** Современные композитные материалы требуют принципиально новых подходов к вопросам эффективного их обработки. Несмотря на возможности формирования свойств на этапе создания структуры композита, потребность в конечной обработке, а также в определении физико-механических свойств в настоящее время является чрезвычайно актуальной. Однако эффективное обработки материалов возможно не только за счет соответствующего инструментального обеспечения, но и за счет вспомогательных устройств, к которым относятся устройства: микроперемещений, фиксации и ориентации обрабатываемой заготовки. Поэтому данная тема является актуальной.

**Цель и задачи исследования.** Целью данной работы является разработка механизированного модуля технологической оснастки для обработки и испытания композиционных материалов. Использование модульного оснащения является универсальным и может быть использован вместе с разнообразным оборудованием.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

1. Обзор имеющегося оборудования для обработки и испытания композиционных материалов.
2. Планирование экспериментальных исследований
3. . Разработка кинематической схемы, конструкции и сборочного чертежа механизированного модуля.
4. Разработка конструкции крестового стола, и устройства для изготовления опытных кольцевых образцов из композитной трубы.

5. Моделирование динамики и напряженно-деформированного состояния узлов разработанного модуля.

**Практическое значение результатов исследования.** Представленная конструкция механизированного модуля технологической оснастки для обработки и испытания композиционных материалов, с достаточной точностью и универсальностью.

Ключевые слова: композиционные материалы, механизированный модуль, струйно-лазерная обработка, гибридная обработка, обработка композиционных материалов.

## **ЗМІСТ**

<b>ВСТУП.....</b>	<b>3</b>
<b>1. Композиційні матеріали. Властивості композиційних матеріалів та їх використання у машинобудуванні. ....</b>	<b>4</b>
<b>1.1. Види композиційних матеріалів .....</b>	<b>4</b>
<b>1.2. Застосування композиційних матеріалів .....</b>	<b>9</b>
<b>1.3. Методи обробки композиційних матеріалів. ....</b>	<b>15</b>
<b>1.4. Обладнання для обробки та випробувань композиційних матеріалів ....</b>	<b>20</b>
<b>Висновки до розділу .....</b>	<b>30</b>
<b>2. Будова механізованого модулю для обробки та випробовування композиційних матеріалів. ....</b>	<b>31</b>
<b>2.1. Обґрунтування вибраної компоновки механізованого модулю .....</b>	<b>31</b>
<b>2.2. Принципова схема механізованого модулю технологічного оснащення для обробки та випробовування композиційних матеріалів .....</b>	<b>33</b>
<b>2.3. Розрахунок приводу переміщення робочого столу. ....</b>	<b>35</b>
<b>2.3.1. Розрахунок крокового двигуна.....</b>	<b>35</b>
<b>2.3.2. Розрахунок приводу робочого столу механізованого модулю. ....</b>	<b>38</b>
<b>2.3.3. Вибір напрямних.....</b>	<b>40</b>
<b>Висновки до розділу .....</b>	<b>42</b>
<b>3. Конструкція механізованого модулю та перевірка основних вузлів у віртуальному середовищі.....</b>	<b>43</b>
<b>3.1. Загальний вигляд механізованого модулю. ....</b>	<b>43</b>
<b>3.2. Приводи переміщення хрестового стола .....</b>	<b>46</b>
<b>3.3. Додатковий привід повороту для виготовлення кільцевих зразків .....</b>	<b>49</b>

<b>3.4. Динамічне моделювання робочого столу у віртуальному середовищі Autodesk Inventor .....</b>	<b>51</b>
<b>3.5. Розрахунок теплових полів під час лазерно-струминної обробки. ....</b>	<b>61</b>
<b>Висновки до розділу: .....</b>	<b>77</b>
<b>ВИСНОВКИ.....</b>	<b>78</b>
<b>Літературні джерела: .....</b>	<b>79</b>

## ВСТУП

Розвиток людства безперервно пов'язаний із задоволенням нескінченної кількості бажань людей. Те, що ще 200 років тому здавалося міфом, казкою, що розповідали дітям, сьогодні стало буденністю. На початку XIX століття, ніхто не міг здогадуватися, що в XXI столітті ми будемо розмовляти по телефону, чи використовувати комп'ютери замість друкованих машинок, чи навіть побуваємо в космосі. Тоді машини та механізми тільки-тільки починали створюватися, і хто ж знав, що людині буде мало місця на землі, і їй захочеться політати чи освоїти інші планети.

Ракето-космічна галузь на сьогоднішній день, є однією з провідних галузей, що штовхають розвиток науки та технологій, адже саме ця галузь ставить одні з найвищих вимог до матеріалів, що використовуються. Вони повинні забезпечити водночас високу міцність, теплостійкість та невелику вагу. Тому все ширшого застосування починають здобувати композитні матеріали. З ростом популярності даних матеріалів виникає потреба здешевити технологію їхньої обробки, та випробування.

В цій роботі представлено конструкцію механізованого модулю технологічного оснащення для виготовлення дослідних зразків з композитної труби.



# **1. Композиційні матеріали. Властивості композиційних матеріалів та їх використання у машинобудуванні.**

## **1.1. Види композиційних матеріалів**

Що таке композиційний матеріал (КМ)? Це штучно створений суцільний матеріал, гетерогенної структури, утворений з декількох компонентів. В основному структуру композиційного матеріалу умовно поділяють на 2 частини: матрицю і наповнювачів. Матриця – пластична основа, наповнювачі – армуючі, часто волокнисті, матеріали, з високою міцністю та жорсткістю. Результатом поєднання різнорідних речовин – є утворення нового матеріалу, з властивостями, відмінними від властивостей кожної зі складових. Змінюючи якісні (матеріали матриці та наповнювачів; просторова орієнтація наповнювачів) та кількісні (співвідношення між матрицею та наповнювачами) характеристики матриці та наповнювачів, можна отримати чималу кількість різноманітних матеріалів, із затребуваними характеристиками [1]. Із сучасним темпом розвитку, у світі, з обмеженими сировинними ресурсами, композити стають дедалі популярнішими і вже проникли у майже всі галузі виробництва завдяки ряду своїх унікальних властивостей. Вони підштовхують до нових технічних рішень, які є неможливими у виконанні із металу.

З характерних ознак композиційних матеріалів можна виокремити:

- 1) Багатокомпонентність, оскільки КМ складається з двох або більше різнорідних матеріалів.
- 2) Відсутність взаємо розчинності між компонентами, що входять до складу КМ, оскільки між ними існує границя розділення фаз.
- 3) Між компонентами існує тільки фізичні зв'язки, тобто між ними відсутня хімічна взаємодія.
- 4) Складові композиційного матеріалу підібрані так, що якісні параметри КМ перевищують характеристики окремо взятого компоненту.
- 5) Матриця композиту є суцільним середовищем, в якому об'єднуються усі інші компоненти, що входять до складу КМ.

- б) В основному, навантаження сприймаються армуючими елементами, оскільки жорсткість матриці, зазвичай нижча за жорсткість армуючих наповнювачів[2].

Композиційні матеріали є відомими людству на протязі тисячоліть. Їх можна доволі часто знайти в природі, навколо нас: кістки, мушлі, шкіра і т. д. . Вони також знайшли чимало різноманітних застосувань, нашими предками, по всьому світі. Яскравими прикладами є мармурові колони храмів Стародавньої Греції, які зміцнювалися залізними прутами, а у Стародавньому Вавилоні, в свою чергу, при спорудженні житла, глину армували очеретом, Майя також використовували своєрідні композиційні матеріали для виготовлення керамічних виробів[3].

Хоча й композиційні матеріали використовуються не одне століття, проте початком їхнього розвитку прийнято вважати 1 пол. XXст. Передумовами появи сучасних композиційних матеріалів був науковий прорив у області хімії, що відбувся в другій половині XIX ст. Саме тоді було створено синтетичні смоли, агрегатний стан яких можна змінити (з рідкого в твердий) шляхом полімеризації. Одними з перших синтетичних смол стали: целулоїд, полістирол, поліестер, бакеліт, а також смоли на основі фенолу, оскільки вони легко перетворювалися з рідкого агрегатного стану в твердий шляхом зшивання молекул. Вже на початку XX ст. було вперше видано патент, що стосувався композиційних матеріалів, а саме на армування синтетичних смол природніми волокнами. І невдовзі було також розпочато серійне виробництво деталей, з полімерних композитних матеріалів, на заводах «Rolls-Royce».

Немало важливим фактором є винайдення Расселом Слейтером скловолокна у 1932-1933 роках. Друга світова війна теж зробила свій внесок у розвиток КМ. Адже тоді відбувся перехід композитів від досліджень до реального виробництва. За фінансуванням військових було розроблено корпуси човнів, технологія яких швидко стала комерційною після закінчення війни. В повоєнні роки рушійною силою розвитку КМ були автомобільна, аерокосмічна та суднобудівна галузі. До початку 50-х років, було розроблено та протестовано кузов автомобіля, з композитного матеріалу.

А в 1953 році було виготовлено Corvette (рис. 1.1), під час створення якого було розроблено декілька перших методів формування, два з яких стали основними автомобільній галузі та інших.



Рис. 1.1. Corvette 1953 року – перший автомобіль, де було використано КМ (прес-форми зі скловолокна та металева матриця)

У 1961 році з'явився перший патент на вугле волокно. А у 1960-х найбільшим імпортером композиційних матеріалів став морський ринок, в якому й донині переважають КМ для малотоннажного суднобудування [4].

У 1964 році американською компанією DuPont було отримано арамід у вигляді синтетичного волокна, що має надзвичайно високу міцність (торгова назва – кевлар (рис. 1.2)) [5]. Наприкінці 70-х років, КМ вже масово використовувалися для побутових потреб, до полімерів почали включати жорсткі неорганічні частинки, щоб надати необхідних експлуатаційних властивостей продукції, за меншої собівартості.

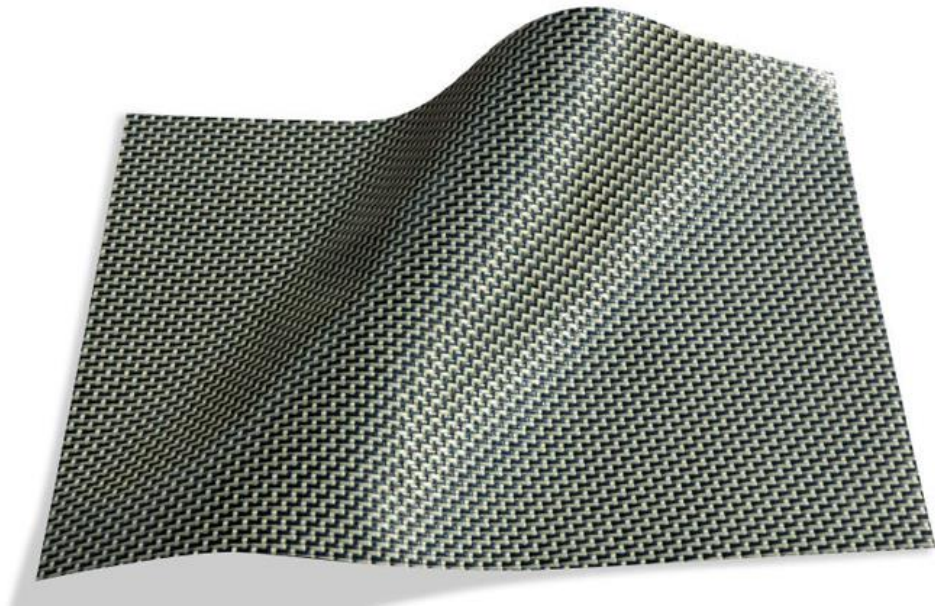


Рис. 1.2. Кевлар

Кількість країн, в яких розвинуте виробництво деталей з композитів, стрімко зростає, зважаючи на переваги, які надає використання КМ, а саме: зменшення матеріаломісткості виробу, зі збереженням однакових, або покращенням параметрів виробу. Мабуть, найважливішим показником конкурентоздатності КМ – це їх високі експлуатаційні особливості, а також собівартість, на одиницю технологічності. Адже, економічно обґрунтованим буде заміна металевих деталей на таку ж, виготовлену з композиту.

На сьогоднішній день, із-за можливості різних варіантів складових компонентів, їх загальної структури та технологій виготовлення, кількість перспективних та вже існуючих КМ надто широка. Задля систематизації КМ за різними ознаками, важливо грамотно підібрати порядок вибору КМ для виготовлення різноманітних деталей. Загальноприйнятої класифікації композитних матеріалів – не існує. Це обґрунтовується тим, що КМ представляє найбільший клас матеріалів, в який можуть входити метали, полімери, скло, кераміка та інші.

Композитні матеріали можна класифікувати наступним чином:

1. За матеріалом матриці – одна з найважливіших класифікацій КМ: з металевою (рис. 1.3а), полімерною (рис. 1.3б), керамічною (рис. 1.3в) основами.

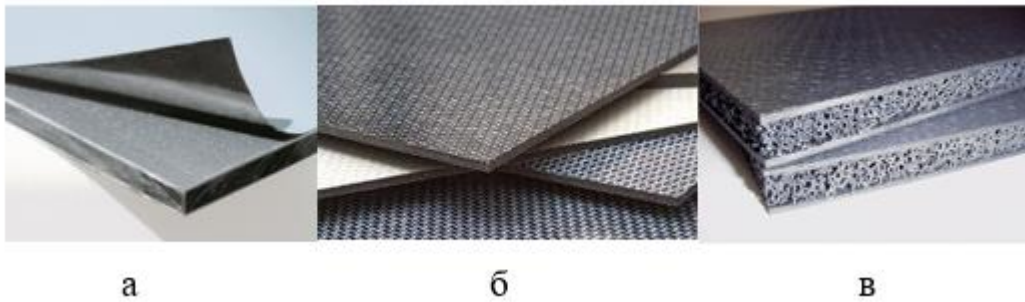


Рис. 1.3. КМ з: а) з металевою матрицею, б) полімерною; в) керамічною.

2. За геометрією армуючих наповнювачів: волокна (рис. 1.4а), гранули (рис. 1.4б), пластини або порошки (рис. 1.4в).

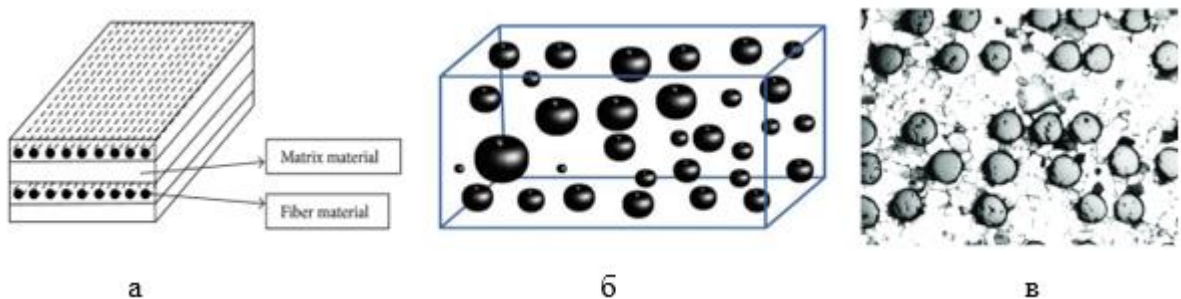


Рис. 1.4. Геометрія армуючих наповнювачів: а) волокно; б) гранули; в) порошки

3. За структурою та розташуванням складових елементів: з матричною, шаруватою, каркасною або комбінованою структурою.
4. За схемою армування: хаотично-армовані або впорядковано-армовані.
5. За методом отримання (за технологічним принципом): отримані твердо фазними або рідкофазними методами; методами осадження-напилення або комбінованими.
6. За призначенням. Ця класифікація є доволі умовною, адже, зазвичай, композитні матеріали є багатофункціональними. Проте в даній класифікацію КМ поділяють на наступні групи:
  - загального конструкційного призначення (напри., каркаси літаків, автомобілів, суден);
  - жароміцні матеріали (напр., камери згорання, лопатки турбін літаків);

- термостійкі (ті, що працюють при високій частоті теплових змін);
- фрикційні (напр., гальмівні колодки);
- антифрикційні (напр., підшипники ковзання);
- теплозахисні і т. д [2].

## 1.2. Застосування композиційних матеріалів

На даний час, завдяки своїм унікальним особливостям: висока корозійна стійкість, здатність витримувати ударні навантаження, легка вага, композиційні матеріали використовуються у всьому світі в багатьох галузях виробництва, від літакобудування до нафтопереробки, як в оборонній так і в сільськогосподарській сфері.

Наприклад:

- в аерокосмічній галузі – для виготовлення каркасів ракет та супутників (рис. 1.5). У літакобудуванні використання композиційних матеріалів перейшло планку в 50%. На графіку (рис. 1.6) зображено як протягом 50 років зріс відсоток використання КМ у літаках. На сьогодні з них виготовляють фюзеляжів літаків (рис. 1.7), стабілізатори, елементи внутрішнього облицювання салонів, та інші задля зменшення ваги деталей, оскільки кожен лишній кілограм є надзвичайно дорогим у цій сфері.



Рис. 1.5. – Захисний кожух для аерокосмічних та надзвукових систем, виконаний з карбідів силікону та карбону [6].



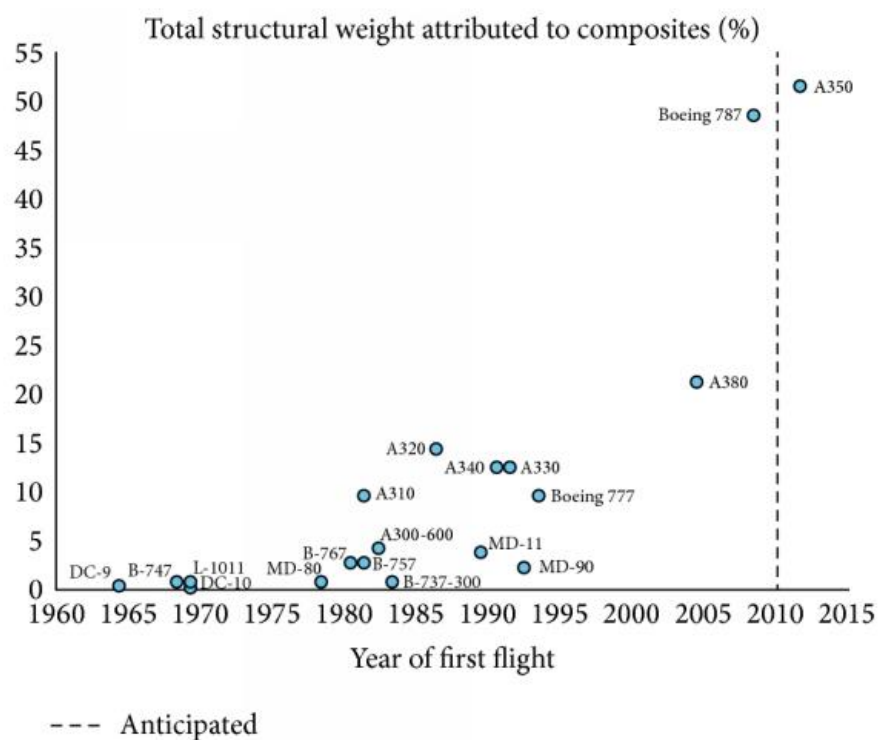


Рис. 1.6. – Відсоток КМ використовуваних у цивільній авіації [7].

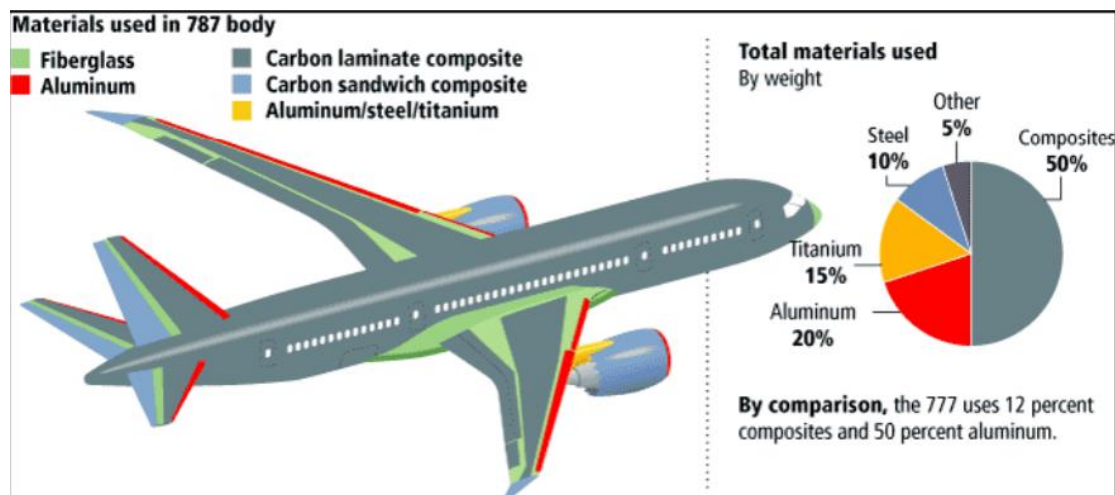


Рис. 1.7. – Матеріали, які використовуються в конструкції Boeing 787 Dreamliner [8].

- в суднобудуванні – обшивка швидкісних катерів та яхт, щоб зменшити вагу, елементи каркасу транспортних кораблів. У воєнному суднобудуванні все частіше почали використовувати склопластикові конструкції для підводних човнів (рис. 1.8) [9].

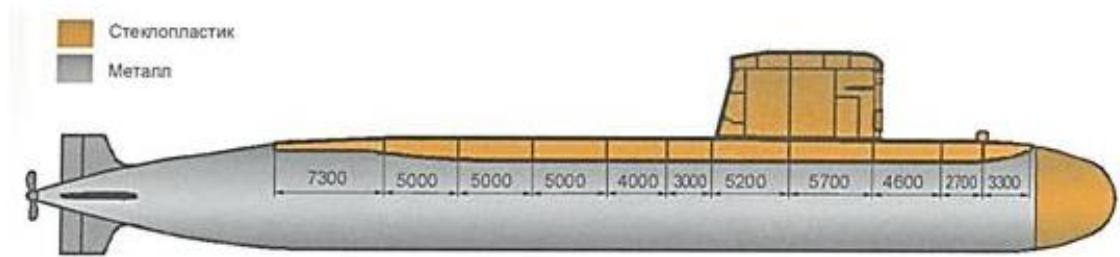


Рис. 1.8. – схема розміщення конструкцій зі склопластиків на підводному човні типу “Rubis”

- у сільськогосподарській галузі, із-за хороших антикорозійних властивостей, їх використовують там, де не витримують інші матеріали. Це можуть бути: резервуари для зберігання мінеральних добрив, відходів, елементи тваринницьких ферм. Також КМ використовуються для виготовлення кузовів сільгосп техніки.
- у сфері залізничного транспорту. Щороку збільшується кількість компаній, які переходять на виготовлення з композиційних матеріалів не тільки окремих деталей, але й навіть цілих вагонів (рис. 1.9) [10].

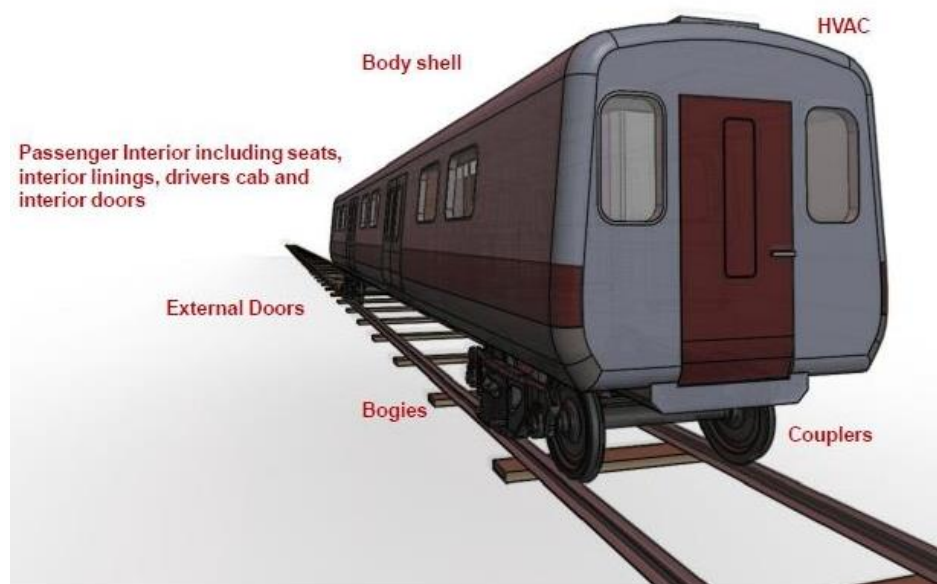


Рис. 1.9. – Елементи вагону, які виготовляють з композитних матеріалів, задля зменшення ваги [11].



- в будівництві – залізобетонні конструкції, склопластики (арматура, вікна, двері та інші), органопластики, вуглепластики, текстоліти.
- в автомобілебудуванні – корпуси спортивних автомобілів, елементи підвіски та гальмівної системи (рис. 1.10).



Рис. 1.10. BMW i3 та i8 – перші конвеєрні авто з каркасом з карбонового волокна

Особливо широкого застосування знайшов вуглець-вуглецевий композиційний матеріал (ВВКМ) (Рис. 1.11.). Цьому матеріалу притаманні висока температура сублімації, високі показники міцності при температурі, навіть понад  $2800^{\circ}\text{C}$ , хороший опір як термічним, так і механічним навантаженням, включаючи ударну, хімічну, радіаційну та втомлену стійкість, а також низьку щільність. Найбільшої уваги ВВКМ придали розробники деталей та обладнання, що працює у безокисному середовищі при дії високих температур. Мабуть, одним з найкращих прикладів можуть бути конструкції ракето-космічної техніки (РКТ), створення яких не ефективно без застосування деталей з ВВКМ. Близько 18% від загального обсягу виробництва

ВВКМ, що приблизно становить 1000т/рік, використовується для виготовлення деталей у ракетно-космічній техніці: соплові блоки, розтруби, кромки стабілізаторів, наконечники спускових апаратів, елементи кермових і маневрових двигунів і надає можливість значно підвищити їх економічність та ресурс їхньої працездатності.

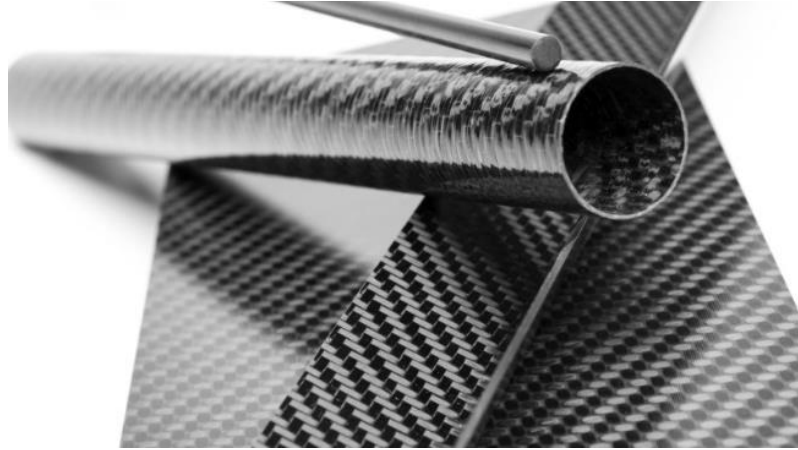


Рис. 1.11. Вуглець-вуглецеві композиційний матеріал

Відносно дрібна структура ВВКМ, дає змогу виготовляти вироби складної конфігурації з окремими дрібними елементами. На рис. 1.12 а. показано, як виглядають шпильки з різзю М6 та М8 та нарізь виконана на розтрубі з ВВКМ (1.12 б).

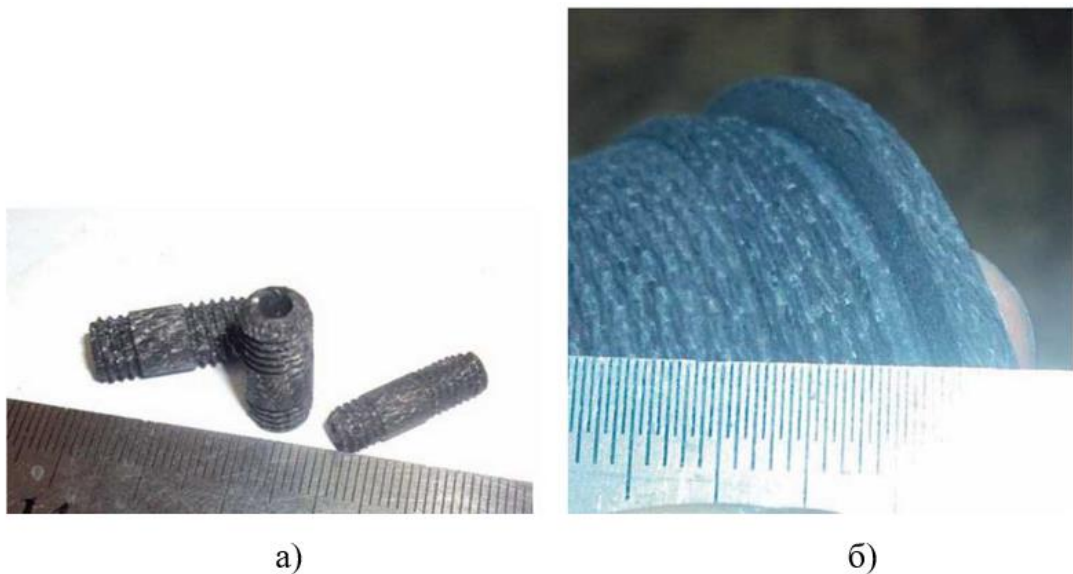


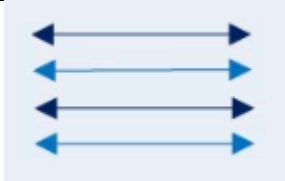
Рисунок 1.12. а) – шпильки М6 та М8 з ВВКМ; б) – фрагмент нарізі на виробах з ВВКМ.

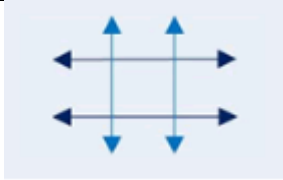
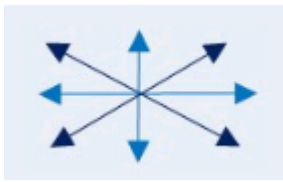
ВВКМ – це бінарний композит, який складається з графітової або вуглецевої матриці, та виготовленого з вуглецевих волокон армувального каркасу. Для виробництва термонавантажених виробів РКТ, застосовують високо щільні, високомодульні та високоміцні вуглецеві волокна на основі ПАН або пекових прекурсорів. У розробці та виробництві цих матеріалів за якістю та за кількістю домінуюче положення займає Японія. Серед країн ближнього зарубіжжя основну частку вуглецевих волокон виготовляють два підприємства: ТОВ «Аргон» (Росія) – виготовлення на основі ПАН, та РУП «Світлогорське ПО «Хімволокно»» (Білорусь) – виготовлення на основі віскози. На обох підприємствах є власні потужності для виробництва прекурсору.

На український ринок вуглецеві волокна надходять, в основному, з Білорусії, та Російської Федерації. У порівнянні з світовими виробниками, вони мають посередні характеристики, проте суттєво більшу вартість. Вуглецеві матеріали японського, китайського або американського виробництва є в доступі лише комерційними партіями, а їх закупівля повинна супроводжуватися підписанням міжнародних договорів.

Армувальний каркас (АК) надає змогу реалізувати задані властивості матеріалу у різних напрямках готових виробів, а також знизити анізотропію властивостей кінцевого матеріалу. До найбільш поширених способів виготовлення АК можна віднести: намотування, викладення, плетіння, прошивання шаруватого матеріалу та складання стрижневих АК. Немало важливим є просторове орієнтування армувальних волокон та їх довжина. Регулюючи ці параметри можна отримувати різні за властивостями композити. Зазвичай визначають 3 види просторового розташування армувальних волокон: одно-, дво-, та багатонапрявлені (таблиця 1.1.).

Таблиця 1.1. Види просторового орієнтування армувальних волокон [23].

Орієнтація	Волокна	Схема	Застосування
Однонапрявлені	Довгі		Високоміцні вали

Бінапрямлені (0°/90°)	Довгі		Пластини, великогабаритні плати. Найчастіше використовувані в термостійких областях.
Багатонапрямлені	Короткі		Болти, гайки. Для точних деталей та складних компонентів.

### 1.3. Методи обробки композиційних матеріалів.

Серед нових сучасних матеріалів, все більшої уваги надають використанню композиційних матеріалів. Темпи виробництва деталей стрімко зростають серед усіх промислових країн. Так виробництво композитів у США з 2000 по 2014 роки підвищувалося на 35 - 40% щорічно. У списку лідерів також присутні Індія та Китай. Об'єм продажів КМ з цих країн лише тільки за 2013 рік склав понад \$70 млрд., до того ж за прогнозувався щорічний ріст в 4,6% [12].

Унікальні властивості композиційних матеріалів, які можна отримати, з тієї чи іншої структури надають перевагу КМ при виборі серед інших класичних матеріалів. Але їхні властивості спричиняють нову проблему, а саме – їх обробку. Вона вимагає від машинобудівної галузі розробки та впровадження нових технологічних методів оброблення, що характеризувалися б високою точністю та продуктивністю. Наприклад, виробник інструментального забезпечення Sandvik Coromant звертає увагу [13] (Рис. 1.13), що при обробці композитів з вуглеволокна доволі складно підібрати режими різання, оскільки вуглеволоконні композити володіють високою міцністю та модулем пружності.

Механічне оброблення ВВКМ можуть проводити як під час стадії їх виготовлення (щоб зняти поверхневий шар, який закупорив пори), так і після виготовлення, щоб отримати деталі затребуваної якості. Механічна обробка ВВКМ відрізняється від обробки металу, оскільки спостерігаються абсолютно інші фізико-хімічні процеси. Наприклад, руйнація армувальних волокон, деструкція матриці, поглинання

води. В основному механічна обробка проводиться твердосплавними і алмазними різальними інструментами. Також використовуються металорізальні верстати із можливістю інтенсивного відведення пилу.

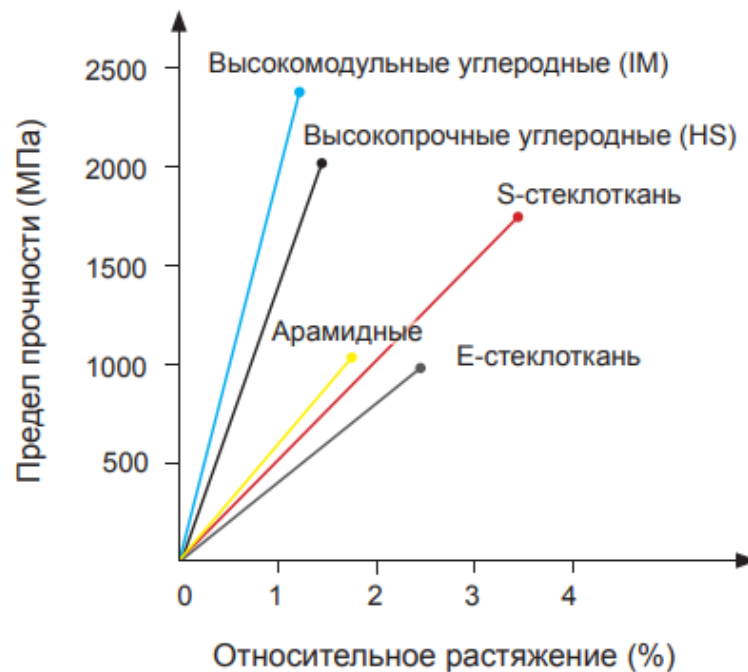


Рис. 1.13. Властивості волокон КМ за даними Sandvik Coromant.

Загалом методи обробки композиційних матеріалів можна поділити на наступні групи:

- методи обробки лезовим інструментом:
  - точіння;
  - фрезерування;
  - свердління;
  - шліфування.
- методи гідроабразивної обробки;
- методи ультразвукової обробки;
- методи лазерної обробки;
- гібридні методи обробки:



- інтегровані (напр., різання з попереднім пластинчастим деформуванням; вібро-абразивна та магнітно-абразивна обробка, струминно-лазерне різання)
- комбіновані.

При лезовій обробці багатьох композиційних матеріалів забороняється використання змащувально-мастильної охолоджувальної рідини із-за ризику розбухання та розшарування матеріалу. Якщо все-таки охолоджувати заготовку, тоді використовують охолодження стиснутим повітрям. Перевагами оброблення лезовим інструментом є висока точність обробки, низька шорсткість оброблених поверхонь. Проте в даного методу оброблення достатньо велика кількість недоліків, а саме: низька стійкість ріжучого інструменту призводить до розшарування матеріалу, вириivanню волокон, підвищенню температури в зоні різання, внаслідок чого виникає термічна руйнація матриці композиту. При обробці даними методами деталей з КМ, включаючи вуглепластики та склопластики – виникають дефекти, що пов'язані із пошкодженням поверхневого шару, вони проявляються у вигляді вириву волокон, сколів та розшарувань (рис. 1.14) [14].

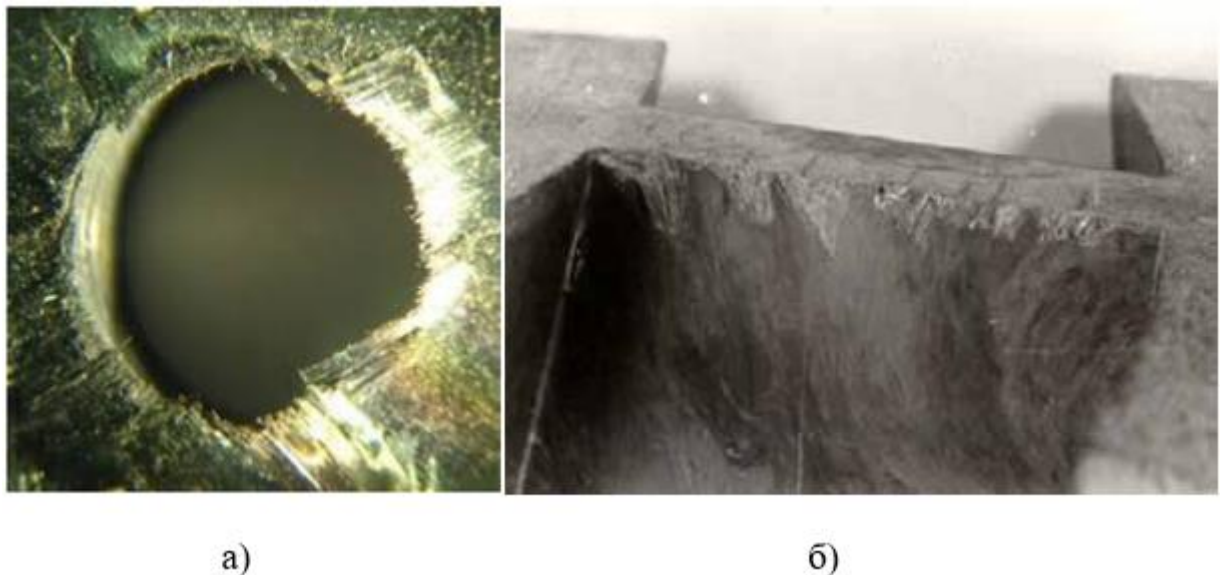


Рис. 1.14 – Дефекти поверхонь композиційних матеріалів від лезового інструменту: а) від свердління; б) після фрезерування

Гідро-абразивна обробка забезпечує високу продуктивність, а також можливість різати матеріали великої товщини. При цьому не виникає термічного руйнування матриці КМ. Недоліками даного методу оброблення являються: висока шорсткість оброблених поверхонь та висока ймовірність поглинання води матеріалом.

Методи ультразвукової обробки КМ забезпечують високу точність обробки, низьку шорсткість поверхонь, що оброблялися, та мінімальне розшарування матеріалу. Проте ці методи не можуть забезпечити високої продуктивності.

Обробка за допомогою лазера забезпечує високу точність обробки, відсутність габаритних обмежень для деталей. Проте недоліками є термічна деструкція матриці композиційного матеріалу з оплавленням країв в зоні різання та виділення газів.

Доволі популярними стають гібридні методи обробки матеріалів. Вони поєднують в собі декілька різних видів оброблення під час одного технологічного періоду виготовлення деталі. Така взаємовикористання різних технологічних методів обробки дає можливість досягти необхідного результату найбільш ефективним та швидким способом.

Особливо перспективним гібридним методом є струминно-лазерна обробка, опис якої приведений в джерелах [20, 21, 22]. Основна ідея даного методу це об'єднання лазерного променя з потоком невеликого діаметру. Ще в середині XIX ст. було відкрито можливість руху світлового променя у ламінарному потоці рідини, при його відхиленні від сили тяжіння [22].

Наприкінці XX ст. компанія Synova Laboratories Ltd розробила першу технологію струминно-лазерного різання. Вона реалізувала ідею подачі потужного світлового променя, який здатний виконувати локальне нагрівання поверхні тіла, в зону різання, використовуючи струмінь рідини. Вони використовували невисокий тиск ( $< 1,5 \text{ МПа}$ ) та ретельно сформований струмінь рідини невеликого діаметру ( $\sim 0,1 \text{ мм}$ ). Промінь світла проходив через прозоре вікно струминної головки (рис. 1.15).

Лазерний промінь було сфокусовано на віконце, вбудоване у герметичну камеру з водою. При сполученні лазерного променя для ефективного утворення водо-

променевого потоку вирішальними є саме геометрія камери та насадка [24]. Струмінг води, витікаючи з насадки, спрямовує лазерний промінь на межі «рідина – повітря», де промінь лазера після кількаразового відбиття потрапляє в зону контакту води з оброблюваною поверхнею, подібний ефект можна спостерігати при проходженні світла крізь скловолокно. В даному випадку струмінг рідини розглядається, в якості хвилеводу змінної довжини.

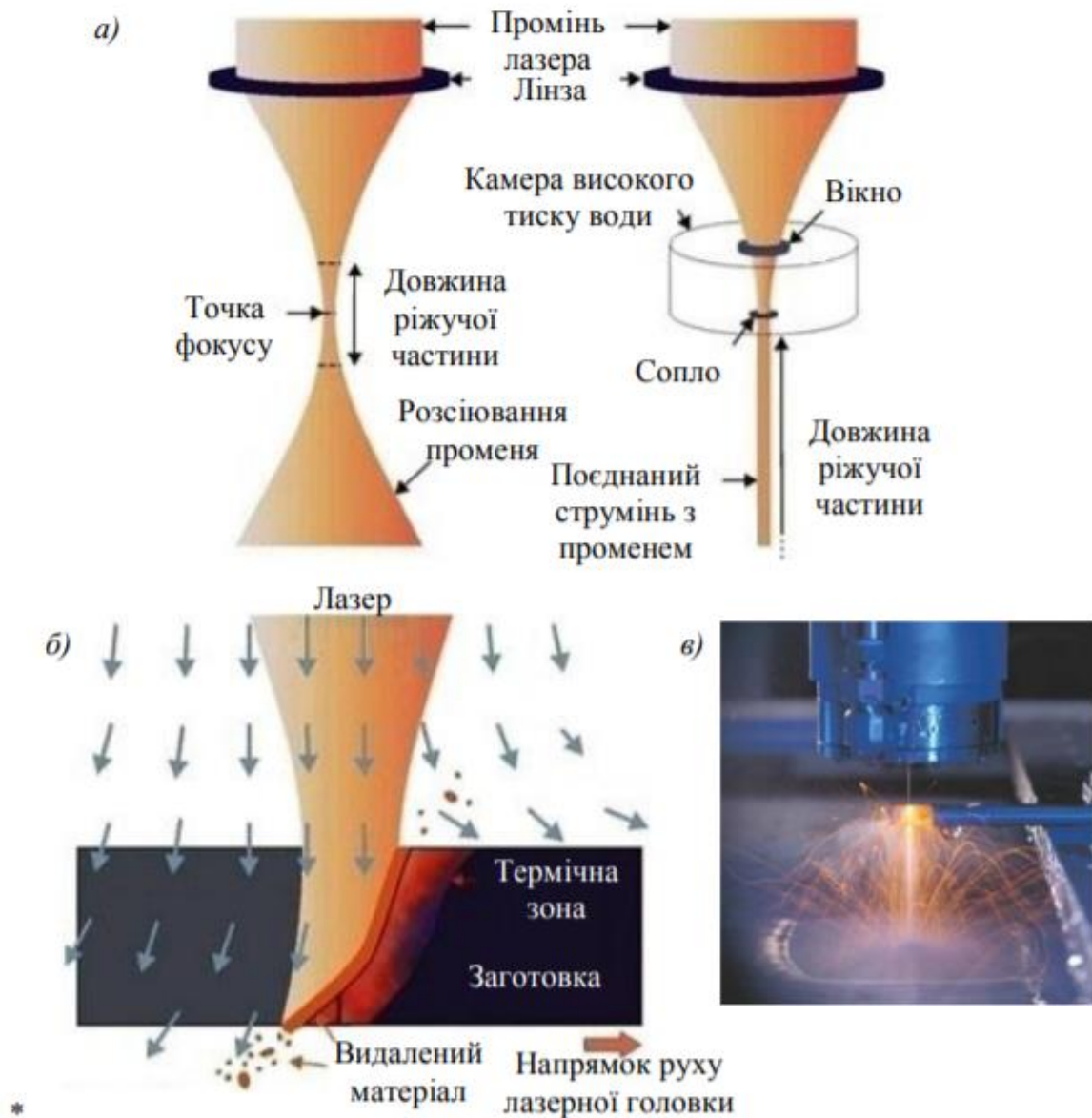


Рис. 1.15. Формування струминно-лазерного потоку, з його подальшим впливом на оброблювану поверхню [25]; а) – формування струминно-лазерного потоку; б) – вплив потоку на заготовку в зоні різання; в) – різання листової заготовки.



За даними роботи [26], лазерний промінь проходить через потік рідини (в даному випадку води) з незначними втратами, таким чином активний нагрів заготовки виникає лише в місці натікання на перепону. Зокрема в джерелі [27] йде мова, що в момент зштовхування лазерного променя та тіла, що поглинає випромінювання, поверхневий шар нагрівається настільки, що починає утворюватися плазма. В цей час потік рідини відокремлює матеріал. Хоча й рідина екранується плазмою, промінь лазера здатний проникати крізь такий екран і в результаті процес видалення матеріалу локалізується малим обсягом, і швидко проходить. Також в роботі [26], було встановлено, як залежить довжина активної частини струменя (довжина, при якій лазерна обробка залишається ефективною) від режимів подачі рідини. Ці є пов'язаними з комбінацією, діючих на струмінь, сил: поверхнева напруженість, аеродинамічні сили, сили інерції рідини.

У джерелі [28] описано пояснення ефекту водяного охолодження. При постійній генерації лазерного променя, в зоні різання залишається тільки плазма. Якщо ж використовувати імпульсний лазер, то настає період, коли лазерний промінь не генерується, саме тоді відбувається активне охолодження зони різання струменем води, в наслідок чого глибина теплового проникнення є дуже малою. Підсумовуючи вищеописане, за можливості коригування тривалості імпульсу та умов натікання рідини на поверхню, маємо змогу забезпечити необхідну якість оброблюваної поверхні.

#### **1.4. Обладнання для обробки та випробувань композиційних матеріалів**

Перспективи розвитку нової техніки пов'язують з дедалі ширшим використанням композитних матеріалів, унікальні властивості яких дозволяють значно підвищити експлуатаційні характеристики виробів, а також зменшити матеріалоємність їх виготовлення.

Проте сучасні КМ ставлять нові вимоги не тільки до методів їх обробки, а й до обладнання, на яких вони будуть оброблюватися та випробовуватися, оскільки традиційне технологічне оснащення не завжди справляється з такими задачами.

При класичному обробленні КМ зазвичай використовуються верстати з ЧПК, та оброблювальні центри. В цьому випадку, найбільшого зносу зазнає, власне, ріжучий інструмент, тому в основному, найбільшим змінам піддається саме інструмент.

Для прикладу, такі компанії як Sandvik Coromant та Hoffmann надають свої інструменти та підбирають режими різання під конкретні види КМ [17]. На рис. 1.16 представлено фрезу компанії Hoffmann для обробки стільникових композитів.



Рис. 1.16. Твердосплавна фреза GARANT 20 9480 для обробки стільникових композиційних матеріалів.

Доволі популярними стали верстати гідро та лазерної різки (рис. 1.17 та 1.18). Так в виробник Biesse пропонує лінійку Primus – універсальних систем для гідро-абразивного оброблення. Технічні дані яких наведено в таблицях 1.2. та 1.3. відповідно.



Рис. 1.17 Primus Система гідро-абразивного різання для обробки пластикових та композитних матеріалів.

Таблиця 1.2. Технічні характеристики гідро-абразивної установки Primus [18].

Робоча зона	Від 1860 x 4000 до 3210 x 6000
Максимальні розміри листа (X - Y)	Залежно від конфігурації лежить в діапазоні від 2010x4300 до 3300x6300
Хід по осі Z Максимальна швидкість вздовж осей X-Y	250 мм
Максимальна вантажопід- йомність стола	1000 кг/м2
Потужність двигуна	В діапазоні від 22 до 75 кВт
Максимальний тиск	420 МПа
Максимальна подача води	Від 2 до 7,8 л / хв.



Рис.1.18. Лазерний станок Euro laser M-800

Таблиця 1.3. Технічні параметри Eurolaser M-800[19].

Робоча зона	800 x 1300
-------------	------------

Максимальна ширина матеріалу	1575 мм
Потужність лазера	60 – 400 Вт
Лазерне джерело	CO <sub>2</sub>
Швидкість	1 – 1414 мм/с
Прискорення	Макс. 14,1 м/с <sup>2</sup>

Серед гібридних методів обробки дедалі перспективнішою стає лазерно-струменева обробка композиційних матеріалів. Метод набирає своєї популярності завдяки його здатності виконувати обробку широкого ряду матеріалів (в тому числі і важкооброблюваних), при цьому забезпечуючи високі показники якості та чистоти оброблених поверхонь [20, 21].

На кафедрі ПОМФТО КрНУ ім. Остаградського розроблено струмино-лазерний комплекс з 5-ти координатною системою ЧПУ ЛСК – 500 (рис. 1.19.) [20, 21, 22]. Призначенням цього верстату є виконання струмино-лазерної, лазерної, струменевої, струмино-абразивної різки листових матеріалів. Технічні характеристики комплексу наведені в таблиці 1.4.



Рис. 1.19. Загальний вигляд верстату ЛСК – 500 [21].

Таблиця 1.4. Технічні характеристики верстатного комплексу ЛСК – 500 [20].

Загальна потужність	45 кВт
Потужність основного приводу	40 кВт
Зона робочого столу	1500 x 2200 мм
Точність відпрацювання переміщень	$\pm 0,01$ мм
Тип лазеру	Yag:Nd
Середня потужність випромінювача	410 Вт
Частота імпульсів	50 – 1000 Гц
Довжина хвилі променю	1062 нм

В останні роки широко поширеними є методи випробувань композиційних матеріалів на дослідних зразках, що мають форму кільця. Дані методи відрізняються відносною простотою, доволі високою відтворюваністю та надійністю результатів [16].

Розтяг кільцевих зразків реалізують за допомогою жорстких напівдисків, еластичними кільцями або гідростатичним тиском (рис. 1.20).

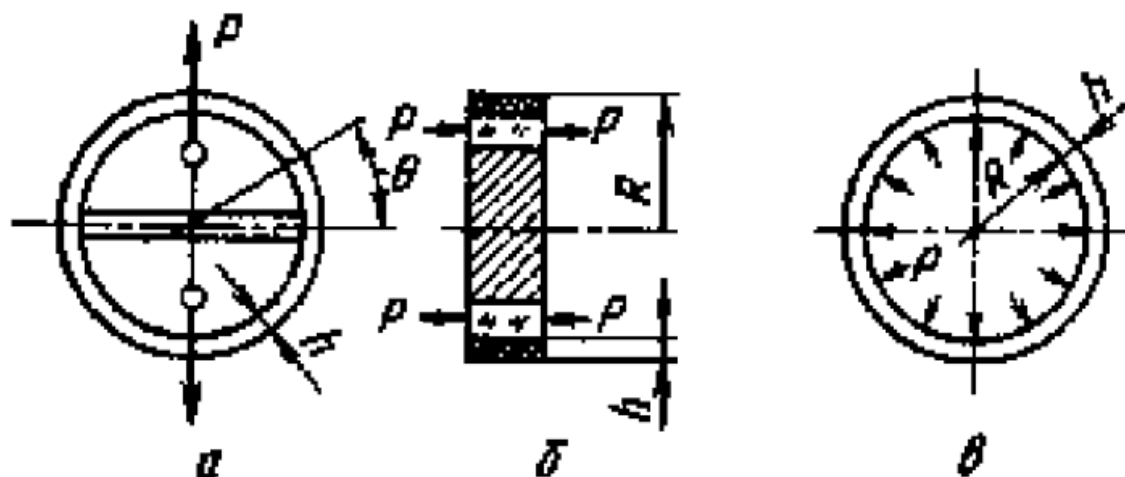


Рис. 1.20. Схеми навантаження зразків для випробувань на розтяг: а) жорсткими напівдисками; б) еластичним кільцем; в) гідростатичним тиском

Під час проведення випробувань на розтяг (стиск), можуть визначити осьовий модуль пружності, коефіцієнт Пуассона, а також границі міцності та граничні деформації. Суть методики полягає у випробуваннях трубчастих досліджуваних зразків

осьовими розтягувальними та стискуючими силами, вимірюванні навантажень і деформацій в у поздовжньому та радіальному напрямках. Після чого будуються діаграми деформацій та встановлюються характеристики матеріалу.

Дослід на розтяг проводять зі спеціальним обладнанням, яке показано на рис. 1.21. Трубчастий зразок затискається клином, який складається з тяги 3, чотирьох фасонних плашок 2, площини яких контактують з гранями піраміди, та чотиригранною пірамідою 1. На тязі є різьба та розпірна гайка 5, за допомогою якої через шайбу 4 реалізують попередній затиск дослідного зразку.

Для забезпечення співвісного навантаження зразку під час випробувань на розтяг та стиск, тяги захвату з'єднуються з траверсами випробувального стенду за допомогою шарнірного перехідника (рис. 1.22).

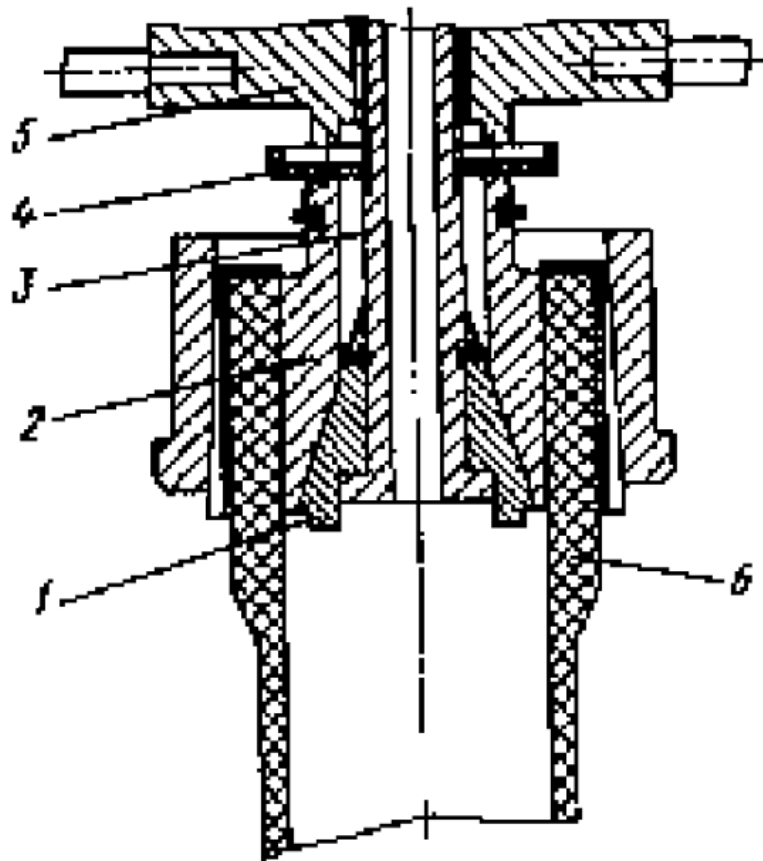


Рис. 1.21. Захват для випробувань трубчастих зразків на розтяг: 1 – піраміда, 2 – фасонна плашка, 3 – тяга, 4 – шайба, 5 – розпірна гайка, 6 – зразок [16].

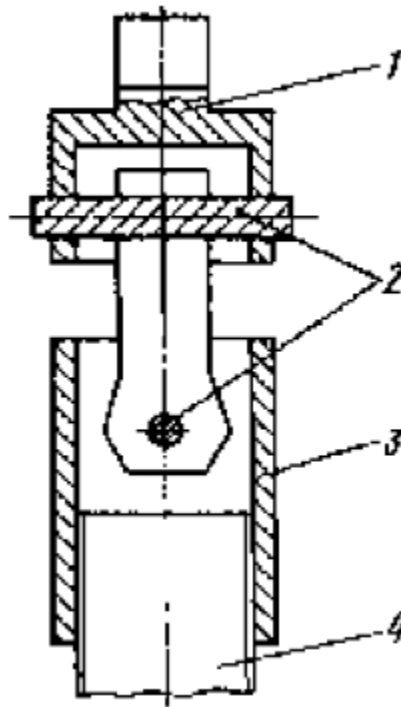


Рис. 1.22. Шарнірний підвіс: 1 – перехідник, 2 – пальці, 3 – втулки, 4 – тяга

Для проведення експериментів використовуються стенди, які можуть створити необхідний рівень навантажень, забезпечити швидкість переміщення активного захвату до 10 мм/хв та з похибкою навантажень до 1%.

Компанія Shimadzu пропонує широкий спектр електромеханічних випробувальних машин. Наприклад серія Autograph AGS-J (рис. 1.23). Характеристики якої наведені в таблиці 1.5 [15]. Також на рис. 1.24 виробники [15] приводять схему пристрою для випробувань на стиск.



Рис. 1.23. Універсальна електромеханічна випробувальна машина AGS-J

Таблиця 1.5. Параметри універсальної установки для випробувань AGS-J[15].

Потужність	5, 10, 20, 50, 100, 500Н; 1, 5, 10кН
Висота рами	1100, 1350 або 1600 мм
Вид випробувань	На розтяг, стиск, вигин.
Швидкість переміщення траверси	від 0,5 до 500 мм / хв
Дозвіл навантаж. Осередку 1/250 у всьому діапазоні	
Зручне та легке ПЗ Trapezium_2 для контроль та обробки результатів	
Можлива комплектація термокамер, екстензометрів, а також інших спеціального оснащення для проведення різноманітних випробувань.	



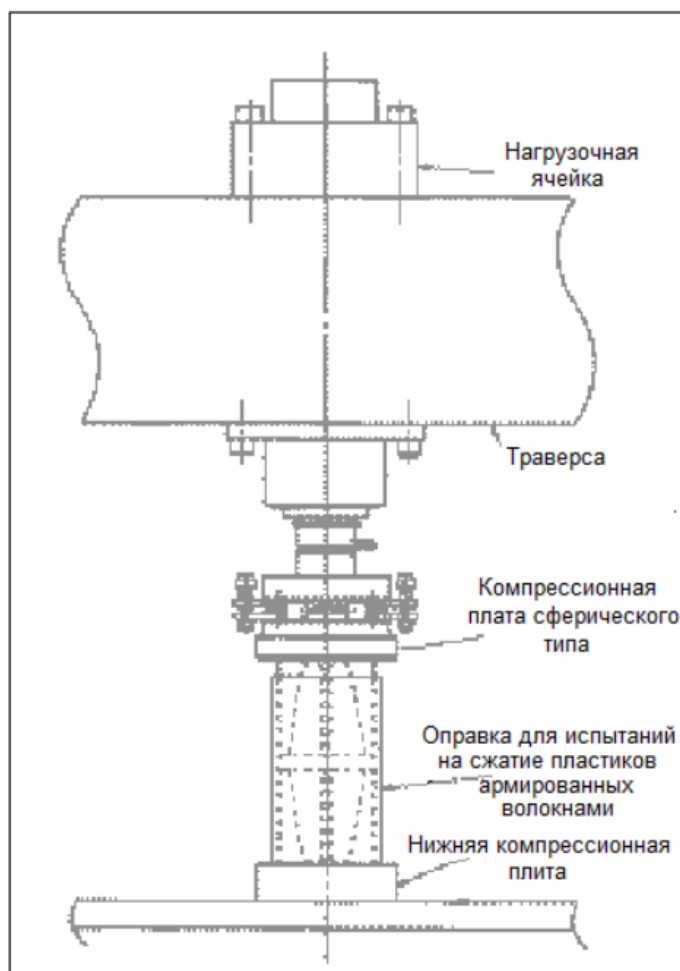


Рис.1.24. Пристрій для випробування на стиск волокнисто-наповнених композиційних матеріалів.

Випробування ВВКМ в нормальних умовах, зазвичай, не викликають складно-сті. Задля випробувань ВВКМ, в умовах високих температур, у СКТБ Інституту проблем міцності НАН України було спроектовано дослідну машину UKM – 2200 (рис. 1.25) [29], яка призначена для експериментальних випробувань зразків з ВВКМ на міцність, при згині та розтягу в умовах вакууму в діапазоні температур від 20 до 2200°C. Основні технічні характеристики UKM – 2200 наведено в таблиці 1.6.

Таблица 1.6. Технические характеристики UKM – 2200

Діапазон сил та вимірювання навантаження прикладеного до зразку	Від 50 Н до 20 кН
Похибка вимірювання	$\pm 0,5 \%$

Діапазон вимірювання прогину (видовження) зразку	Від 0 до 10 мкм
Похибка вимірювання прогину (видовження) зразку	$\leq 1\%$
Роздільна здатність вимірювань переміщення траверси	5 мкм
Похибка вимірювання та регулювання температури	$\pm 1\%$



Рис. 1.25. Дослідна машина UKM – 2200, спроектована на базі СКБТ Інституту проблем міцності.

З 2007 року в ДП «КБ «Південне» ім. М.К. Янгеля та ДП ПО ПМЗ» розпочали проводити вогневі конструкторські випробування, власне, маршового двигуна багаторазового увімкнення РД861К 3-ьої ступені РН «Циклон – 4». У 2008 році було здійснено експериментальні випробування трьох двигунів, включаючи штатний сопловий насадок з ВВКМ. Під час одного з випробувань, що тривало 102 секунди, було експериментально перевірено ерозійну стійкість ВВКМ у робочих умовах. Окрім того було експериментально підтверджено працездатність вузла стику соплового насадка, виготовленого з ВВКМ, з корпусом камери в більш складних умовах [30].

## Висновки до розділу

1. Композиційні матеріали – матеріали, утворені поєднанням двох і більше різнорідних елементів, лише фізична взаємодія, в результаті чого отримують комплекс унікальних властивостей, задля забезпечення деталей та конструкцій з необхідними характеристиками.
2. Масова частка композиційних матеріалів стрімко зростає щороку. Найбільш широко композиційні матеріали використовуються в авіакосмічній, суднобудівній та машинобудівній галузях.
3. Останнім часом дедалі більше використовують гібридні та комбіновані методи обробки композиційних матеріалів, оскільки вони є більш ефективними в порівнянні з класичними методами оброблення: обробка лезовим інструментом, гідро-абразивна обробка, ультразвукова та лазерна.
4. Одним із перспективних та найбільш ефективних способів обробки КМ є струминно-лазерний метод. А саме:
  - цей метод має високу продуктивність, та забезпечує найкращі показники оброблюваної поверхні;
  - за ним проводиться багато дослідних робіт не тільки за кордоном, але й в Україні;
  - Цей метод дозволяє обробляти тверді, та важкооброблювані матеріали, такі як ВВКМ.
5. В останні роки широкого поширення набув метод випробування кільцевих дослідних зразків з ВВКМ. Випробування зразків за кімнатних температур не створює складності. Проте для галузі РКТ, де масова частка використання ВВКМ висока, необхідно випробувати цей матеріал в умовах вакууму та при підвищених температурах. Тому виникає задача підготувати дослідні зразки для подальшого проведення експериментів.

На основі вище переліченого, можна сформулювати завдання проекту.

**Метою** даного проекту є створення механізованого модулю для технологічного оснащення для обробки та випробування зразків з композитної труби.

## **2. Будова механізованого модулю для обробки та випробовування композиційних матеріалів.**

### **2.1. Обґрунтування вибраної компоновки механізованого модулю**

Рівень газових виділень неметалевих матеріалів є одним з параметрів чистоти виробів ракетно-космічної техніки. Вибір матеріалів з низьким рівнем газовиділень для конструкцій ракетноносіїв та космічних апаратів знижує рівень забруднень чутливих поверхонь космічних апаратів, підвищуючи тим самим строк їхньої служби на орбіті.

Рівень газовиділень визначається у вигляді загальної втрати маси та кількості летких конденсуючих речовин за різницею мас зразку матеріалу та конденсуючої пластини до та після температурно-вакуумного впливу. Термічна обробка деталей та складальних одиниць з неметалевих матеріалів у вакуумі проводиться з метою дегазації матеріалів для зниження рівня виділення ними газів.

Тому обробку КМ, особливо ВВКМ необхідно проводити у термовакuumній камері. На рис. 2.1. схематично зображено установку, та принцип її дії.

В цілому конструкція установки складається з наступних вузлів та систем:

- Термовакuumної камери;
- Системи створення та вимірювання вакууму;
- Системи регулювання та вимірювання температури;
- Лазерної або струминно-лазерної установки;
- Рухомого стола для заготовок.

Зважаючи на те, що світловий промінь буде рухатися лише у вертикальному напрямку, необхідним стоїть завдання забезпечити рух заготовки у двох інших напрямках, перпендикулярних до осі руху лазерної головки. Раціонально буде використати компоновку хрестового стола, з двома приводами, керованими кроковими двигунами, оскільки при правильній синхронізації двигунів можна реалізувати не тільки переміщення заготовок в двох взаємно перпендикулярних напрямках, а й рух по колу.

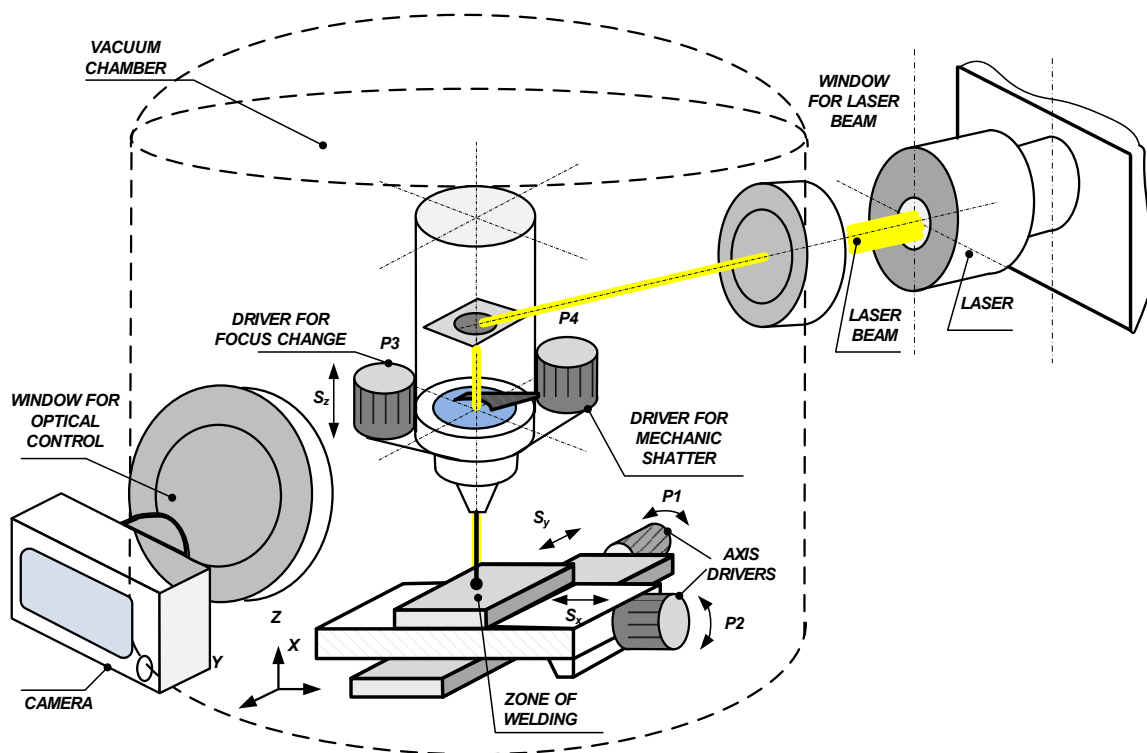


Рис. 2.1. Схематичне зображення установки для обробки ВВКМ

Окрім цього необхідно реалізувати пристрій на базі хрестового столу для виготовлення кільцевих зразків з композиційної труби, конфігурація яких наведено на рис. 2.2.

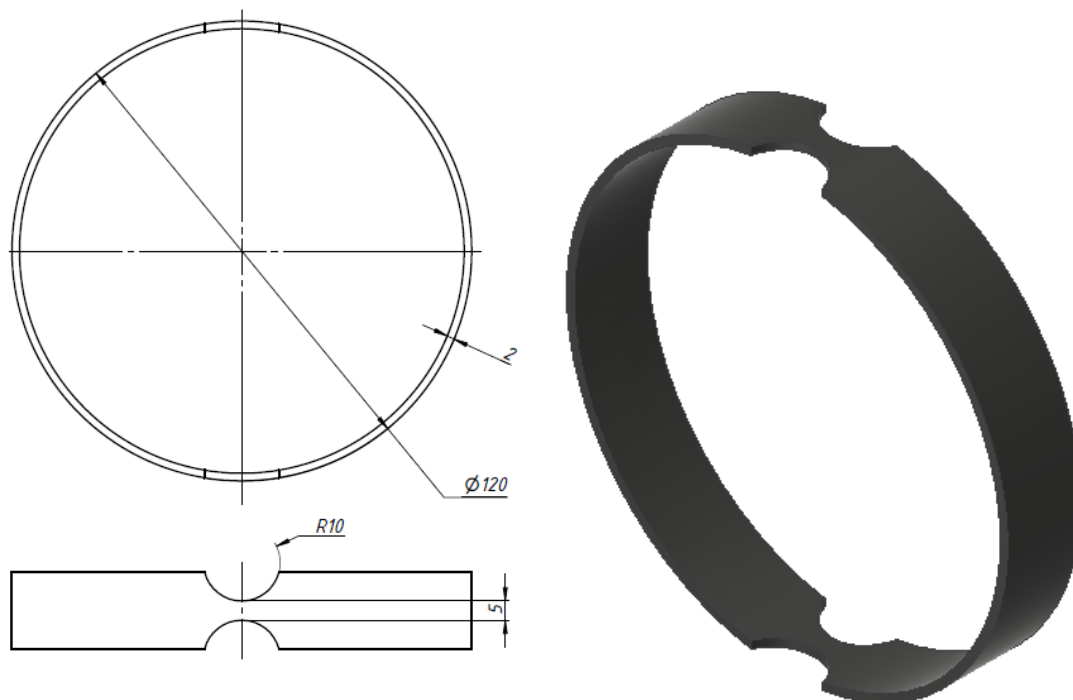


Рис 2.2. Конфігурація дослідних зразків, які необхідно виготовити.

Для реалізації вище описаного завдання доцільно буде розмістити додатковий привод повороту трубчастої заготовки під кутом, таким чином, щоб лазерний промінь не зіштовхувався з внутрішньою стороною заготовки.

Завданням було поставлено, що діаметр композитної труби може коливатися у діапазоні від 120 до 160мм, а довжина досягати 500 мм. Тому на розроблюваному модулі було обрано розмір робочої зони хрестового столу 500мм x 500мм. Для виготовлення вищеописаних дослідних зразків з композиційної труби, оптимальний кут нахилу заготовки, враховуючи вищезгадані розміри, коливається в межах 10 - 12°.

## **2.2. Принципова схема механізованого модулю технологічного оснащення для обробки та випробовування композиційних матеріалів**

На рис. 2.3 наведено принципову схему модулю для виготовлення дослідних кільцевих зразків з композиційної труби.

Модуль складається з приводів переміщення столу 15, на якому встановлена похила платформа 16, з додатковим приводом обертання заготовки.

Приводи руху хрестового столу ідентичні. До їх складу входить робочий стіл 15, який встановлений на радіально-упорних підшипниках 7 та 8 у поздовжньому та поперечному напрямках. Переміщення робочого столу 15 реалізується за допомогою двох однакових крокових двигунів 1 та 2, які через кулачкові муфти 3 та 4 відповідно, передають крутні моменти на гвинти 5 та 6. Гвинт 5 зафіксований в опора 8, а гвинт 6 – в опорах 7. За допомогою гайки 14, що встановлена на робочому столі, обертальний рух стола перетворюється у поступальні рухи вздовж напрямних у поздовжньому та поперечному напрямках.

Привід 9 через зубчато-ремінну передачу між шківками 10 та 11 передає обертотворий рух на вал 12 з закріпленою на ньому оправкою 13. Конструкція додаткового приводу обертання жорстко закріплюється на знімній похилій платформі 16, що встановлюється на стіл 15.

Приводи та М1 та М2, забезпечують частоту обертання гвинтів 5 та 6 в діапазоні від 0 до 1000 хв<sup>-1</sup>. Додатковий привод М3

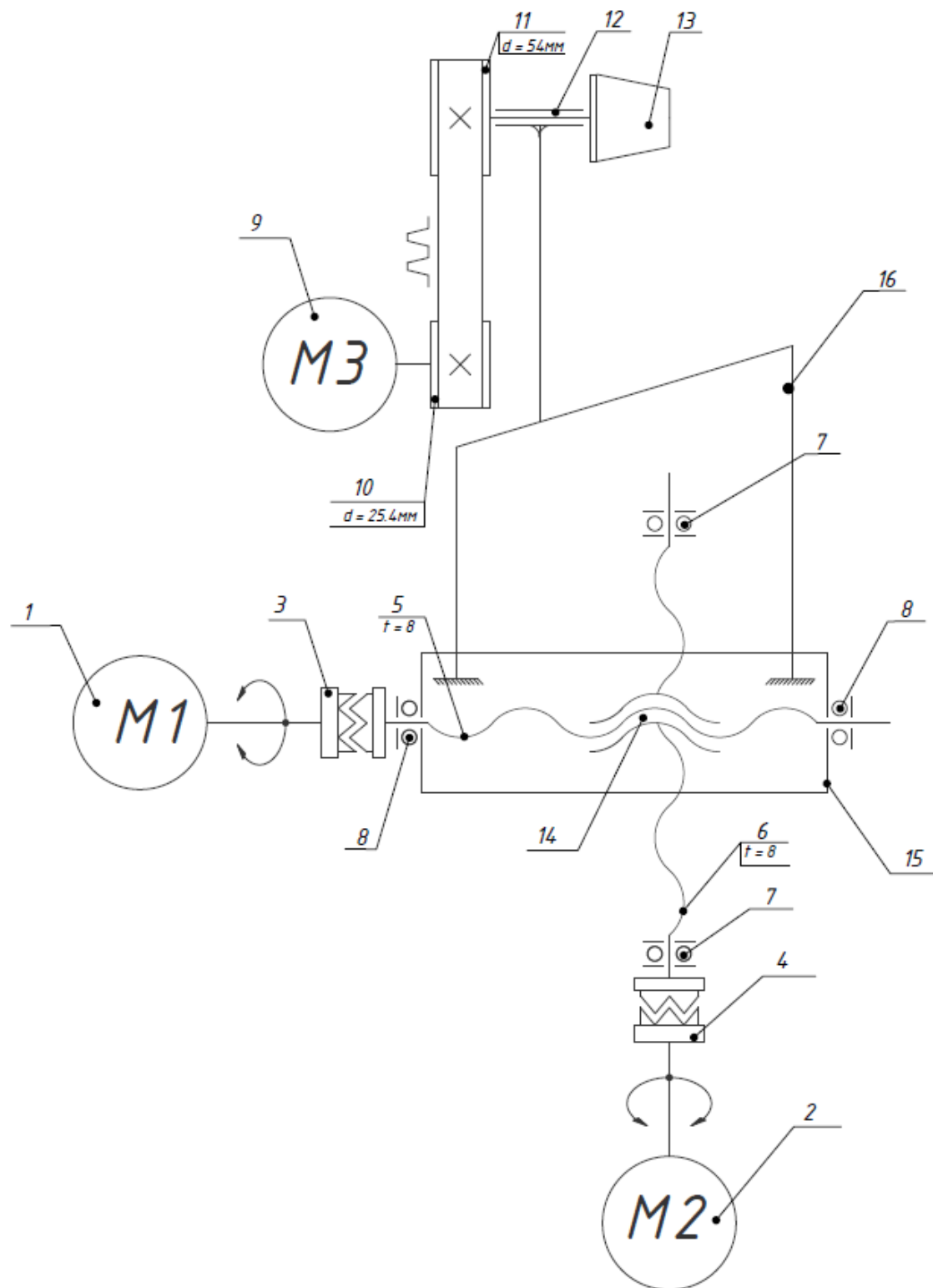


Рис. 2.3. Принципова схема механізованого модулю для виготовлення кільцевих зразків із труби з КМ.

## 2.3. Розрахунок приводу переміщення робочого столу.

### 2.3.1. Розрахунок крокового двигуна.

На сьогоднішній день, крокові двигуни широко застосовуються в механізмах промислових роботів та верстатів [45]. Це можна пояснити їхніми далі приведеними перевагами [46]:

1. Високими показниками точності та стабільності кроку, а також можливістю взаємодії з інерційними навантаженнями
2. При правильному проектуванні та налаштуванні подачі імпульсу сигналів, за-  
для виключення можливості пропуску кроків, немає необхідності у зворот-  
ному зв'язку.
3. Легкість в підключенні та налагодженні.
4. Відносно не висока вартість, порівнюючи з іншими електродвигунами.
5. Надійність, довгий експлуатаційний строк.

Для вибору крокового двигуна слід звернути увагу на такі критерії:

1. Індуктивність. Хоча й високо індуктивні двигуни можуть забезпечити біль-  
ший крутний момент, вони також потребують драйверу з високою напругою  
живлення. Тож під час вибору двигуна варто порахувати квадратний корінь  
індуктивності, і отримане значення помножити на 32. Отриманий результат  
порівнюють із значенням напруги джерела живлення самого драйвера – ці чи-  
сла не мають сильно відрізнятись. Якщо ж напруга живлення буде більшою  
понад 30%, то двигун сильно грітиметься та буде шуміти. А якщо менше, то  
крутний момент різко спадатиме зі швидкістю.
2. Залежність крутного моменту від швидкості. Це дозволить визначити, наскі-  
льки обраний двигун задовольняє умовам ТЗ.
3. Геометричні параметри двигуна.

Експрес розрахунок крокового двигуна. Для розрахунку прийматимемо наступні параметри:

Маса деталі –  $m_d \approx 0,5$  кг;

Маса столу –  $m_c \approx 15.5$  кг;



Сила різання –  $P = 100 \text{ Н}$ ;

Швидкість переміщення –  $V = 0,5 \text{ м/с}$ ;

Необхідне прискорення –  $a = 2 \text{ м/с}^2$ ;

Коефіцієнт тертя в напрямних –  $\mu = 0,2$ .

Щоб розрахувати силу тертя в напрямних за формулою (2.1), коефіцієнт тертя помножити на вагу системи:

$$F_T = \mu g(m_d + m_c) = 0,2 \cdot 9,81 \cdot (0,5 + 15,5) = 31,392 \text{ Н} \quad (2.1)$$

Помноживши масу столу та деталі на необхідне прискорення, можна визначити силу інерції:

$$F_I = a \cdot (m_d + m_c) = 2 \cdot 16 = 32 \text{ Н} \quad (2.2)$$

Для визначення повної сили опору, необхідно знайти суму всіх її складових, а саме: сили тертя, різання та інерції:

$$F_o = F_T + F_I + P = 31,392 + 32 + 1000 = 1063,392 \text{ Н} \quad (2.3)$$

Для розрахунку необхідної потужності двигуна потрібно скористатися формулою (2.4), а для знаходження механічної потужності - формулою (2.5). Оскільки у формулах не фігурує інерція власне двигуна та інших обертових механізмів, то рекомендується [33] змінити вимоги для прискорення на 10%, щоб підвищити точність розрахунків.

$$N = a \cdot (m_d + m_c) = 2,2 \cdot 16 = 35,2 \text{ Н} \quad (2.4)$$

$$N = F_o \cdot V = 1063,392 \cdot 0,5 = 531,696 \text{ Вт} \quad (2.5)$$

Для знаходження крутного моменту крокового двигуна в пристрої через гвинтову передачу, потрібно скористатися розрахунковою схемою рис.2.4.

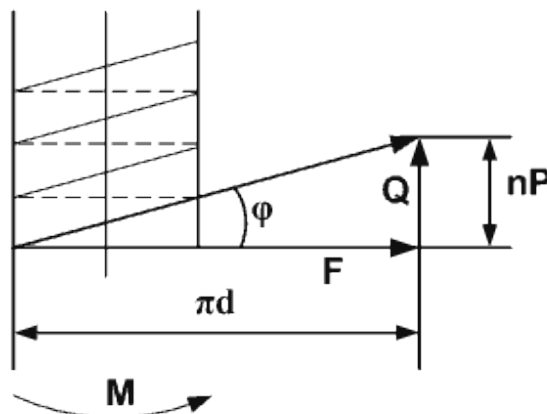


Рис. 2.4. Схема розрахунку для знаходження крутного моменту крокового двигуна у системі з гвинтовою передачею [33]:  $d$  – діаметр гвинта,  $P$  – крок гвинта,  $n$  – кількість заходів гвинта,  $Q$  – осьова сила,  $F$  – сила опору.

Отримуємо:

$$M = F_o \cdot d/2 = 1063.392 \cdot 8 \cdot 10^{-3}/2 = 8.507 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (2.6)$$

За кінцевими розрахунками підбираємо двигун. Найближчим за показниками є кроковий двигун NEMA 23HS8230 (Рис. 2.5.) з наведеними в таблиці 2.1. показниками:



Рис. 2.5. Зображення крокового двигуна NEMA 23HS7628

Таблиця 2.1. Параметри крокового двигуна NEMA 23HS7628

Діаметр вихідного валу	8мм
Довжина	76мм
Фланець	57мм
Підключення	4 проводи
Кількість фаз	2
Номінальний струм	2,8 А
Маса	1,0 кг
Утримуючий момент	20 кг / см

### 2.3.2. Розрахунок приводу робочого столу механізованого модулю.

За необхідними параметрами привід переміщення робочого столу повинен бути автоматичним. Для проведення розрахунку звернемося рекомендацій з джерел [31,32].

За вихідними даними прийняли наступні вихідні параметри:

довжина гвинта –  $L = 500$  мм;

робоча довжина гвинта –  $l = 480$  мм.

крок гвинта –  $t = 2$  мм;

осьове навантаження –  $m = 15$  кг;

За матеріали гвинта приймемо сталь 45, для гайки – бронза.

З конструкторських міркувань вибираємо пару гвинт-гайка з трапецеїдальною різьбою з кутом стандартного профілю  $30^\circ$ . Адже, гвинти з таким профілем різьби технологічні, хоча й радіальне биття утворює погрішність кроку, в даному випадку цим можна знехтувати оскільки воно буде незначним.

Розрахунок середнього діаметра гвинта передачі виконується за умовами зносостійкості (2.7) за джерелами [31,32]:

$$d \approx \sqrt{\frac{Q}{\lambda[\sigma_k]}}, \quad (2.7)$$

де  $\lambda = l/d = 1,5 \dots 4$ ;  $[\sigma_k]$  – допустимий контактний тиск: для точних передач  $[\sigma_k] = 3 \cdot 10^6$  Па, для інших передач  $[\sigma_k] = 5 \cdot 10^6$  Па,  $Q$  – найбільше тягове зусилля.

Тоді тягове зусилля можна знайти за формулою (2.8).

$$Q = mg = 15 \times 9,81 = 147,15 \text{ Н} \quad (2.8)$$

$$d_2 \approx \sqrt{\frac{Q}{\lambda[\sigma_k]}} = \sqrt{\frac{147,15}{1,5 \times 3 \times 10^6}} = 5,718 \text{ мм}$$

Розрахований діаметр  $d_2$  слід узгодити з параметрами стандартної різьби.

Руйнування різьби зустрічається доволі рідко, тому розрахунки гвинтів на міцність проводять тільки при дії значних осьових навантажень. У нашому випадку,

гвинт сприймає незначне осьове навантаження, тому даний розрахунок немає потреби проводити.

Уточнюємо номінальний діаметр різьби згідно ISO 2901.

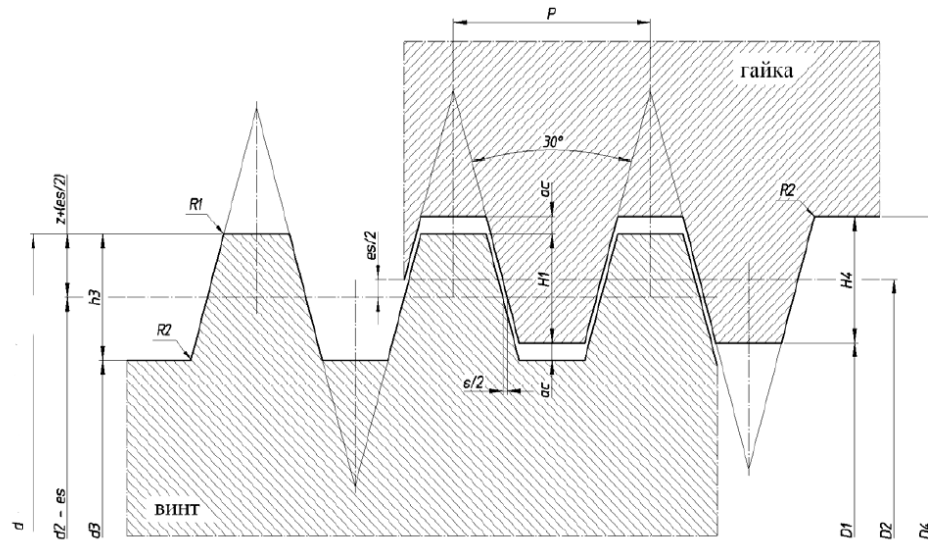


Рис. 2.9. Параметри трапецеїдальної різьби за ISO 2901 [34].

Визначаємо номінальний діаметр  $d$  різьби за формулами (2.9)

$$d = d_2 + 0,5P = 5,718 + 0,5 \times 2 = 6,718 \text{ мм} \quad (2.9)$$

Найближче більше значення зі стандартного ряду різьб – це Tr 8 x 2.

За формулами (2.10 – 2.11) можна розрахувати висоту гайки, виходячи з умови міцності гайки за напруженнями зрізу:

$$\tau_{зр} = \frac{F_a}{\pi d k H} \leq [\tau_{зр}] \quad (2.10)$$

де  $d$  – номінальний діаметр різьби;  $k$  – коефіцієнт повноти різьби (Для трикутних різьб  $k=0,87$ ; для трапецеїдальних –  $k=0,65$ ; для прямокутних –  $k=0,5$ );  $H$  – висота гайки.

Максимально допустиме напруження  $[\tau_{зр}] = (25...30) \text{ МПа}$  – для бронзових гайок  
 $[\tau_{зр}] = (45...50) \text{ МПа}$  – для чавунних гайок.

Звідси :

$$H = \frac{F_a}{\pi d k \tau} = \frac{147,15}{\pi \cdot 8 \cdot 10^{-3} \cdot 0,65 \cdot 25 \cdot 10^6} = 7,78 \text{ мм} \quad (2.11)$$

Згідно з ISO 2901 отримуємо гвинт та за розрахованими параметрами вибираємо габаритні параметри гайки.

### **2.3.3. Вибір напрямних**

Більшість рухомих вузлів у механізмах, для забезпечення високої точності виконуваних робіт рухаються по напрямним. Тому вибір напрямних і їх своєчасне обслуговування являється одним з ключових факторів ефективності роботи механізму.

При виборі напрямних для даного механізованого модулю за рекомендаціями джерелами [35] було враховано наступні вимоги:

- забезпечення високої жорсткості, не залежно від показників довжини;
- низький рівень впливу на кінцеву похибку обробки;
- низький коефіцієнт тертя;
- мінімальна потреба в змащувальних матеріалах;
- високий опір зношуванню;

Найкраще задовольняють даним умовам профільні рельсові напрямні. Вони забезпечують високу точність, прямолінійність, високу зносостійкість та мінімальним зазором (або його відсутністю) кріпляться безпосередньо до станини (в нашому випадку до профілю). Оскільки у профільних напрямних виконані спеціальні доріжки кочення, навантаження на каретку розподіляється рівномірно по всій робочій поверхні доріжок кочення.

Оскільки конструкція механізму не є великою, але є необхідність забезпечити точність переміщення, з конструктивних міркувань було вибрано лінійні напрямні виробника «HIWIN» серії MGN моделі 12H (Рис. 2.10). Технічні характеристики вибраних лінійних рельсових напрямних згідно з даними каталогу виробника [36] наведено в таблиці 2.2. На рисунку 2.11. показано схему навантажень напрямних.

Таблиця 2.2. Технічні характеристики напрямних HIWIN MGN 12H.

Основне динамічне навантаження (кН)	Основне статичне навантаження (кН)	Статичний момент			Вага	
		$M_R$ (Нм)	$M_P$ (Нм)	$M_Y$ (Нм)	Каретки (кг)	Напрямної (кг/м)
3,72	5,88	38,22	36,26	36,26	0,054	0,65

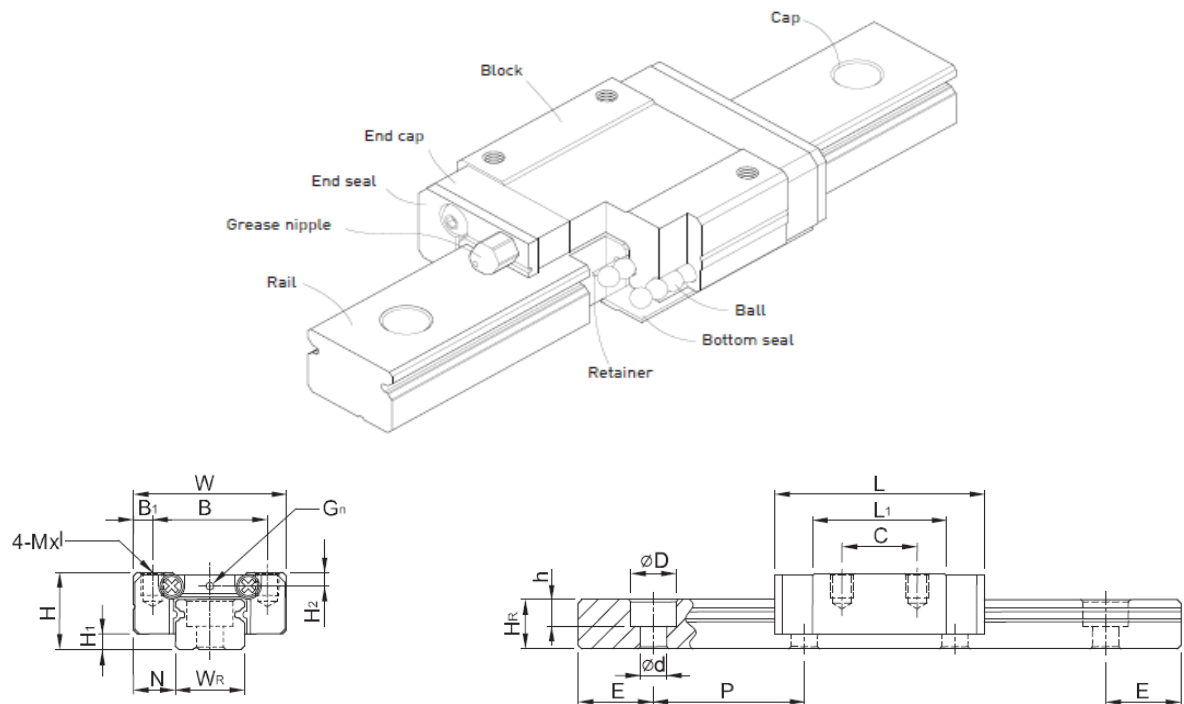


Рис. 2.10. Напрямні HIWIN серії MG.

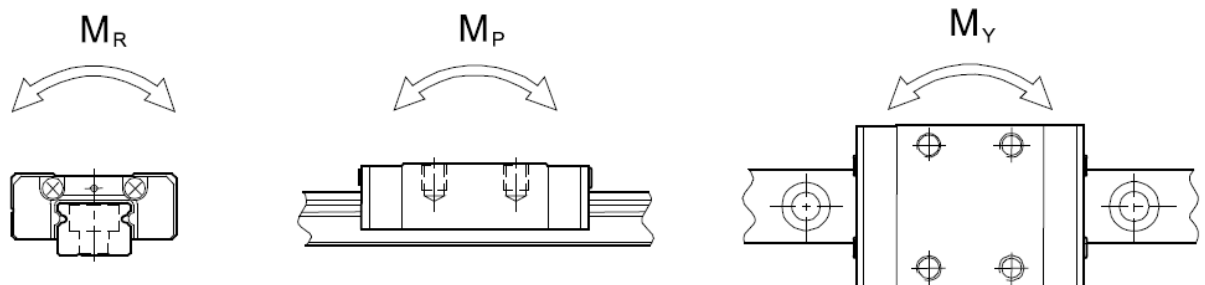


Рис.2.11. Пояснювальна схема прикладених до напрямних моментів

### **Висновки до розділу**

1. Розроблено кінематичну схему механізованого модулю для виготовлення кільцевих зразків з композиційної труби.
2. Вибрано оптимальний кут нахилу заготовки для виготовлення кільцевих зразків за допомогою лазера.
3. Проведено розрахунки приводів основних приводних вузлів механізованого модулю.
4. Вибрано основні несучі елементи конструкції.
5. Потрібно створити конструкцію хрестового столу та додаткового приводу обертання заготовки, провести аналіз напружено-деформованого стану головних вузлів системи.
6. Провести дослідження поширення тепла в заготовці під час лазерної, або струминно-лазерної обробки.

### 3. Конструкція механізованого модулю та перевірка основних вузлів у віртуальному середовищі

#### 3.1. Загальний вигляд механізованого модулю.

Загальний вигляд механізованого модулю технологічного оснащення з пристроєм для виготовлення дослідних зразків із композиційної труби зображено на рис. 3.1.

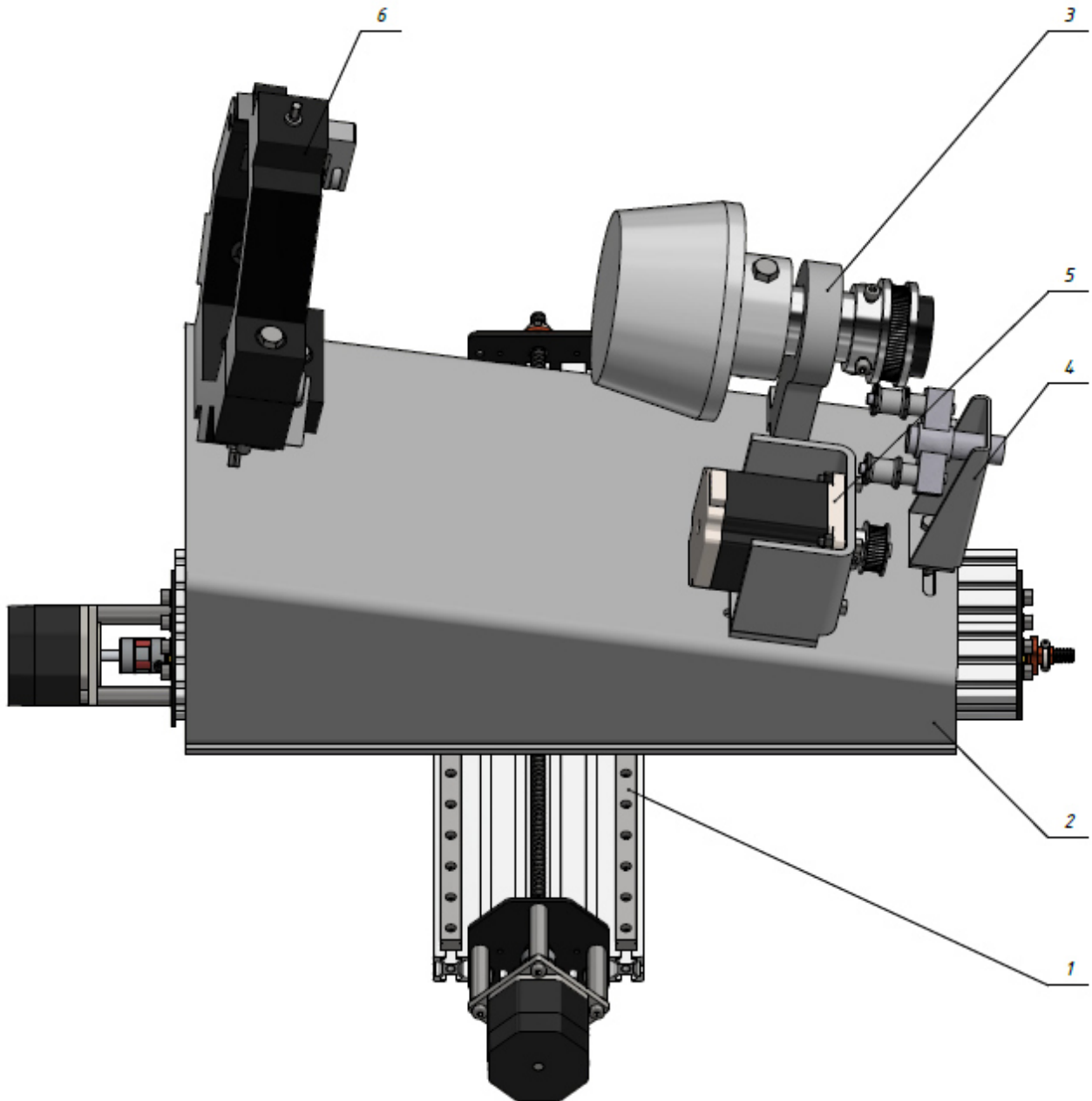


Рис. 3.1. 3D модель механізованого модулю.



З раціональних міркувань, модуль поділено на 6 функціональних частин: 1 – автоматизований хрестовий стіл, що забезпечує рух у повздовжньому та поперечному напрямках; 2 – плита виконана з листового матеріалу, на яку монтуються вузол обертання заготовки – 3, привід обертання – 5, та механізм натягу зубчатого ременя – 4. Для фіксації заготовки в осьовому напрямі встановлено люнет – 6. Які є мало залежними одна від одної, задля дотримання модульності та збереження універсальності установки. Таким чином, хрестовий стіл може використовуватися абсолютно незалежно з іншим устаткуванням. Оскільки основа є змінною, та складною для виготовлення, тому замінюючи її, можна змінювати кут нахилу осі обертання заготовки. Механізм натягу ременю 4, є доволі також дешевим та простим в реалізації, і може використовуватися в інших вузлах. Люнет 6 виконаний з пластику, щоб не навантажувати всю систему, може застосовуватися з іншим оснащенням.

На рис. 3.2. представлено загальний вигляд механізованого модулю для виготовлення дослідних кільцевих зразків КМ. Основа встановлюється на стіл симетрично, осі гвинта, щоб запобігти перекосів, а також для забезпечення однакового переміщення в обидві сторони вздовж осі.

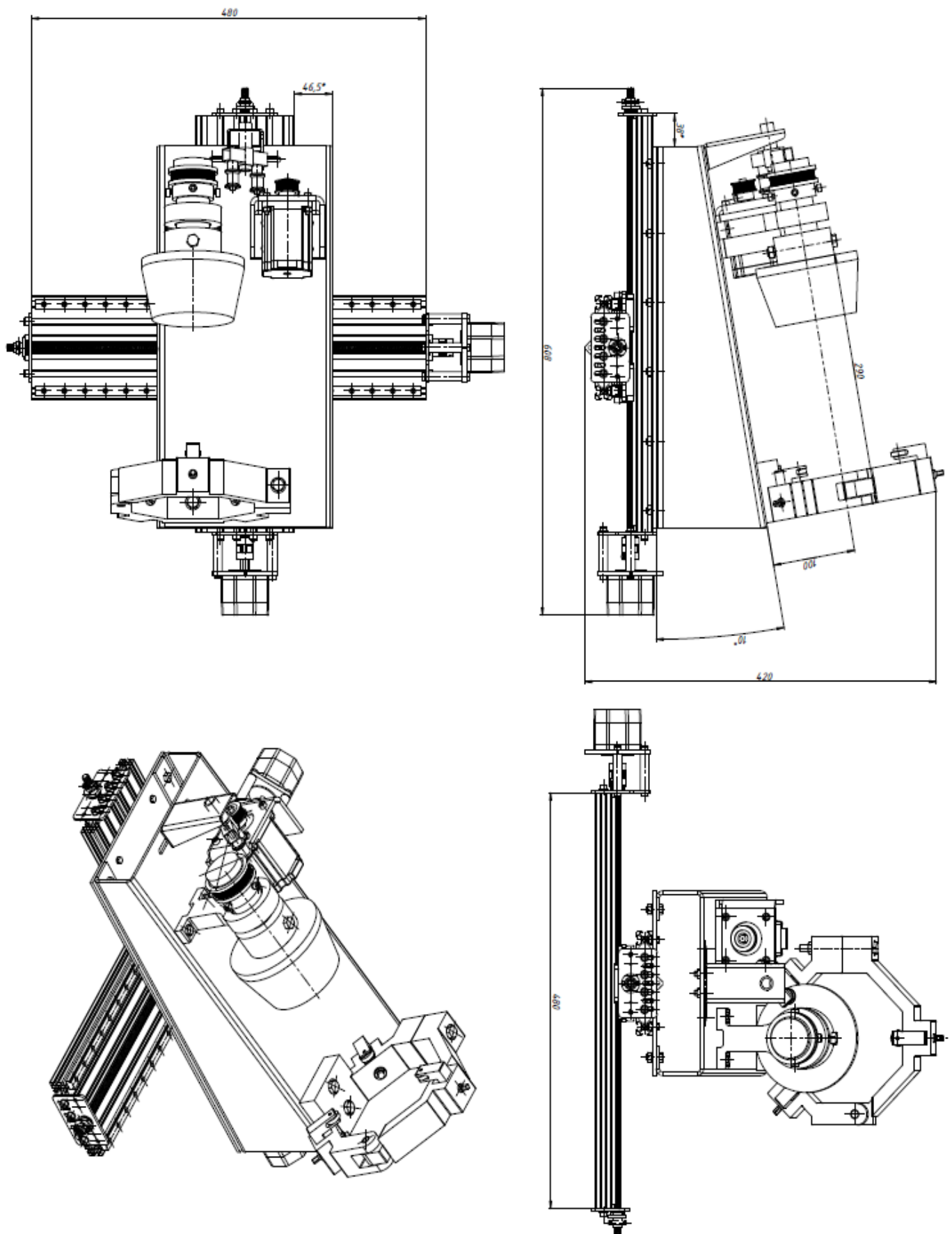


Рис. 3.2. Загальний вид механізованого модулю

### 3.2. Приводи переміщення хрестового стола

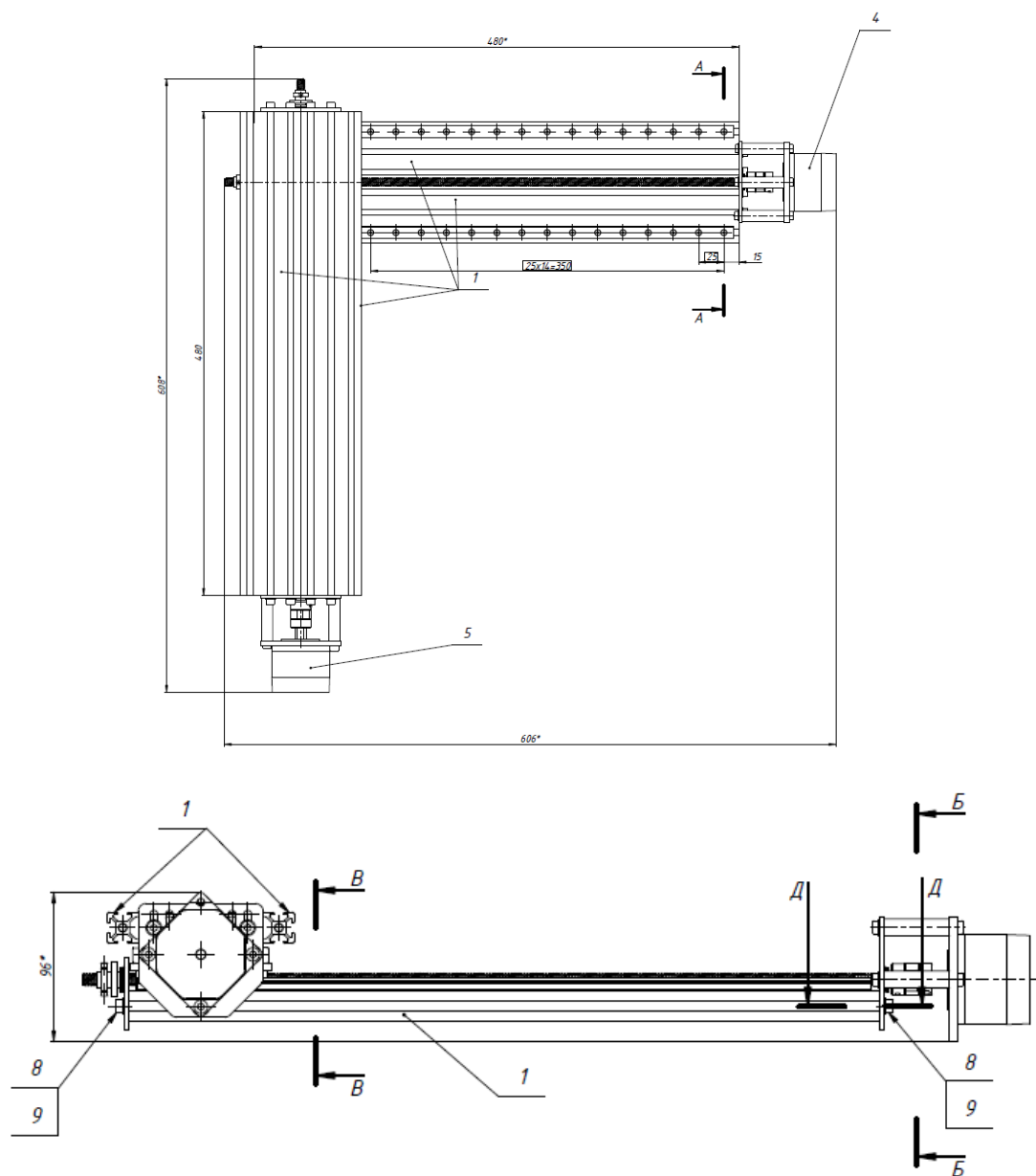
Конструкцію приводів хрестового робочого столу (рис. 3.3) наведено на рис. 3.4.

Приводи хрестового столу є ідентичними. Вони складаються з двох алюмінієвих профілів t-track 20x60 L = 480 мм, паралельно закріплених гвинтами 9 до монтувальних пластин (розріз Б – Б). Одна з пластин є основною, до якої кріпиться двигун, інша є фіксуючою. Обидві пластини є покупними деталями і підбираються під певний кроковий двигун. Лінійні напрямні (HIWIN MGN 12, L = 470 мм) кріпляться до алюмінієвого профілю за допомогою Т-гайок – 6, та гвинтів 7 (розріз А – А на рис. 3.3.). На монтувальній платі 3, розміщено каретки для напрямних 2, а також гайки для гвинтів 4 та 5 (розріз В – В, на рис. 3.3).

Моменти від крокових двигунів через кулачкові муфти (BF 25) передаються на гвинти, які встановлені в підшипниках (F8-16M) в проточках пластин. Натяг у підшипниках утворюється шляхом шліфування торців втулки та гайки, що фіксується гвинтами на ходовому гвинті. Під час кареток на монтувальну плату, необхідно забезпечити співвісність з напрямними. Зазор між кареткою та напрямною змащується мастильною рідиною. Також необхідно забезпечити високу точність поверхні профілю, на який будуть монтуватися напрямні.



Рис. 3.3. 3D-модель хрестового столу



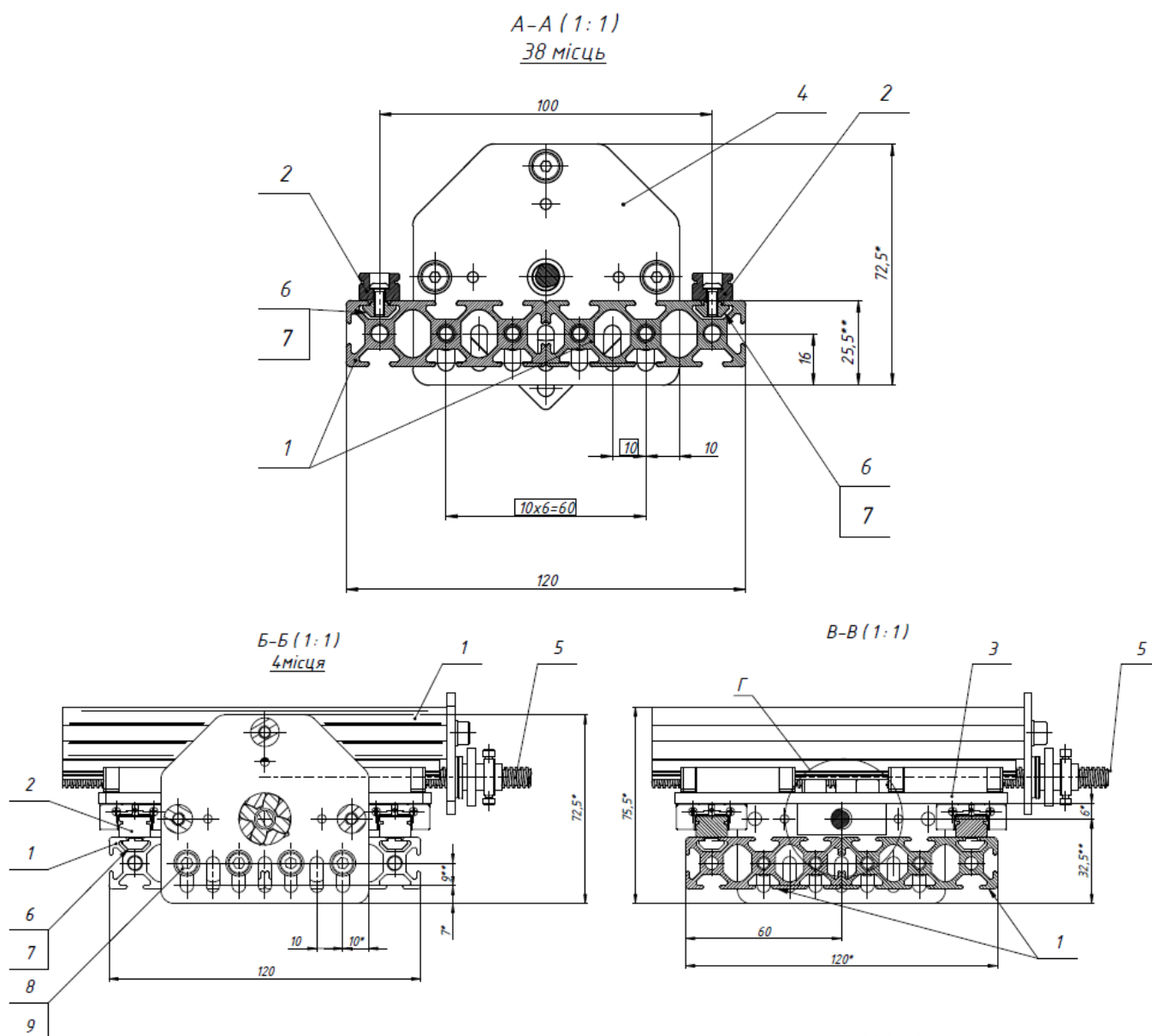


Рис. 3.3. Приводи переміщення хрестового столу.

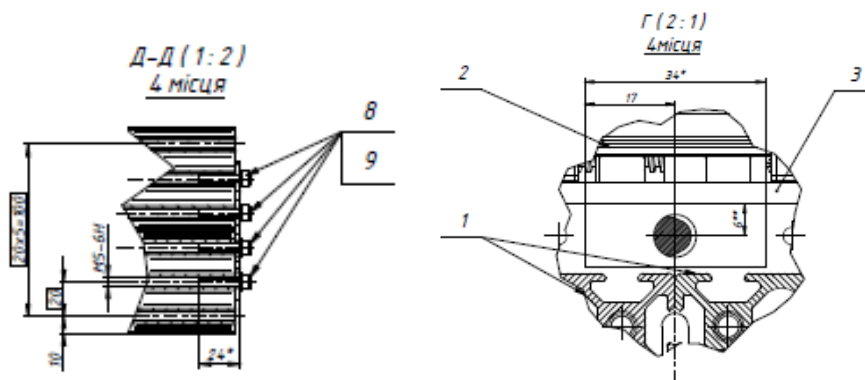


Рис. 3.3. Приводи переміщення хрестового столу (закінчення).

### 3.3. Додатковий привід повороту для виготовлення кільцевих зразків

Загальна конструкція додаткового приводу повороту наведена на рис. 3.4.

Привод повороту складається з плити 1, що безпосередньо монтується на стіл. Поверх плити встановлюється похила основа 2, виконана гнбкою з листового металу товщиною 4 мм (рис. 3.5). Це забезпечить дешевизну конструкції та простоту виконання, не втративши при цьому необхідних параметрів: точності та жорсткості.

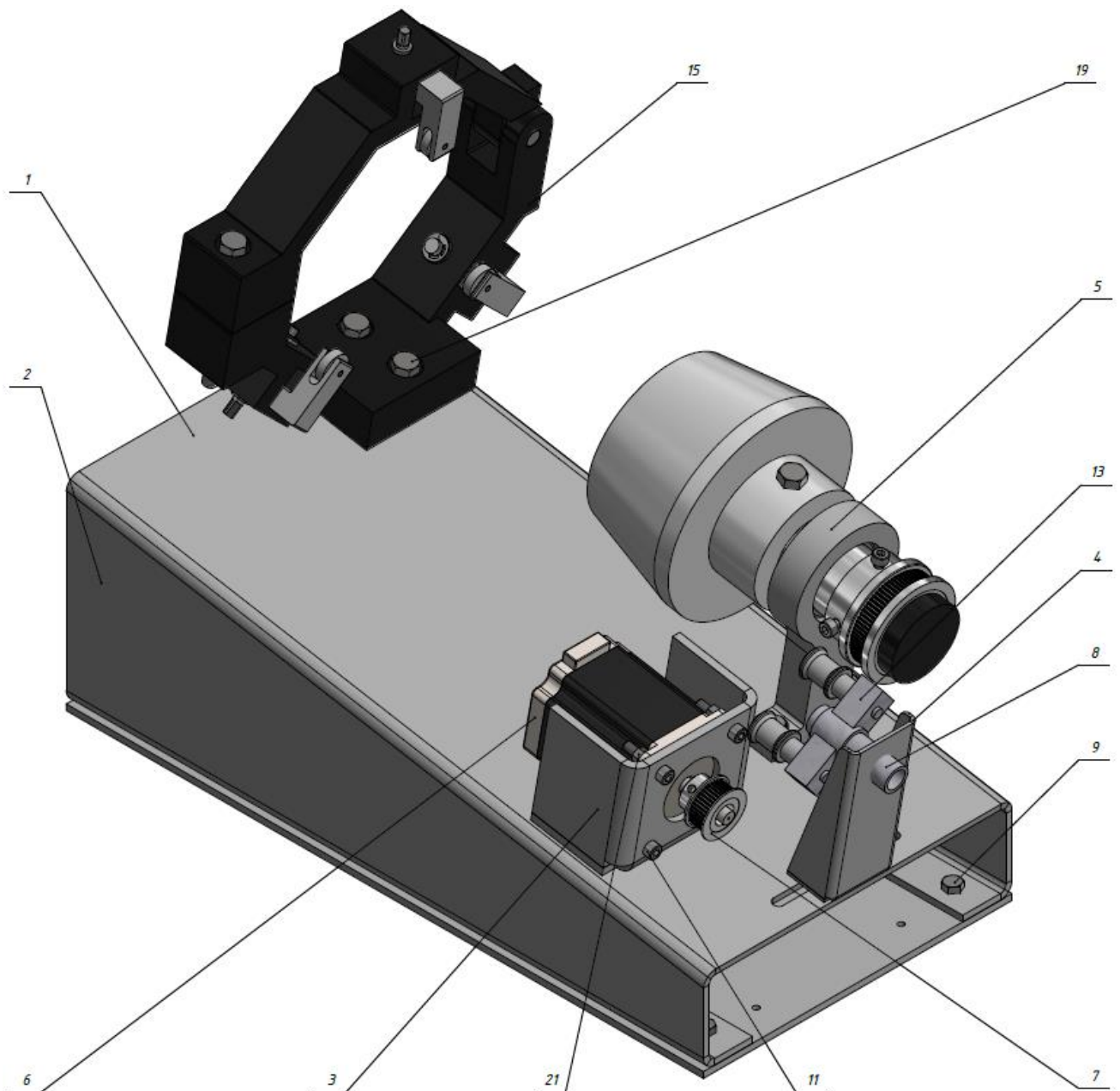


Рис. 3.4. 3D – модель додаткового приводу повороту заготовки.

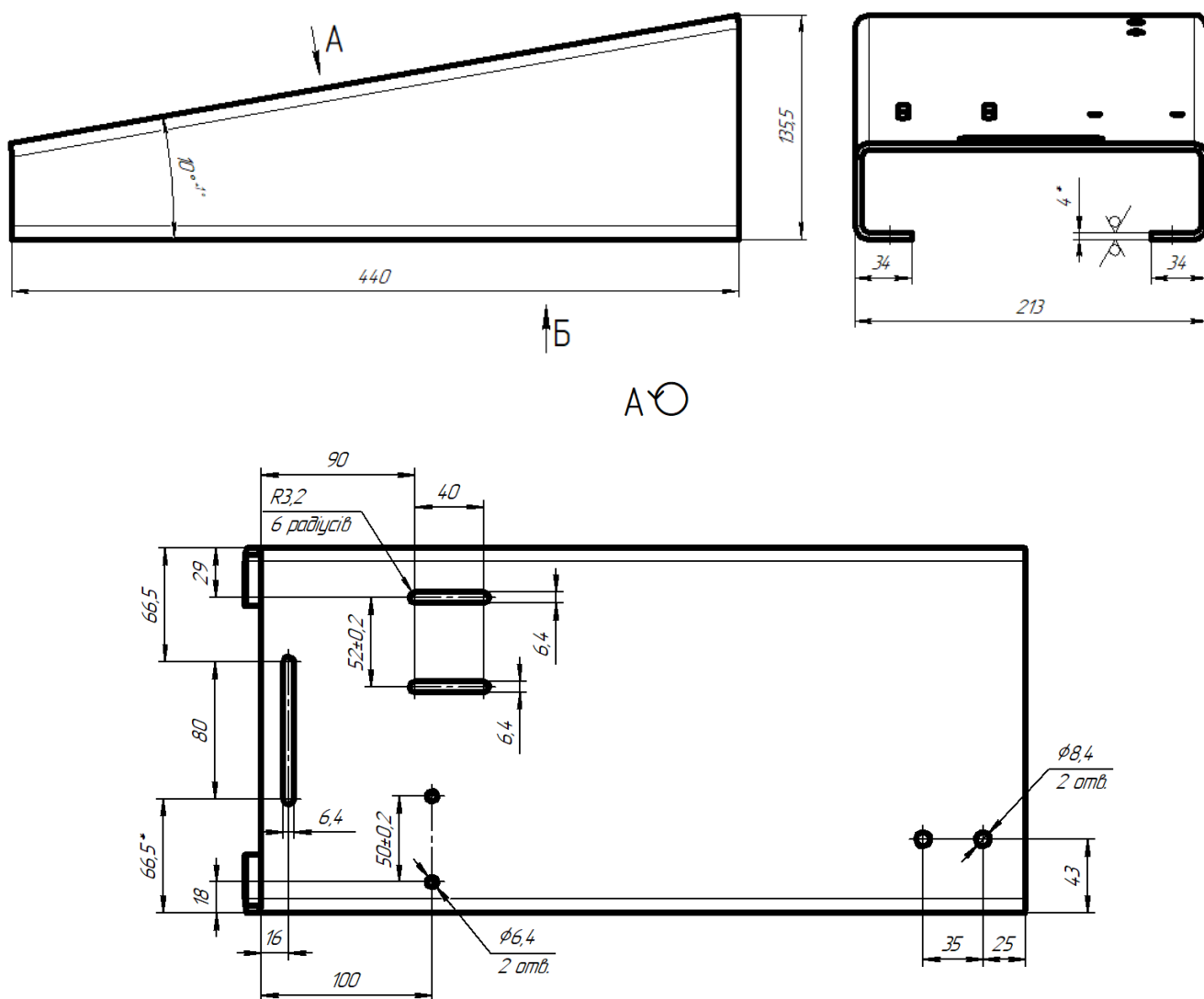


Рис. 3.5. Похила основа додаткового приводу повороту

Крутний момент передається від крокового двигуна 6, закріпленого на кронштейні 3, гвинтами 11, до механізму обертання заготовки 5, шляхом зубчато-ремінної передачі, також використовується пружинно-кулісний механізм натягу ремню 8. Під час монтування важливо забезпечити співвісність шківів на валу двигуна та валу обертання заготовки. Заготовка закріплюється на конічній оправці, та підтримується за допомогою лунету з рухомими роликами.

### 3.4. Динамічне моделювання робочого столу у віртуальному середовищі Autodesk Inventor

Методика моделювання, використовуючи відповідний модуль ПЗ Autodesk Inventor приведена в джерелах [37, 38]. Оскільки до складу механізованого модулю входить багато різноманітних компонентів та з'єднань, що роблять модель складнішою, а також збільшують час розрахунку, було б доцільним провести розрахунок динаміки роботи хрестового столу, адже на приводи цього вузла припадає найбільше прискорення та переміщення мас. Тому, відповідно до рекомендацій та прикладів розрахунків, наведених у вище зазначених джерелах виконаємо наступне динамічне моделювання.

У віртуальному середовищі для динамічного моделювання редагуємо з'єднання елементів згідно рекомендацій з джерел [37,38]. Зокрема в «Рухомих групах» залишаємо лише деталі стіл та каретка, у «Фіксованих» залишаємо напрямні та каретку.

Створюємо необхідні стандартні з'єднання між елементами:

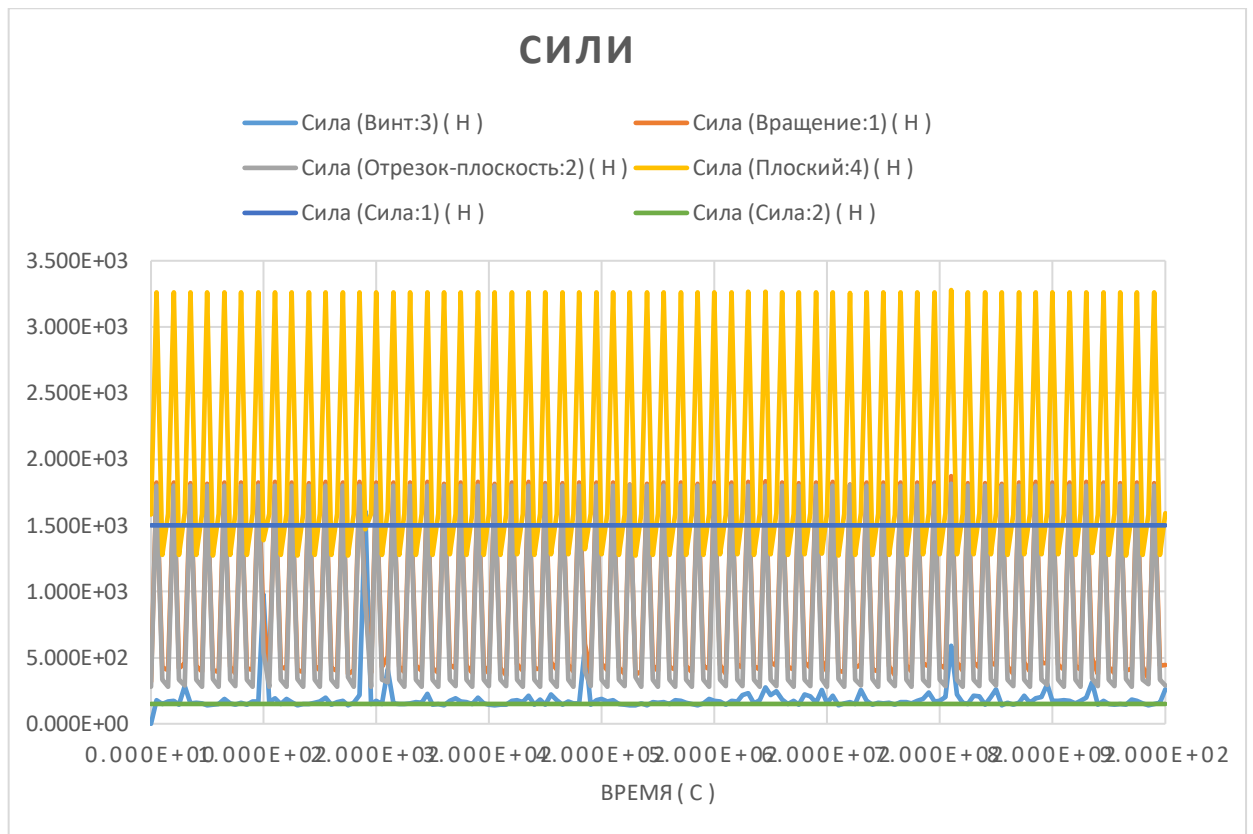
- «Вращение: 1» між опорами гвинта та самим гвинтом;
- «Винт:5» для відтворення руху гвинт-гайка використовуємо з'єднання з вказанням кроку передачі  $t = 2$  мм.

Задаємо навантаження. В параметрах «Зовнішні навантаження», задано наступні сили:

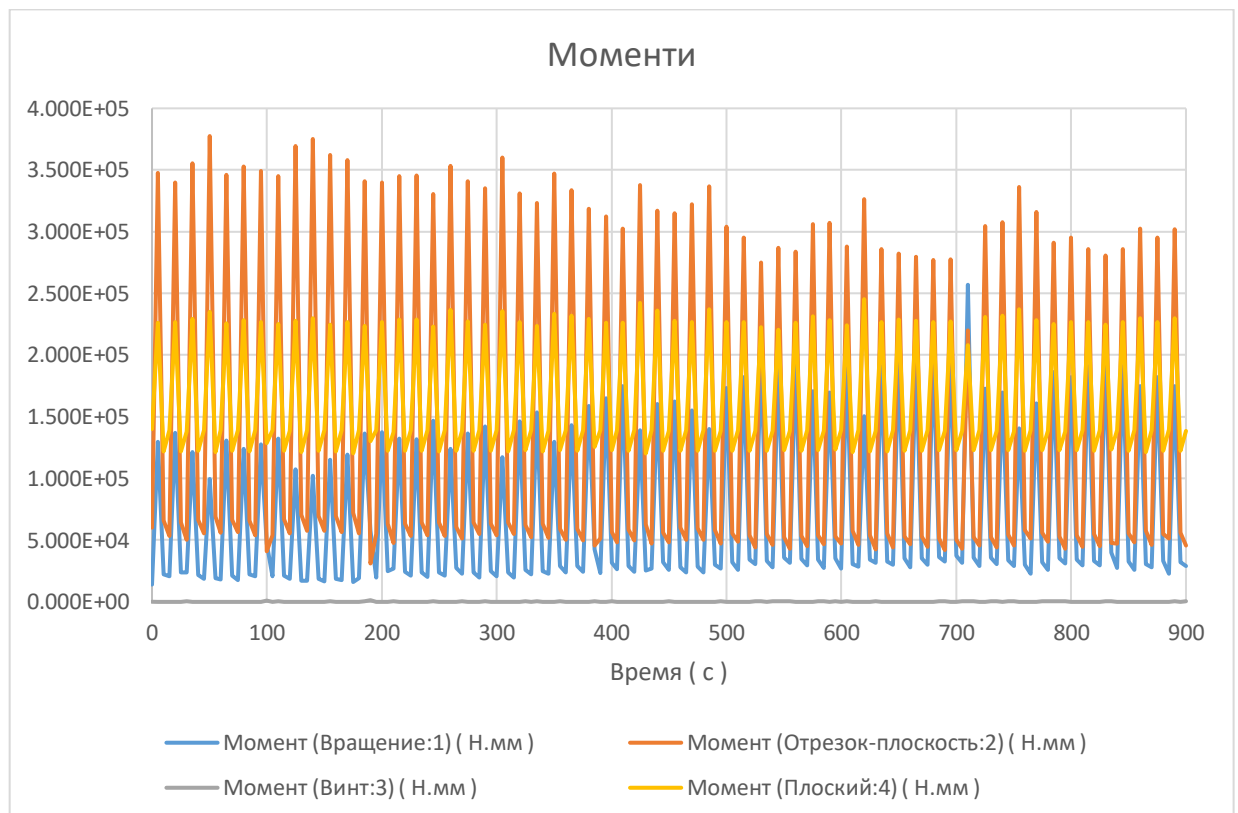
- «Сила тяжіння» – сила тяжіння, яка прикладена до моделі;
- «Сила: 1» – робоче навантаження столу ( $F \approx 150$  Н);
- «Сила: 2» – навантаження опору руху, що виникає із-за похибок при складанні ( $F \approx 0.3$  кН)

В результаті виконання моделювання було отримано наступні графіки діючої навантажень, що виникають в наслідок сил та моментів (рис. 3.6). Відповідно до даних графіків можна визначити найбільш навантажені вузли та деталі. А саме, в даному випадку потрібно було перевірити ходовий гвинт та напрямні.





а)



б)

Рис. 3.6. Залежності навантажень, що виникають у з'єднаннях від тривалості циклу: а) сили; б) моменти.

Детальна витримка результатів моделювання ходового гвинта наведена в таблиці 3.1. Також на рис 3.7. – 3.9. приведено інтерактивні розрахунки напружено-деформованого стану гвинта.

Таблиця 3.1. Результати напружено-деформованого стану гвинту.

Имя	Минимальная	Максимальная
Объем	33730,7 мм <sup>3</sup>	
Масса	0,16147 кг	
Напряжение по Мизесу	0,35939 МПа	52,0577 МПа
1-ое основное напряжение	-16,3334 МПа	60,2553 МПа
3-е основное напряжение	-67,0014 МПа	11,4733 МПа
Смещение	0 мм	0,0353326 мм
Коэфф. запаса прочности	5,29796 бр	15 бр
Напряжение XX	-54,9261 МПа	51,5085 МПа
Напряжение XY	-18,4037 МПа	21,586 МПа
Напряжение XZ	-21,0646 МПа	19,0146 МПа
Напряжение YY	-28,4095 МПа	20,8493 МПа
Напряжение YZ	-13,7441 МПа	8,83143 МПа
Напряжение ZZ	-23,9163 МПа	20,8706 МПа
Смещение по оси X	-0,0201274 мм	0 мм
Смещение по оси Y	-0,0286813 мм	0,0280729 мм
Смещение по оси Z	-0,0279519 мм	0,0287389 мм
Эквивалентная деформация	0,00000155807 бр	0,000235624 бр
1-ая основная деформация	0,0000000665482 бр	0,000273107 бр
3-я основная деформация	-0,000277247 бр	-0,000000156588 бр
Деформация XX	-0,000210188 бр	0,000224096 бр
Деформация XY	-0,000118428 бр	0,000138906 бр
Деформация XZ	-0,000135551 бр	0,000122359 бр
Деформация YY	-0,0000733696 бр	0,0000658913 бр
Деформация YZ	-0,0000884431 бр	0,0000568302 бр

Деформація ZZ	-0,0000675501 бр	0,000074742 бр
---------------	------------------	----------------

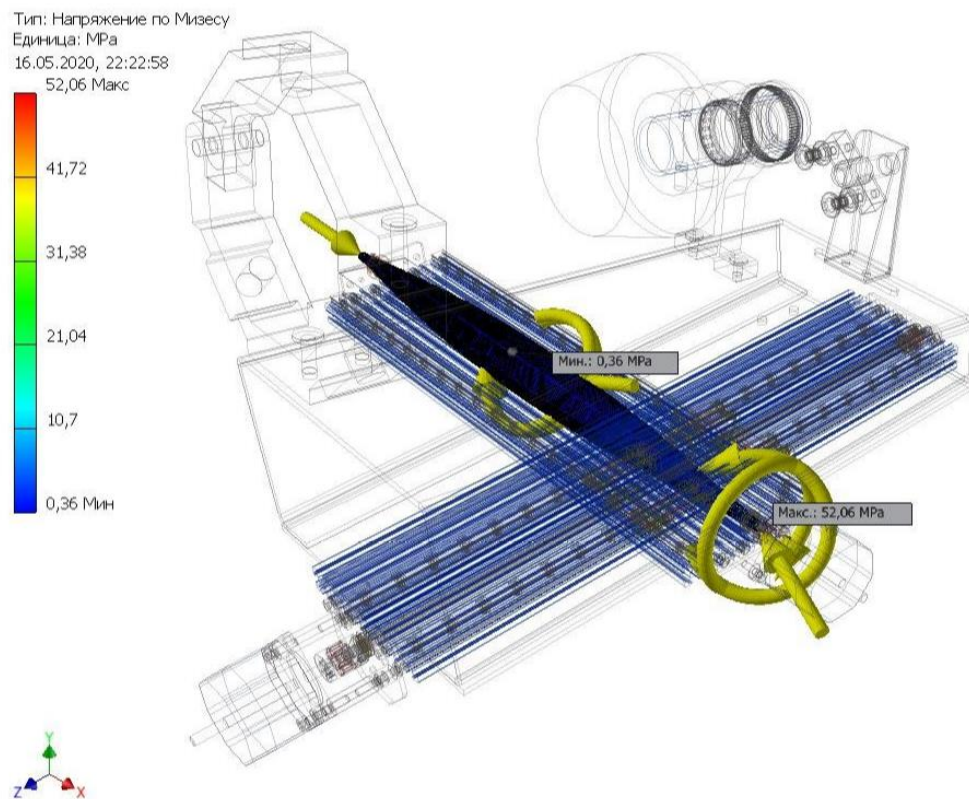


Рис. 3.7. Напруження за Мізесом (ходовий гвинт).

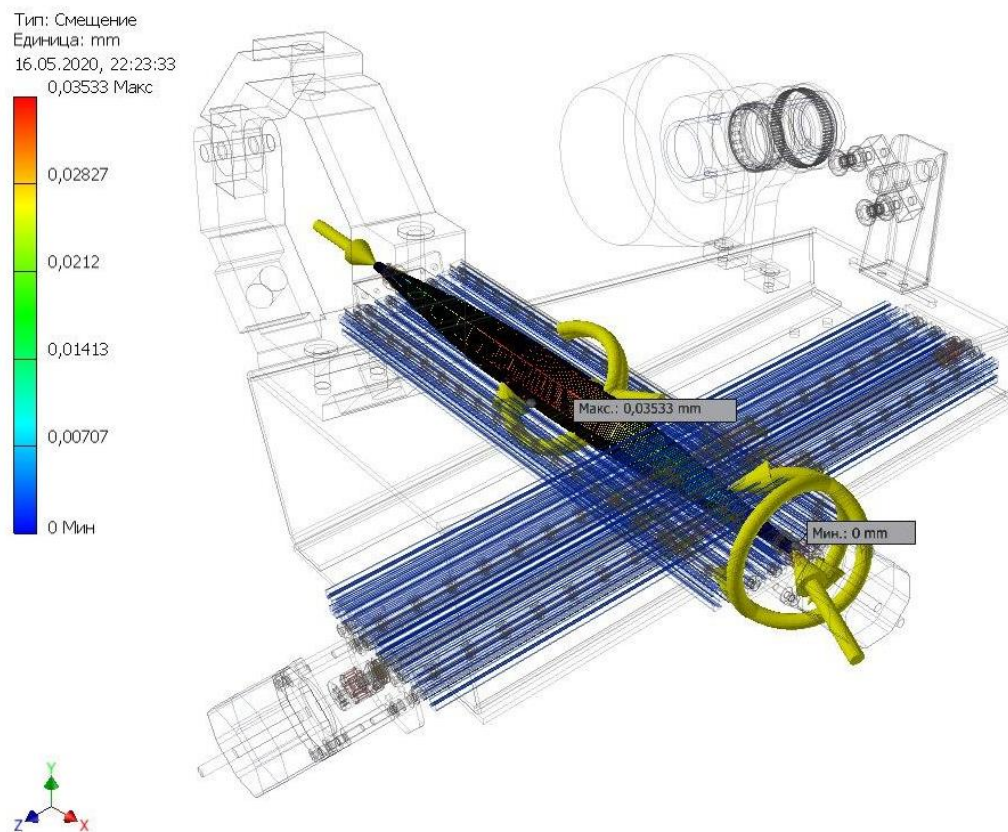


Рис. 3.8. Зміщення (ходовий гвинт).

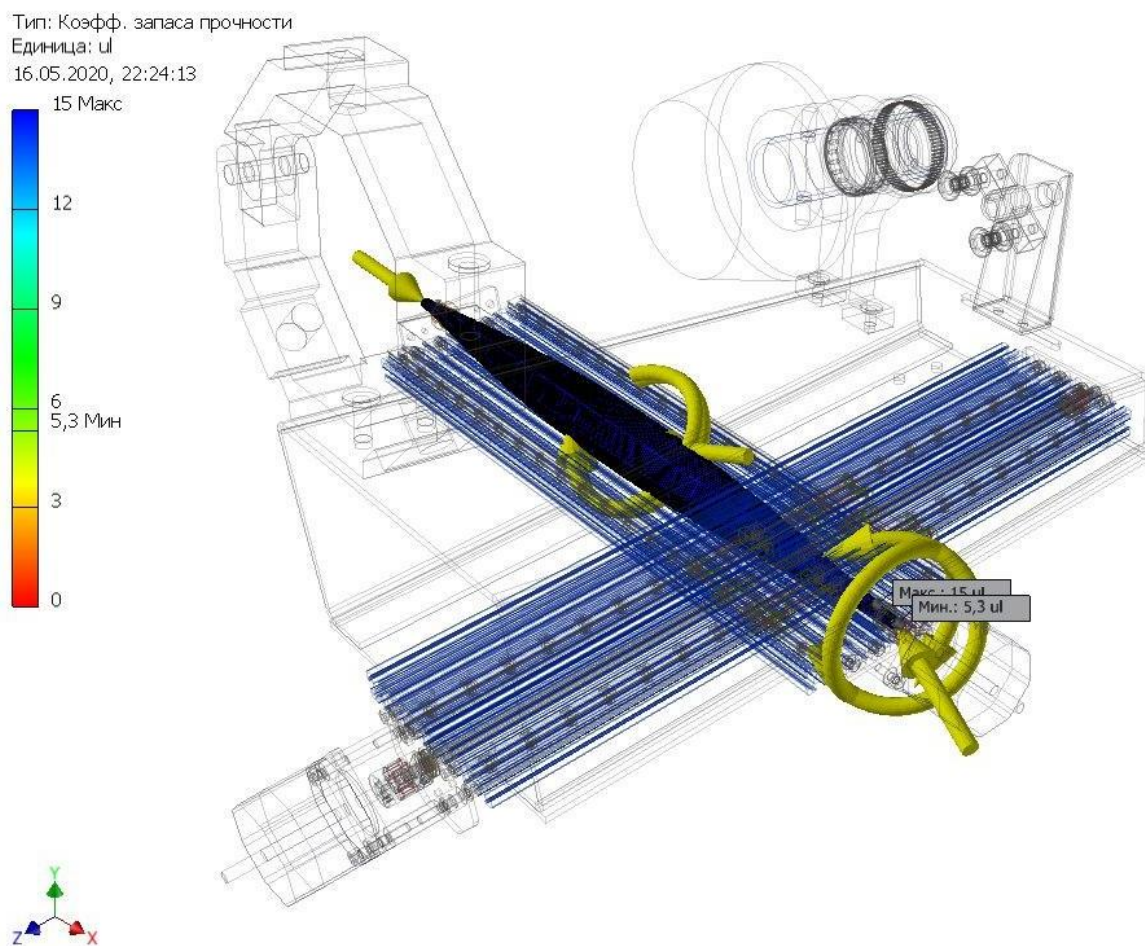


Рис.3.9. Коэффициент запаса прочности (ходовый гвинт).

Витримка результатів моделювання лінійних напрямних представлена в таблиці 3.2. На рис 3.10. – 3.12. показано розрахунки напружено-деформованого стану напрямної.

Таблиця 3.2. Результати напружено-деформованого стану напрямної

Имя	Минимальная	Максимальная
Объем	53853,4 мм <sup>3</sup>	
Масса	0,319433 кг	
Напряжение по Мизесу	0,117885 МПа	33,5859 МПа
1-ое основное напряжение	-10,6905 МПа	43,014 МПа
3-е основное напряжение	-41,3303 МПа	11,0635 МПа
Смещение	0 мм	0,000735344 мм
Коэфф. запаса прочности	8,21179 бр	15 бр
Напряжение XX	-14,1806 МПа	14,71 МПа



Напряжение XY	-2,84348 МПа	6,08247 МПа
Напряжение XZ	-2,47196 МПа	2,23445 МПа
Напряжение YY	-41,0905 МПа	42,2401 МПа
Напряжение YZ	-8,90757 МПа	9,96936 МПа
Напряжение ZZ	-11,6546 МПа	12,9181 МПа
Смещение по оси X	-0,000128 мм	0,000113272 мм
Смещение по оси Y	-0,000645274 мм	0,000606416 мм
Смещение по оси Z	-0,000418495 мм	0,0000287784 мм
Эквивалентная деформация	0,00000104726 бр	0,000157488 бр
1-ая основная деформация	-0,0000000717352 бр	0,00018593 бр
3-я основная деформация	-0,000175112 бр	0,00000014637 бр
Деформация XX	-0,000027284 бр	0,0000274745 бр
Деформация XY	-0,0000182978 бр	0,0000391407 бр
Деформация XZ	-0,0000159071 бр	0,0000143787 бр
Деформация YY	-0,000175053 бр	0,00018095 бр
Деформация YZ	-0,0000573202 бр	0,0000641528 бр
Деформация ZZ	-0,0000463334 бр	0,00004565 бр

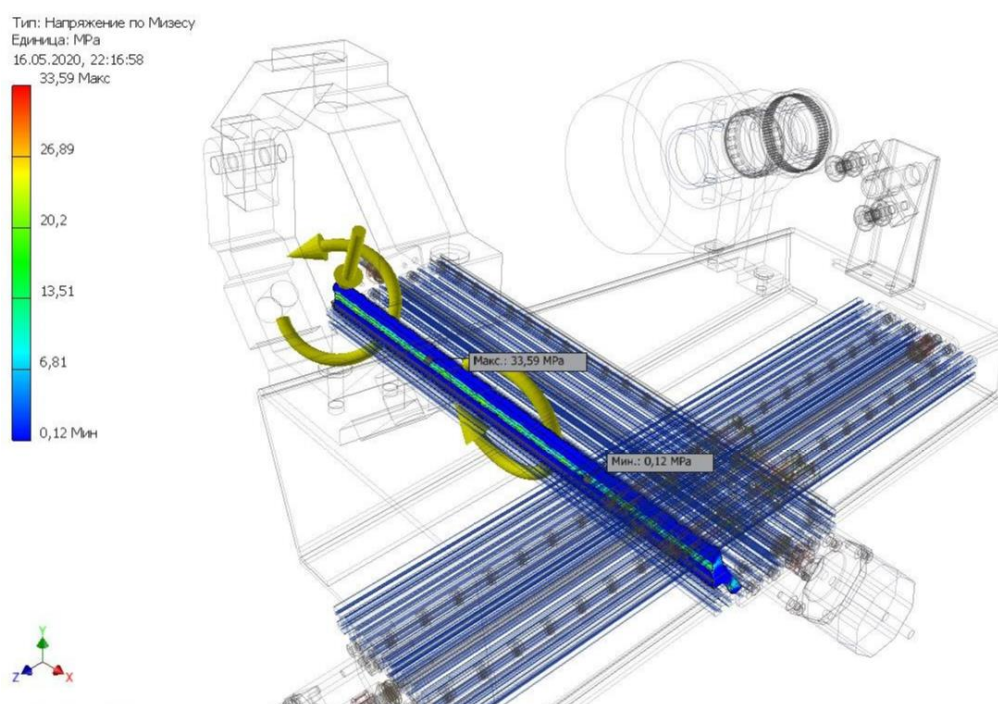


Рис. 3.10. Напруження за Мізесом (напрямна).

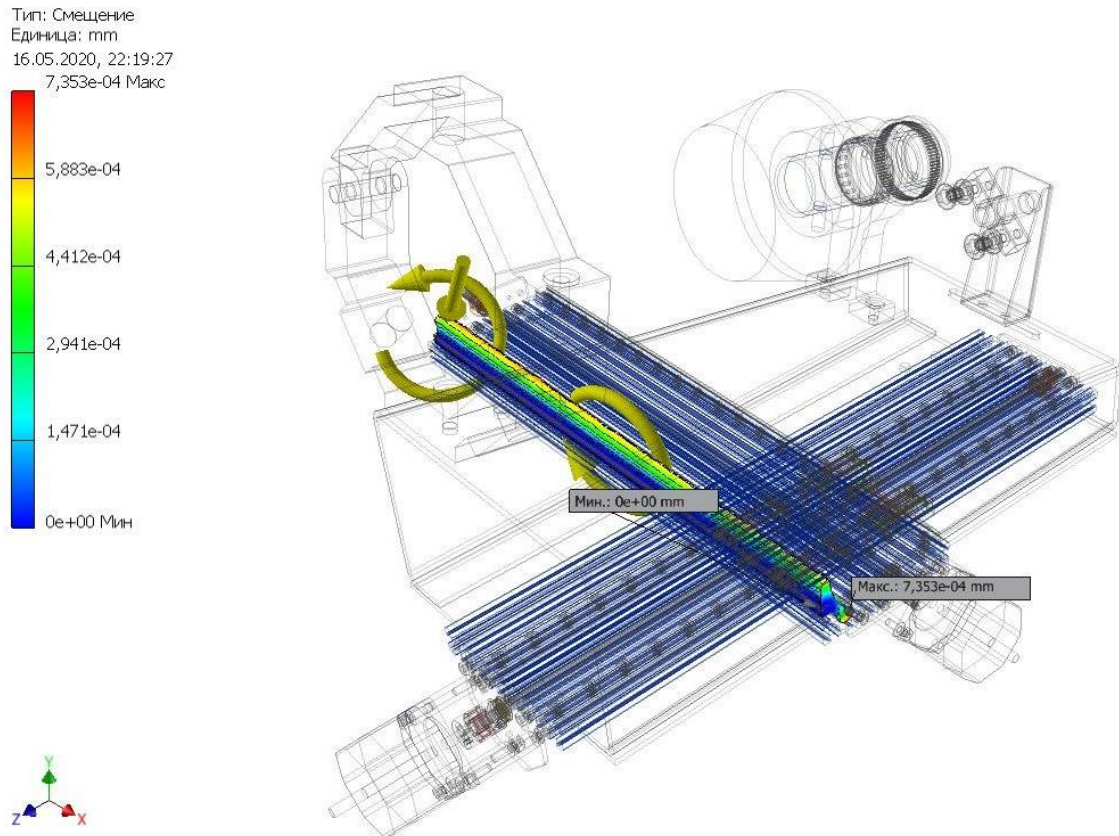


Рис. 3.11. Зміщення (напрямна).

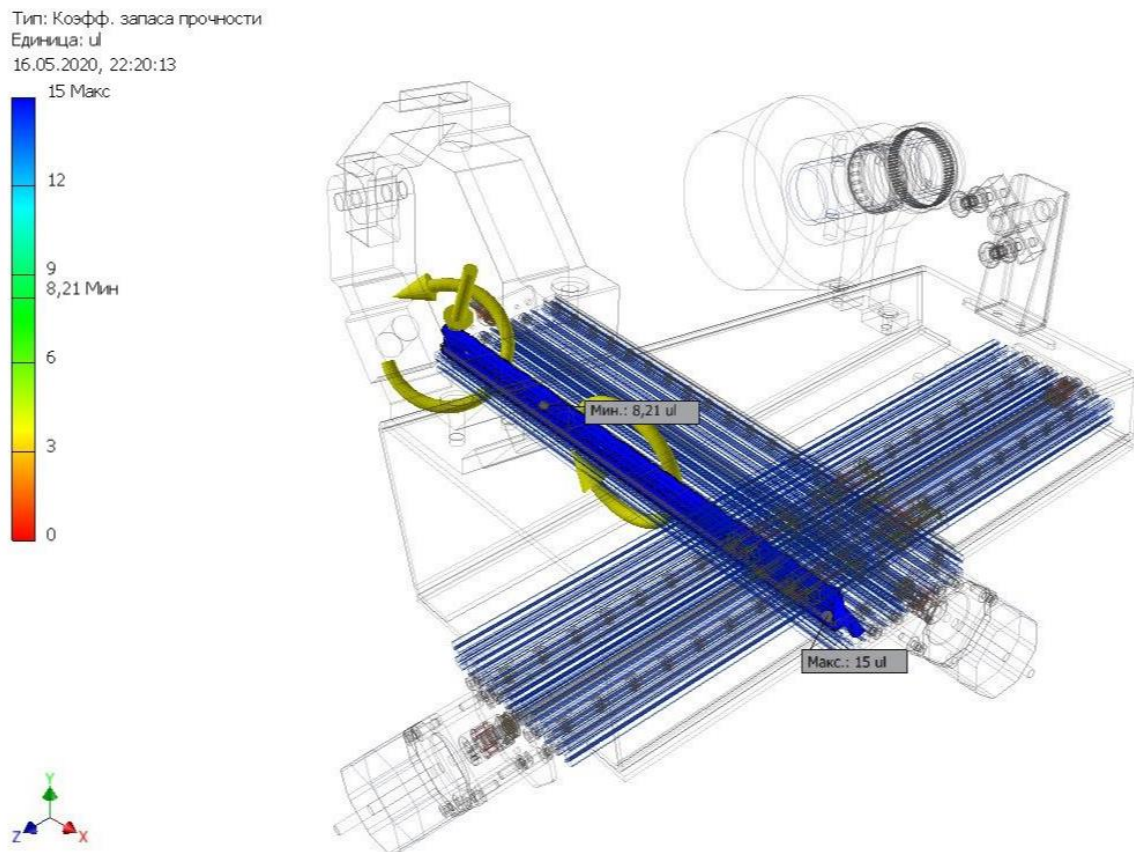


Рис.3.12. Коэффициент запаса прочности (напрямна).

Визначивши динамічні навантаження можна провести дослідження напружено-деформованого стану модулю. Керуючись рекомендаціями джерела [39] навантажимо і проведемо статичний аналіз н пружено-деформованого стану.

Результати основних розрахунків моделювання наведено в таблиці 3.3.

Таблиця 3.3. результати розрахунків моделювання

Имя	Минимальная	Максимальная
Объем	3985190 мм <sup>3</sup>	
Масса	19,9872 кг	
Напряжение по Мизесу	0 МПа	15,4109 МПа
1-ое основное напряжение	-3,54744 МПа	10,0716 МПа
3-е основное напряжение	-19,5584 МПа	2,30036 МПа
Смещение	0 мм	0,0773045 мм
Коэфф. запаса прочности	8,02949 бр	15 бр
Напряжение XX	-8,12296 МПа	5,23485 МПа
Напряжение XY	-5,66957 МПа	4,19748 МПа
Напряжение XZ	-1,32052 МПа	1,70673 МПа
Напряжение YY	-18,4758 МПа	7,30185 МПа
Напряжение YZ	-3,01979 МПа	4,83198 МПа
Напряжение ZZ	-5,33372 МПа	5,66361 МПа
Смещение по оси X	-0,000062626 мм	0,0765778 мм
Смещение по оси Y	-0,0195137 мм	0,00501286 мм
Смещение по оси Z	-0,00506423 мм	0,0056659 мм
Эквивалентная деформация	0 бр	0,0000718383 бр
1-ая основная деформация	-0,00000343546 бр	0,0000588488 бр
3-я основная деформация	-0,0000856939 бр	0,0000010578 бр
Деформация XX	-0,0000413191 бр	0,0000383163 бр
Деформация XY	-0,000052802 бр	0,0000270108 бр
Деформация XZ	-0,0000151157 бр	0,0000195366 бр
Деформация YY	-0,0000787273 бр	0,0000412557 бр

Деформация YZ	-0,0000345669 бр	0,0000553107 бр
Деформация ZZ	-0,0000423143 бр	0,0000366264 бр
Контактное давление	0 МПа	15,9765 МПа
Контактное давление по оси X	-5,52724 МПа	7,46788 МПа
Контактное давление по оси Y	-12,2377 МПа	15,021 МПа
Контактное давление по оси Z	-6,0678 МПа	6,34659 МПа

Графічне представлення розрахунків, зображено на рисунках 3.13. – 3.15.

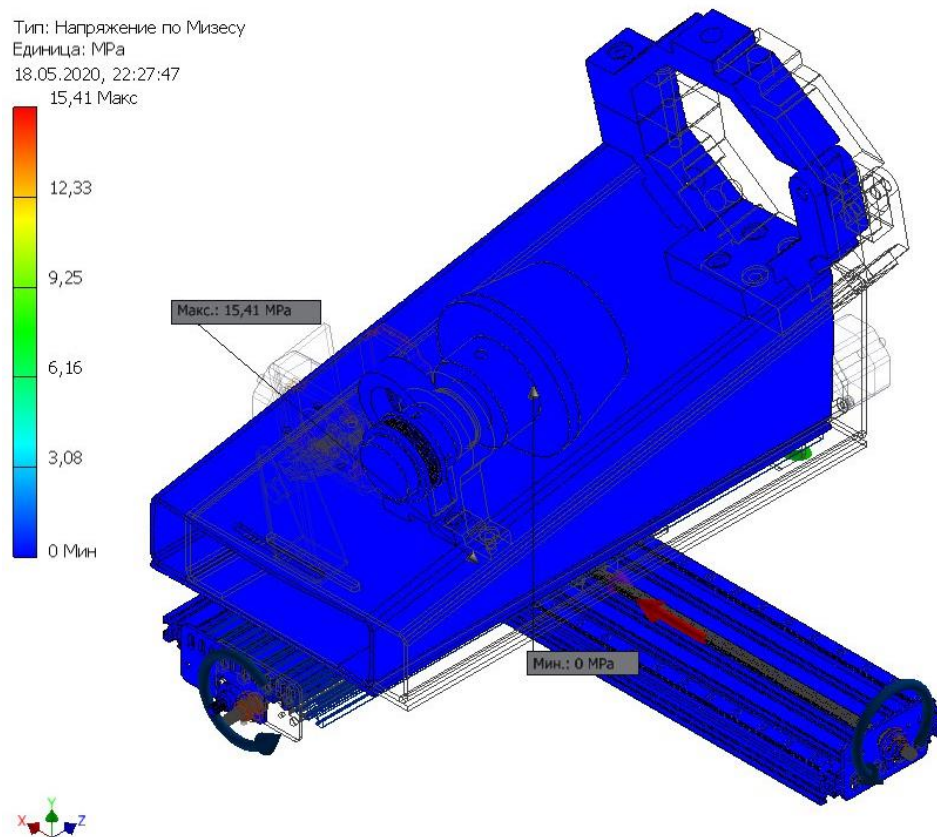


Рис. 3.13. Напруження за Мізесом



Тип: Смещение  
 Единица: mm  
 18.05.2020, 22:29:04  
 0,0773 Макс

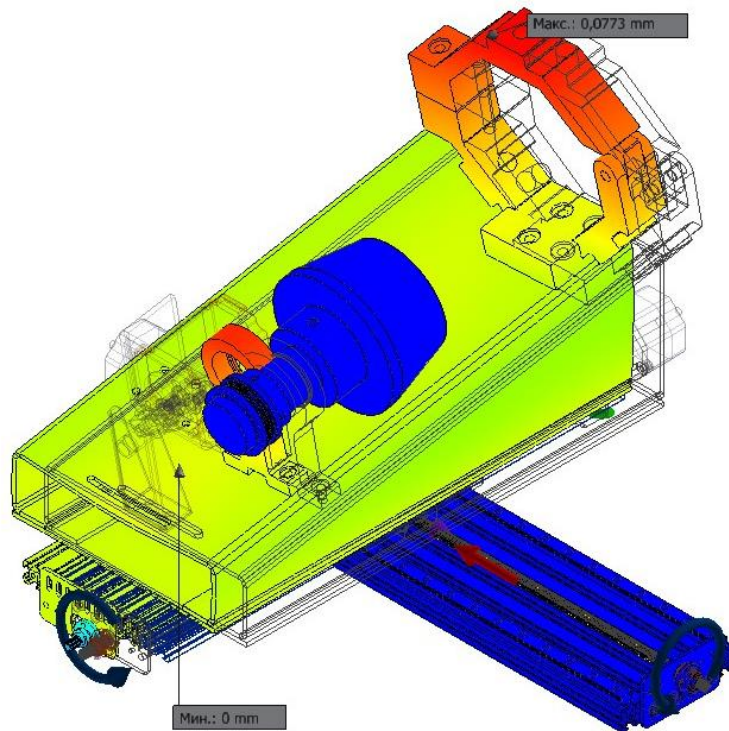
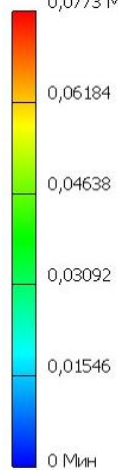
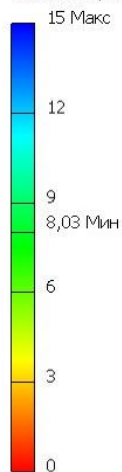
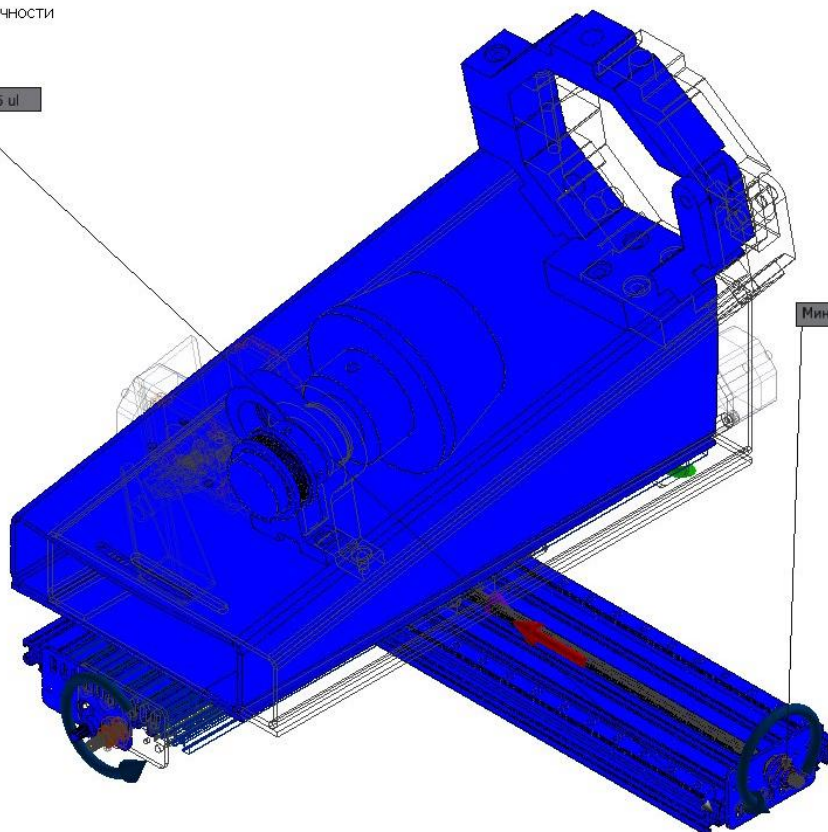


Рис. 3.14. Зміщення

Тип: Коэфф. запаса прочности  
 Единица: ul  
 18.05.2020, 22:29:53



Макс.: 15 ul



Мин.: 8,03 ul



Рис. 3.15. Мінімальний коефіцієнт запасу міцності

За результатами моделювання та представленими графічними зображеннями на рис. 3.7 – 3.15 можна зробити наступні висновки:

- міцність конструкції – повністю забезпечена. Мінімальний коефіцієнт запасу міцності ходового гвинта  $k_{\text{зап.гвинт}} = 5,3$ , та напрямної  $k_{\text{зап.напрям.}} = 8,21$  – цілком відповідають умовам міцності.
- Максимальне зміщення гвинта становить 0,0353 мм, та напрямної – 0,000735 мм, що цілком прийнятним.
- Максимальне зміщення в напружено-деформованого стану становить – 0,0773мм, що теж є задовільним.

### 3.5. Розрахунок теплових полів під час лазерно-струминної обробки.

В момент підведення лазерного променя до оброблюваної поверхні, відбувається її нагрів, при цьому потік тепла йде в глиб оброблюваного тіла. На рисунку 3.16 схематично показано вплив струминно-лазерного потоку на поверхню, та зображено форму плями руйнування матеріалу.

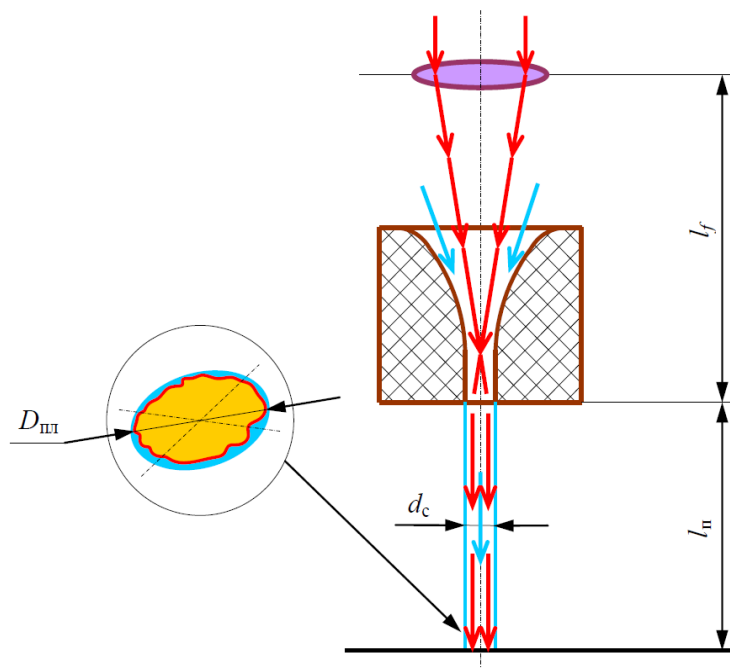


Рис. 3.16. Вплив струминно-лазерного променя на оброблювану поверхню  
В роботі 26 проводилося вирішення задачі переміщення тепла вглиб матеріалу.

Точкове джерело тепла, яке діє на тіло, що має напівскінченну поверхню(рис. 3.17). Диференціальне рівняння теплопровідності в постійному (незмінному) середовищі, в якому не передбачається явище конвекції та випромінювання, матиме наступний вигляд

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + q = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3.1)$$

Тобто зміна температури точки, певного окремого тіла, координати якої (x, y, z) за час t, у випадку якщо тепло  $\delta q$  миттєво перейде до точки на поверхні з координатами (x', y', z') і час t' визначається за наступною формулою:

$$dT(x, y, z, t) = \frac{\delta q}{\rho C (4\pi \alpha (t-t'))^{3/2}} \exp \left[ -\frac{(x-x')^2 + (y-y')^2 + (z-z')^2}{4\alpha (t-t')} \right] \quad (3.2)$$

C – теплоємність,  $\alpha$  – дифузійність,  $\rho$  – щільність, K – теплопровідність.

У напівскінченному тілі температура змінюватиметься дещо по-іншому:

$$dT(x, y, z, t) = \frac{\delta q}{\rho C (4\pi \alpha (t-t'))^{3/2}} \exp \left[ -\frac{(x-x')^2 + (y-y')^2}{4\alpha (t-t')} \right] \left[ \exp \left[ -\frac{(z-z')^2}{4\alpha (t-t')} \right] + \exp \left[ -\frac{(z+z')^2}{4\alpha (t-t')} \right] \right] \quad (3.3)$$

Для рухомого джерела рівняння видозміниться і при  $z'=0$ , матиме вигляд:

$$dT(x, y, z, t) = \frac{2\delta q}{\rho C (4\pi \alpha (t-t'))^{3/2}} \exp \left[ -\frac{(x-x')^2 + (y-y')^2 + z^2}{4\alpha (t-t')} \right] \quad (3.4)$$

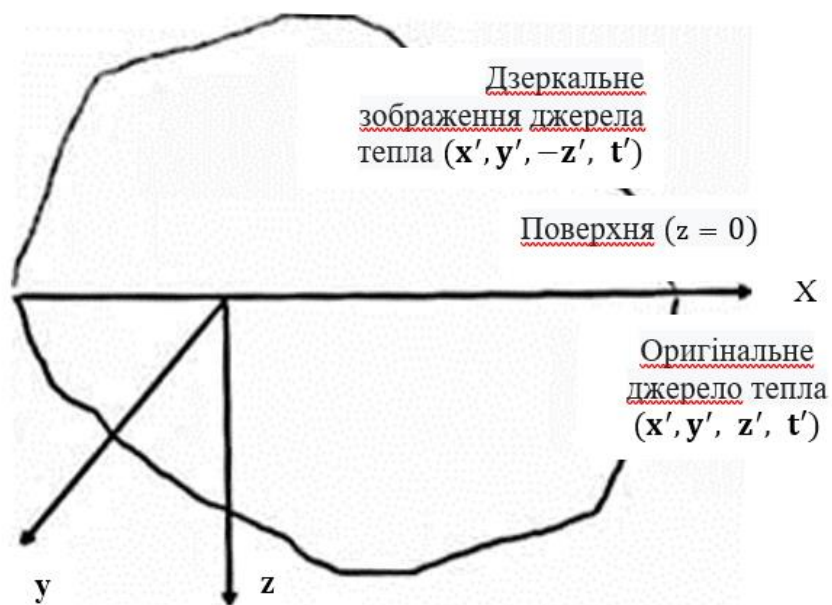
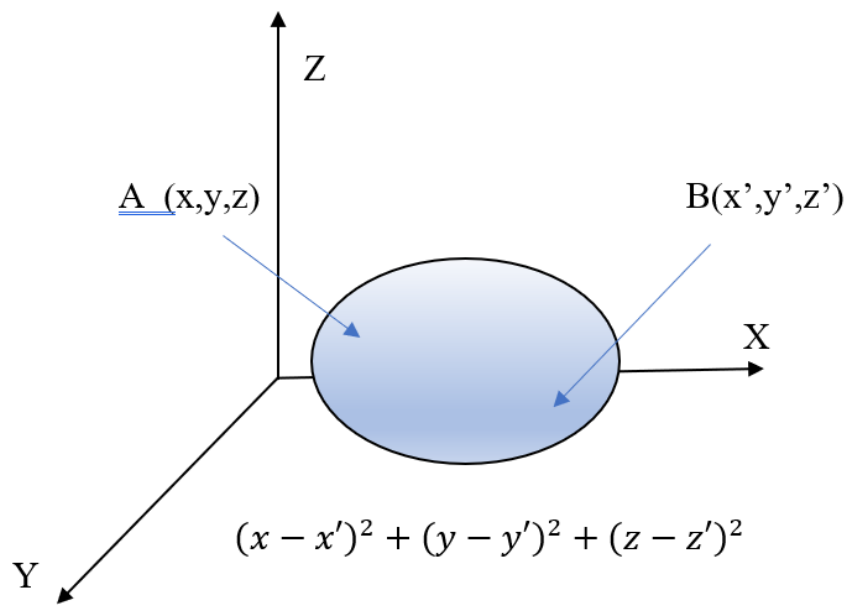


Рисунок 3.17 – Підведення тепла до точки певного тіла та на поверхню напівскінчен-ного тіла

У випадку коли тепло виходить зі швидкістю  $dQ = P dt'$  від  $t = t'$  до  $t = t' + dt'$  у точці  $(x', y', z')$ , температуру в  $(x, y, z)$  в момент часу  $t$  можна знайти, проінтегрувавши вище описане рівняння:

$$dT(x, y, z, t) = \frac{P dt'}{\rho C (4\pi a(t-t'))^{3/2}} \exp \left[ -\frac{(x-x')^2 + (y-y')^2 + (z-z')^2}{4a(t-t')} \right] \quad (3.5)$$

Що ж, у випадку коли джерело тепла від часу  $t' = 0$  до  $t' = t$  є безперервним, його можна записати наступним чином:

$$dT(x, y, z, t) = \int_{t'=0}^{t'=t} \frac{P dt'}{\rho C (4\pi a(t-t'))^{3/2}} \exp \left[ -\frac{(x-x')^2 + (y-y')^2 + (z-z')^2}{4a(t-t')} \right] \quad (3.6)$$

де  $Q$  у Вт.

Коли  $t \rightarrow \infty$ , буде проходити безперервний розподіл температури, який задається формулою:

$$T(x, y, z) = \frac{P}{4\pi k \sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2 + (z-z')^2}} \quad (3.7)$$

Даний розподіл температур є характерним для джерела тепла імпульсної дії.

Оскільки лазер, що використовується, є імпульсним, а в зону лазерного впливу можуть потрапити також додаткові частинки матеріалу, потрібно розглянути задачу поширення тепла при переміщенні лазера [26]. Така схема, насправді, властива умові, коли утворення кластерів, а також окремих мікрозон здійснюється безперервно, а властивості кластеру є обумовленими режимами процесу.

При русі точкового джерела уздовж певної координати, опис розподілу температур може бути виконаним виходячи із наступних пунктів (рис. 3.18):

- Рухоме джерело тепла являється насправді постійним нерухомим джерелом в рухомій системі координат;

- Наступний пункт застосовують, щоб знайти суперпозиції точкових рішень серед просторових координат рухомої системи відліку.

Рух джерела лазера повздовж осі  $X$  у напівскінченному тілі можна описати таким чином:

- у рухомій системі координат:

$$dT(X, Y, Z, t) = \frac{2\delta q}{\rho C(4\pi a(t-t'))^{3/2}} \exp \left[ -\frac{(X-x')^2 + (Y-y')^2 + Z^2}{4a(t-t')} \right] \quad (3.8)$$

- у нерухомій системі координат:

$$dT(x, y, z, t) = \frac{2\delta q}{\rho C(4\pi a(t-t'))^{3/2}} \exp \left[ -\frac{(x-vt'-x')^2 + (y-y')^2 + z^2}{4a(t-t')} \right] \quad (3.9)$$

Якщо ж точкові теплові джерела  $P$ , інтенсивність тепловідведення яких  $dQ = Pdt'$ , рухаються зі швидкістю  $v$  по поверхні напівскінченного об'єкту в проміжку часу від  $t' = 0$  до  $t' = t$ , то отримаємо рівняння підвищення температури в точці  $(x, y, z)$  в наступному вигляді:

$$dT(x, y, z, t) = \int_{t'=0}^{t'=t} \frac{Pdt}{\rho C(4\pi a(t))^{3/2}} \exp \left[ -\frac{(x-vt'-x')^2 + (y-y')^2 + (z-z')^2}{4a(t)} \right] \quad (3.10)$$

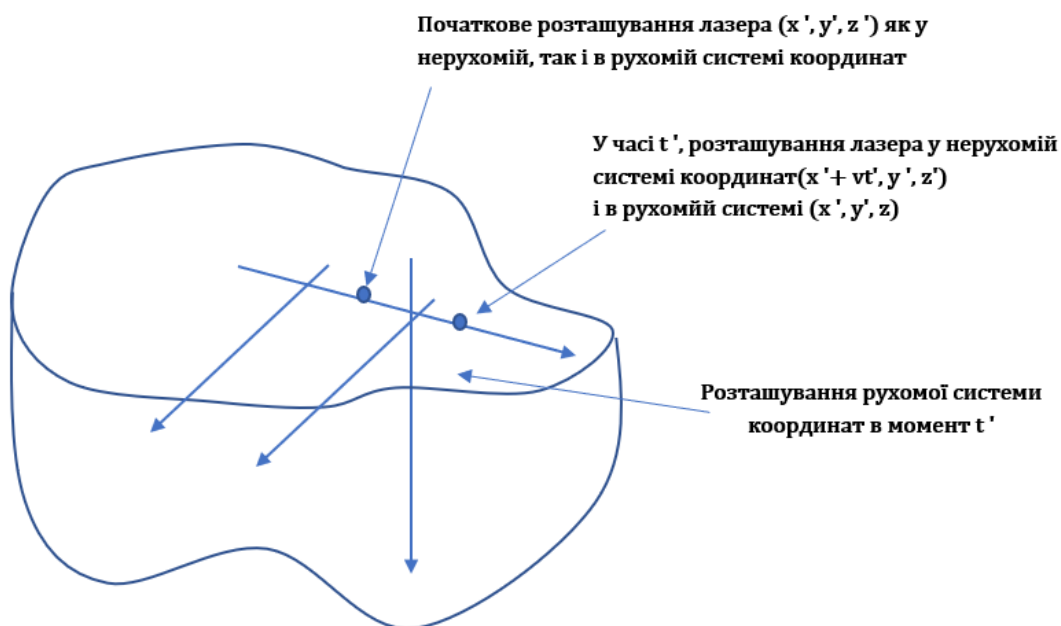


Рисунок 3.18 – До визначення точок нагріву в рухомій системі координат

Звертаючи увагу на те, що розподіл інтенсивності випромінювання, теоретично, підкоряється закону розподілу Гауса, а саме:

$$I(x', y') = \frac{2P}{\pi\sigma^2} \exp \left[ -\frac{2(x'^2 + y'^2)}{\sigma^2} \right] \quad (3.11)$$

у рухомій системі координат підвищення температури можна описати за допомогою наступного рівняння:

$$dT(t') = \frac{4Pdt'}{\pi\sigma^2 \rho C (4\pi a(t-t'))^{3/2}} \frac{\pi\sigma^2 4a(t-t')}{\sigma^2 + 8a(t-t')} \exp \left[ -\left[ \frac{2(X^2 + Y^2)}{\sigma^2 + 8a(t-t')} + \frac{Z^2}{4a(t-t')} \right] \right] \quad (3.12)$$

Отже, відповідну різницю температур можна вирахувати з інтегрального рівняння:

$$T - T_0 = \frac{4P}{\rho C \sqrt{4a\pi}} \int_{t'=0}^{t'=t} \frac{dt'(t-t')^{-0.5}}{\sigma^2 + 8a(t-t')} \exp \left[ -\frac{2((x-vt')^2 + y^2)}{\sigma^2 + 8a(t-t')} - \frac{z^2}{4a(t-t')} \right] \quad (3.13)$$

Таким чином, розподілення температур під час опромінення тіла круговим джерелом, яке відповідає перетяжці каустики у фокальній площині), може бути описано таким рівнянням:

$$dT(X, Y, Z, t) = \frac{2Pdt'}{8\rho C\pi\sigma^2(\pi a(t-t'))^{\frac{3}{2}}} \exp\left[-\frac{Z^2}{4a(t-t')}\right] \times \int_{-\sigma}^{\sigma} \exp\left[-\frac{(X^2 - x')^2}{4a(t-t')}\right] dx' \int_{-\sqrt{\sigma^2 - x'^2}}^{\sqrt{\sigma^2 - x'^2}} \exp\left[-\frac{(Y^2 - y')^2}{4a(t-t')}\right] dy' \quad (3.14)$$

Кінцеву температуру можна отримати провівши інтегрування за часом від 0 до  $t$ .

Варто також розглянути процес нагрівання поверхні тіла за допомогою твердотільного лазера, що впливає на поверхню на протязі певного часу, і таким чином утворює локальний нагрів зони опромінення. При цьому щільність поглинутої енергії можна визначити за допомогою виразу (3.15):

$$q(x) = q_0 \exp\left(-x^2/r^2\right), \quad (3.15)$$

де  $q_0$  – щільність потужності променю в центрі плями фокусування;

$r$  – радіус променю, що за законом Гауса враховує розподіл щільності випромінювання.

Поширення тепла на поверхні поглинання радіусом  $r$  може бути визначеним за наступним виразом:

$$T(x, z, t) = \frac{q_{\max} r^2}{K} \left(\frac{a}{\pi}\right)^{\frac{1}{2}} \int_0^t \frac{P(t-t') dt' \exp\left[\frac{z^2}{4at} - \frac{x^2}{4at'}\right]}{\sqrt{t'}(4at' + r^2)}, \quad (3.16)$$



де  $q_{\max}$  – це максимальна щільність потужності випромінювання в центральній точці плями;  $x$  – відстань від центру джерела;

$$P(t) = q(t) / q_{\max} \quad (3.17)$$

температура в точці, координати якої ( $x, y, z$ ) на поверхні напівскінченного тіла, за умови, що лазерний промінь рухається вздовж поверхні зі швидкістю  $v$ , та без урахувань втрат тепла з поверхні, визначається як

$$\bar{T} = \frac{16}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\infty} \frac{1}{\sqrt{(c'^2 + t'^2)(b'^2 + \bar{t}'^2)}} \exp \left[ -\frac{(2\bar{x}'^2 + \bar{v}'t')^2}{4(\bar{c}'^2 + \bar{t}'^2)} - \frac{\bar{y}'^2}{\bar{b}'^2 + \bar{t}'^2} - \frac{\bar{z}'^2}{\bar{t}'^2} \right] dt, \quad (3.18)$$

де  $\bar{T} = 16\sqrt{\pi KrT} / PA_0$ ;  $\bar{v} = v_r / 2a$ ;  $\bar{x}' = \frac{x}{r}$ ;  $\bar{y}' = \frac{y}{r}$ ;  $\bar{z}' = \frac{z}{r}$ ;

$\bar{c}' = \frac{c}{r}$ ;  $\bar{b}' = \frac{b}{r}$ ;  $r^2 = cb$ ;

$A_0$  – величина відбиваючої здатності матеріалу заготовки;  $P$  – потужність випромінювання лазера;  $b, c$  – параметри розподілу щільності енергії при лазерному випромінюванні.

Явище теплопровідності в об'ємі матеріалу заготовки, яка є обмеженою областю  $\Omega$ , з поверхнею  $\partial\Omega$ , може бути описаний за допомогою:

- скалярного поля температури:

$$T = T(P, t), \quad (3.19)$$

- векторного поля потоку тепла:

$$q = q(P, t), P = \{(x, y, z)\} \in \Omega, \quad (3.20)$$

- скалярного поля з питомою тепловою енергією:

$$e = e(T). \quad (3.21)$$

Граничні умови на зовнішніх поверхнях коли  $\tau > 0$

$$\left\{ \Gamma_1 : -\lambda \frac{\partial t}{\partial n} = q_r; \Gamma_2 : \frac{\partial t}{\partial n} = 0; \Gamma_3 : -\lambda \frac{\partial t}{\partial n} = \alpha(t - t_{\text{medium}}); \right. \quad (3.22)$$

Умови на границі контакту  $\Gamma_4$  при  $\tau > 0$ :

$$\left\{ \begin{aligned} t|_{\partial_4^-} &= t|_{\partial_4^+}, \\ -\lambda_- \frac{\partial t}{\partial n}|_{\partial_4^-} &= \lambda_+ \frac{\partial T}{\partial n}|_{\partial_4^+} \end{aligned} \right. \quad (3.23)$$

$$\left\{ \begin{aligned} t < t_m - \frac{\Delta t}{2}, \lambda_1(t) &= \lambda_s; [c_p(t)\rho(t)]_1 = c_{ps}\rho_s; \\ t_m - \frac{\Delta t}{2} \leq t \leq t_m + \frac{\Delta t}{2}, \lambda_1(t) &= \lambda_s + \frac{\lambda_m - \lambda_s}{\Delta t} \left( t - t_m + \frac{\Delta t}{2} \right); \\ [c_p(t)\rho(t)]_1 &= c_{ps}\rho_s + \frac{c_{pm}\rho_m - c_{ps}\rho_s}{\Delta t} \left( t - t_m + \frac{\Delta t}{2} \right) + \frac{L_f}{\Delta t}; \\ t > t_m + \frac{\Delta t}{2}, \lambda_1(t) &= \lambda_m; [c_p(t)\rho(t)]_1 = c_{pm}\rho_m; \end{aligned} \right. \quad (3.24)$$

де  $n$  – нормаль до поверхні;  $\alpha$  - коефіцієнт тепловіддачі;  $q_r$  – щільність енергії;  $\Gamma_1$  – поверхня, що опромінюється;  $\Gamma_2$  – поверхня осової симетрії,  $\Gamma_3$  – поверхні, які контактують із навколишнім середовищем,  $\Gamma_4$  – границя контакту зв'язника та матриці.

Під час граничного режиму випаровування розмір утвореної порожнини залежить власне від повної енергії, яка надходить до поверхневого шару оброблюваної заготовки.

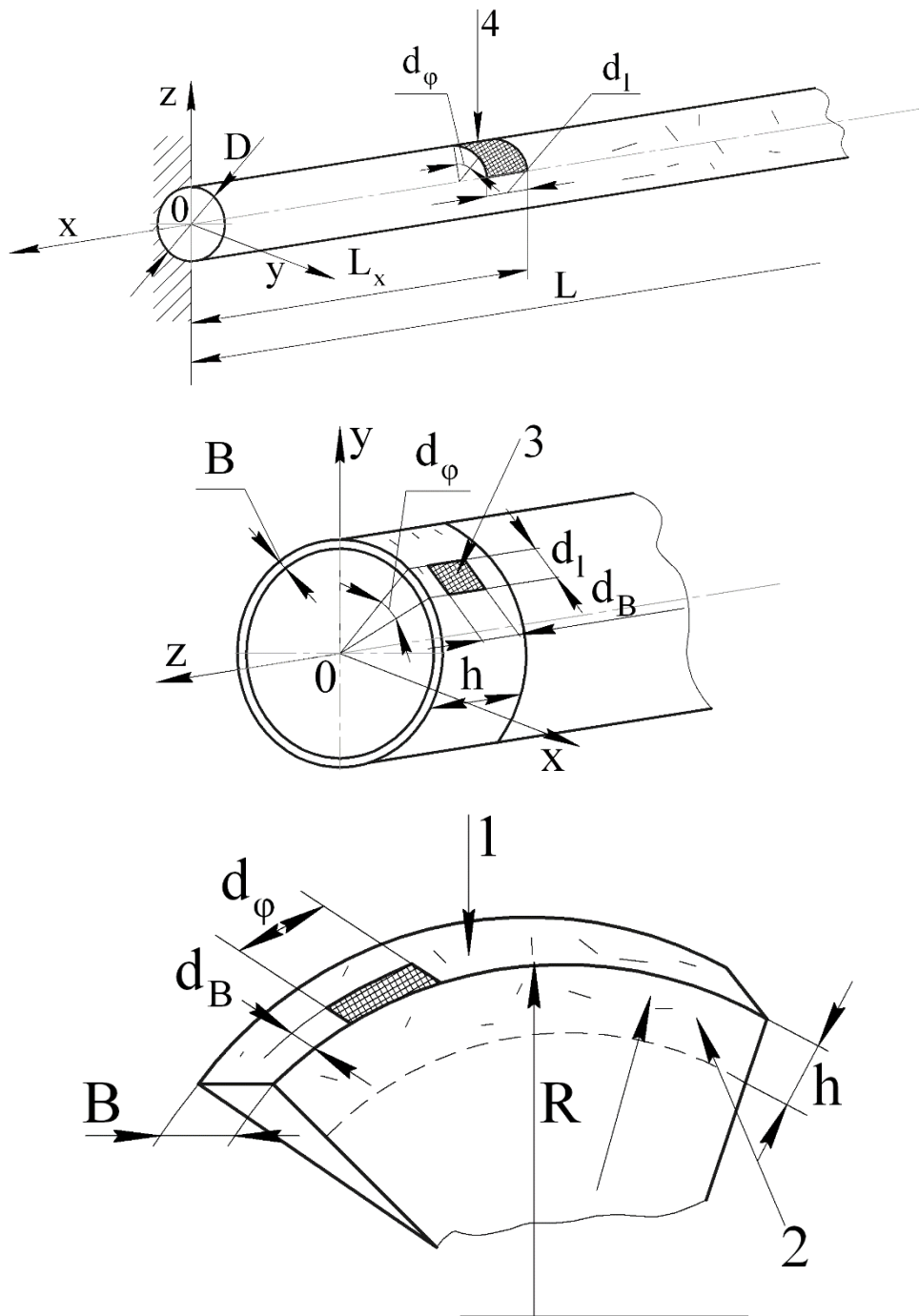


Рисунок 3.19 – Розрахункові схеми нагріву частин поверхонь

Слід взяти до уваги, що під час нагріву буде відбуватися певне перенесення тепла вглиб заготовки, що викликано теплопровідністю її матеріалу. Дане явище може призводити до зміни як фізичних так і механічних характеристик матеріалу в

деякому обсязі. Завдання руху границь поділу фаз, враховуючи теплопровідність, а також припускаючи, що тепло поширюється перпендикулярно до поверхні, базуючись на одновимірне нестационарне рівняння теплопровідності:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{1}{D} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3.25)$$

де  $D=K/(\rho c)$  – коефіцієнт температуропровідності заготовки;

$K$  – коефіцієнт теплопровідності матеріалу;

$\rho$  – щільність матеріалу;

$c$  – питома теплоємність матеріалу;

щоб оцінити розподілення температури  $T(z,t)$  всередині матеріалу з граничними умовами на рухомій границі  $z=l(t)$ , та, власне, на протилежній стороні заготовки дає вирішення для знаходження безрозмірної швидкості руху даної межі в залежності безрозмірного часу в наступному вигляді:

$$\frac{d\xi}{dt} = \left[ 1 + \varepsilon \left\{ \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( \frac{\tau^{1/2}}{2} \right) - \frac{1}{(\pi\tau)^{1/2}} e^{-\frac{\tau}{4}} \right\} \right] \frac{2}{\pi} \left\{ 1 + \frac{\varepsilon}{\pi\tau^{1/2}} \right\} \arcsin \left\{ \left( 1 - \frac{\pi\varepsilon^2}{4\tau} \right)^{1/2} \right\} \quad (3.26)$$

За допомогою віртуального середовища SolidWorks Simulation, було проведено розрахунок поширення тепла в заготовці при обробці лазером. Оскільки вісь обертання заготовки на змодельованому пристрої знаходиться під кутом 10 градусів, тому промінь попадає на заготовку під кутом (рис. 3.20). Для проведення моделювання поширення тепла в заготовці було створено модель труби з композитного матеріалу. Було взято наступні параметри заготовки: діаметр  $D = 120$  мм, товщина стінки  $l = 5$  мм. Для розрахунку були використані наступні параметри матеріалів, наведені в таблиці 3.4.

Таблиця 3.4. Властивості матеріалу, використані для моделювання

Модуль пружності	1200 Н/мм <sup>2</sup>
------------------	------------------------

Коефіцієнт Пуассона	0,23 Н/А
Модуль здвигу	28022 Н/мм <sup>2</sup>
Щільність	1500 кг/м <sup>3</sup>
Міцність на розтяг	1600 Н/мм <sup>2</sup>
Коефіцієнт температурного розширення	9 * 10 <sup>-6</sup> 1/К
Теплопровідність	0,74976 Вт/(м*К)
Питома теплоємність	834,61 Дж / (кг*К)

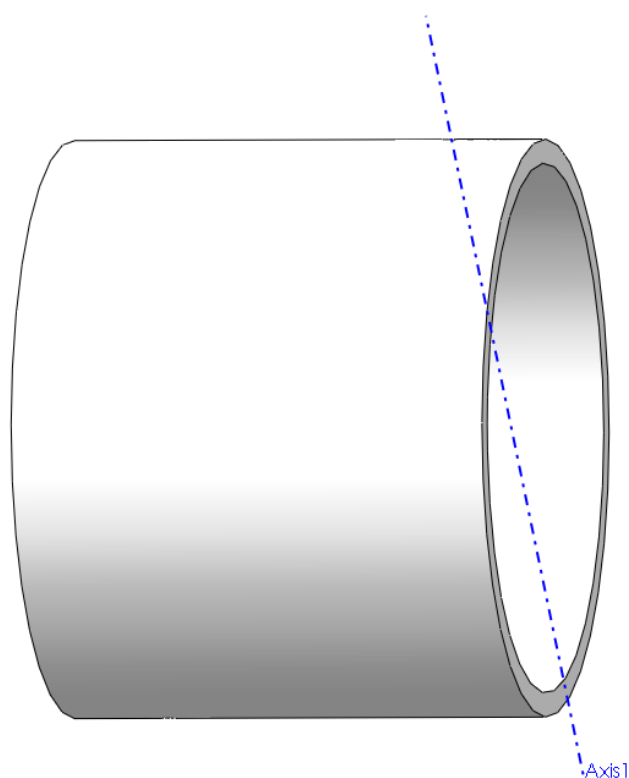


Рис. 3.20. Кут падіння променя при обробці на створеному модулі.

В середовищі SolidWorks Simulation обирається дослідження «Study», уточнюємо якого роду буде проводитися дослідження в даному випадку «Thermal». Оскільки світловий промінь діє на заготовку протягом певного часу, то необхідно вибрати в параметрах дослідження, що цей процес тривалий, та задати необхідний проміжок часу, та крок часу для кожної ітерації розрахунків. Оскільки процес нагрі-

вання тривалий, необхідно вказати початкову температуру кожної поверхні. І прикласти теплове навантаження на пляму контакту променю та поверхні. В нашому випадку були значення представлені на рис. 3.21.

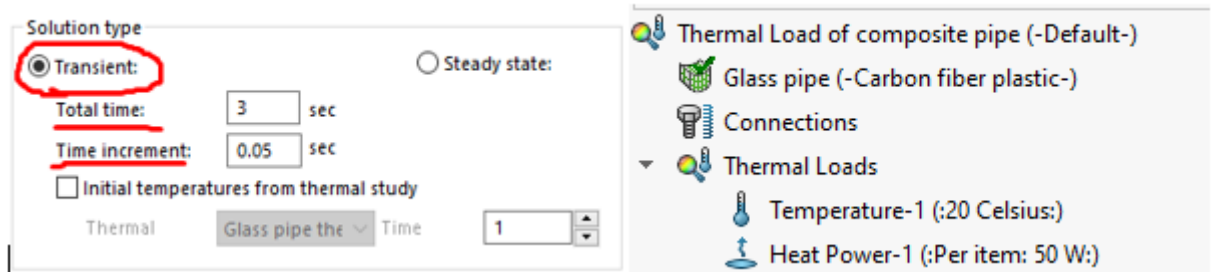


Рис. 3.21. Теплові навантаження та часовий проміжок дії впливу променю на поверхню.

Зображення розрахункової моделі представлено на рис.3.22. Початкова температура в 20° була прикладена до усіх поверхонь заготовки. А до плями контакту додатково прикладено джерело тепла потужністю 50 Вт.

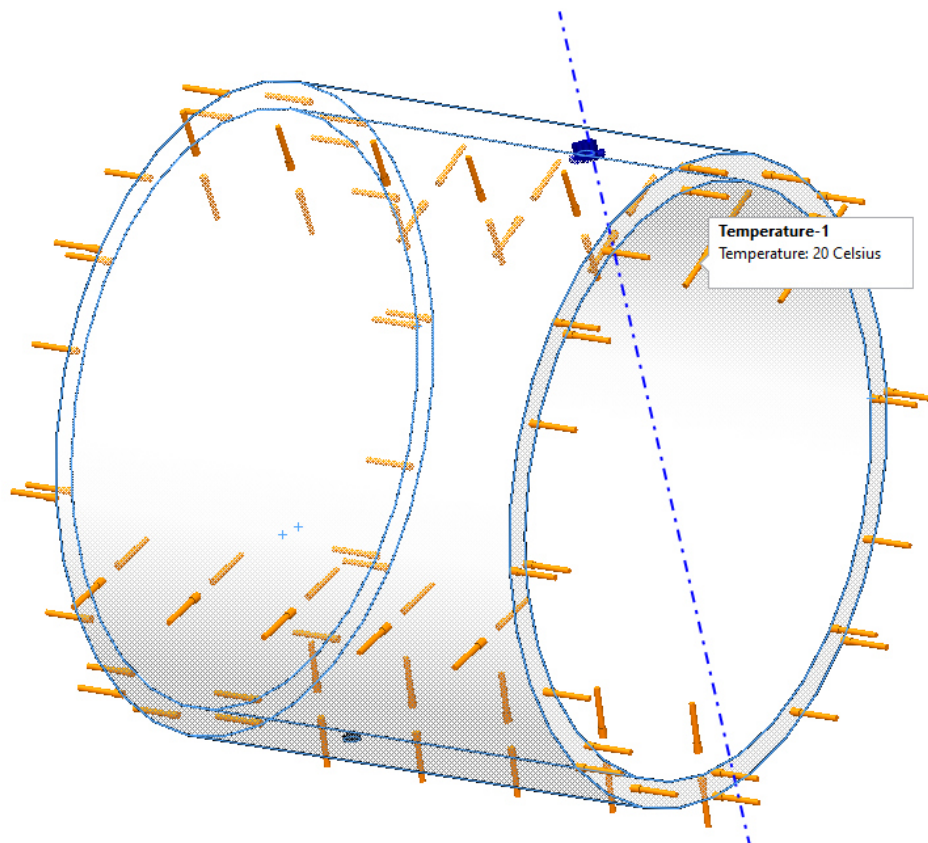


Рис.3.22. Розрахункова модель заготовки

Для отримання точніших результатів було проведено тріангуляцію поверхні заготовки (Рис. 3.23).

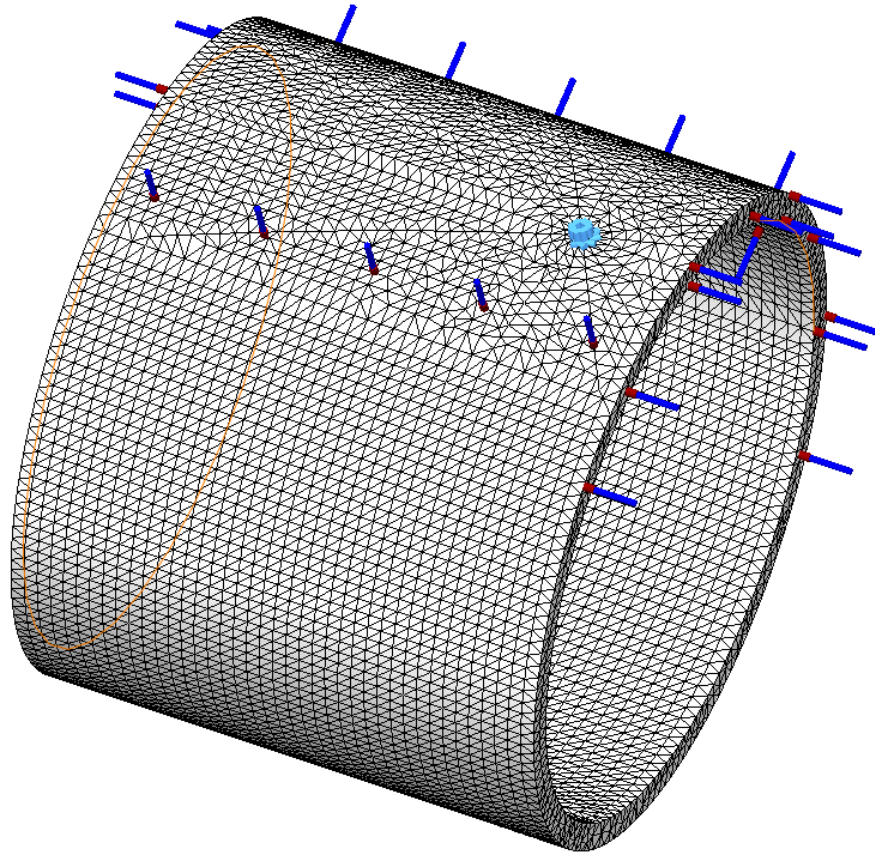


Рис. 3.23. Розрахункова модель після проведення тріангуляції поверхні (накладення сітки).

Результати розрахунків моделювання показані на рис. 3.24 – 3.26.

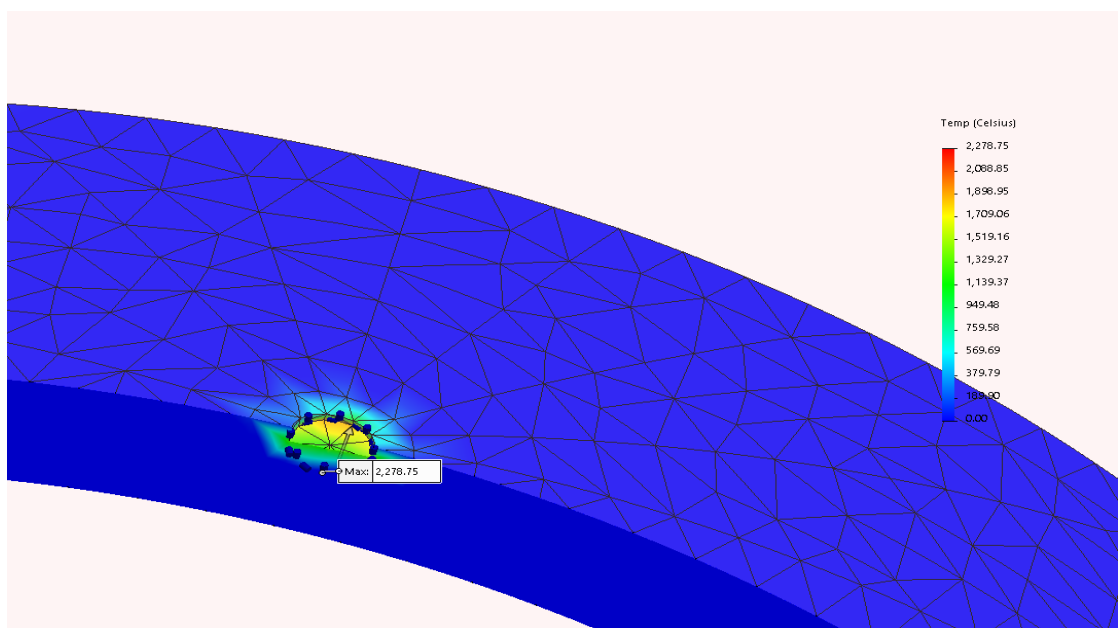


Рис. 3.24. Температура поверхні в перші 0,05 секунди

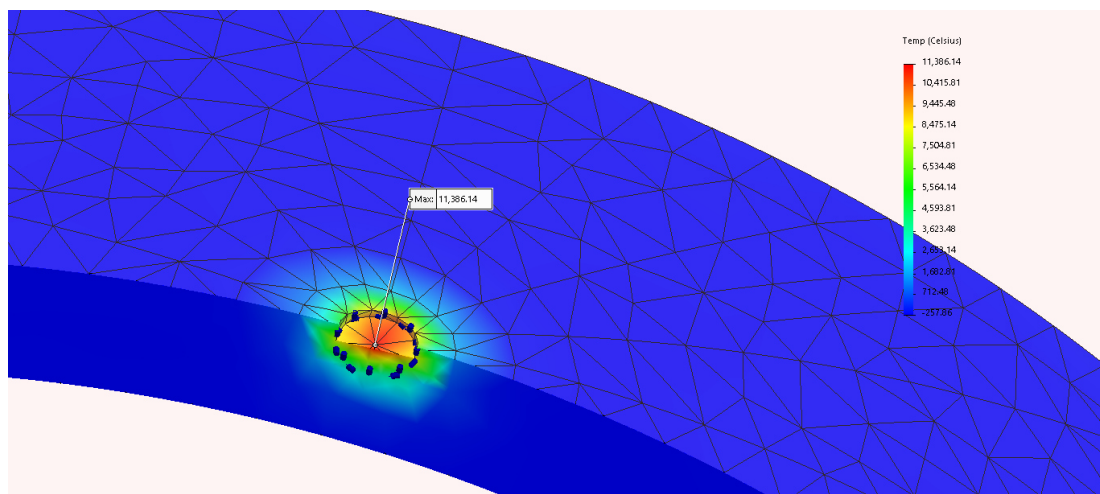


Рис. 3.25. Температура поверхні та тіла, станом на 3 секунду.

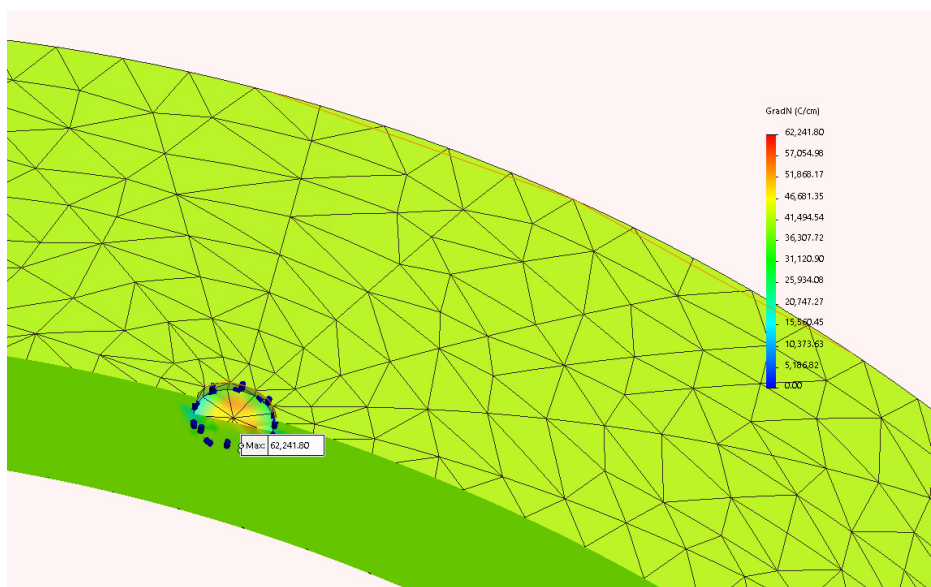


Рис. 3.26. Результуючий градієнт температури в перші 0,05 секунди

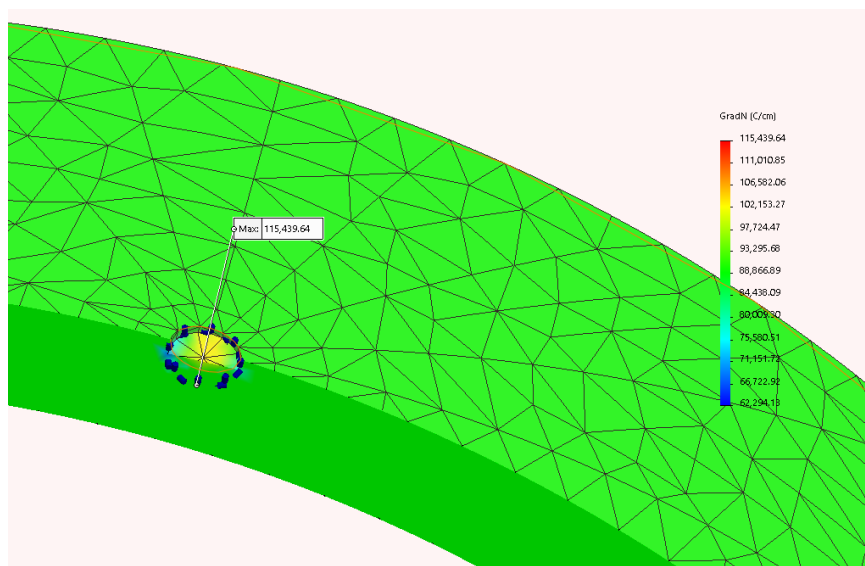


Рис. 3.27. Результуючий градієнт температури станом на 3 секунду.



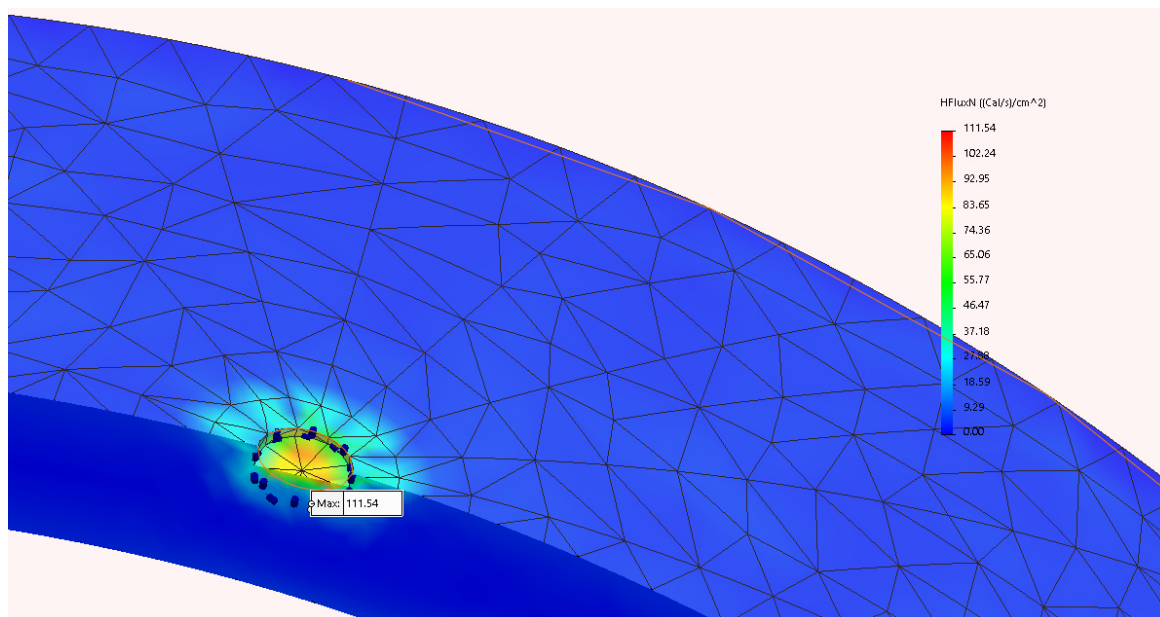


Рис. 3.28. Тепловий потік станом на 0,05 секунди

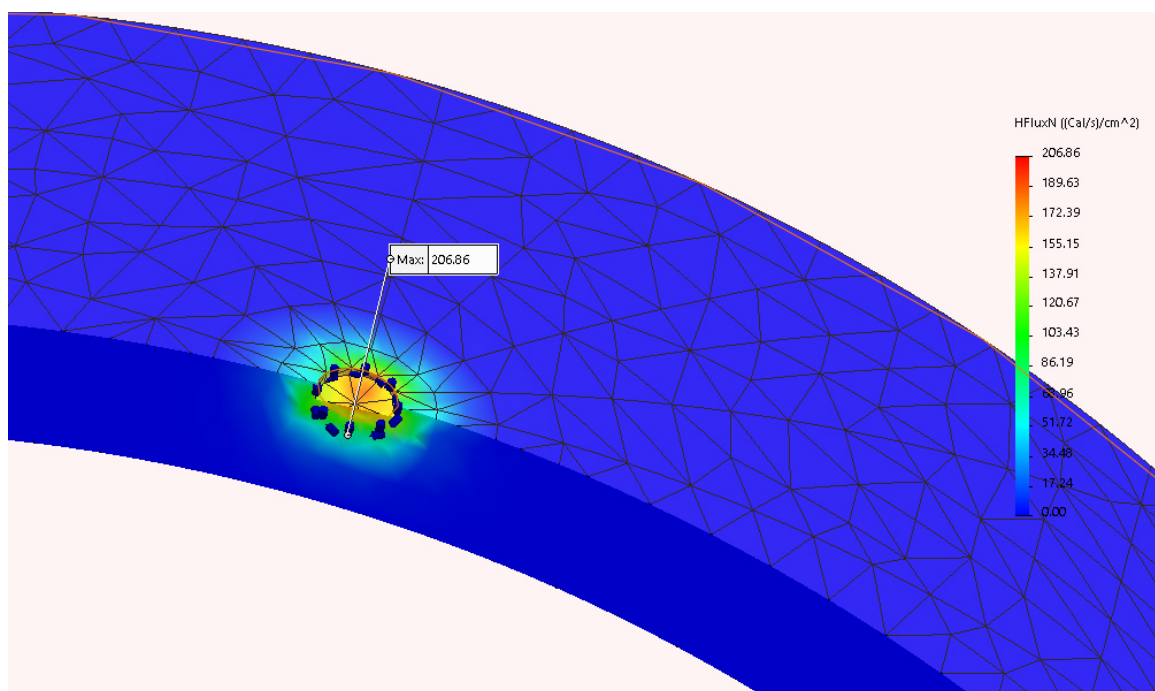


Рис. 3.29 Значення теплового потоку станом на 3 секунду.

Отримані результати є доволі наближеними, оскільки в даному розрахунку на враховувалася анізотропія властивостей, яка так притаманна композитним матеріалам. Вибраний інтервал в 3 секунди є також спрощенням, оскільки останнім часом використовуються імпульсні лазерні установки. В умовах же струминно-лазерної обробки не було враховано постійну подачу рідини на тіло.

### **Висновки до розділу:**

1. Створено конструкцію та розроблено складальні кресленики механізованого модулю для виготовлення кільцевих зразків з композиційної труби.
2. Проведено динамічний аналіз приводів хрестового столу і визначено сили, що діють на стіл внаслідок динамічних навантажень.
3. Здійснено аналіз напружено-деформованого стану конструкції модулю.
4. Проведено дослідження розподілення теплових полів впродовж часу внаслідок дії лазерного променя.

## **ВИСНОВКИ**

1. В результаті виконання магістерської дисертації було розроблено механізований модуль технологічного оснащення для обробки і випробування композиційних матеріалів.
2. У роботі проведено аналіз використання композитних матеріалів, а також розглянуто існуючі методи та обладнання для їх обробки та випробування.
3. Проаналізовано обладнання для обробки композиційних матеріалів, а також конфігурацію необхідних зразків і вибрано компоновальну схему механізованого модулю. Проведено розрахунки основних вузлів модулю, та підібрано їх конфігурацію.
4. Розроблено конструкцію модулю, створено її 3D модель і виконано необхідні кресленики. Проведено моделювання напружено-деформованого стану найбільш навантажених вузлів.
5. Проведено дослідження поширення теплових полів на оброблювальній лазером поверхні.

### Літературні джерела:

1. Солнцев Ю.П. Специальные материалы в машиностроении. / Ю.П. Солнцев, Е.И. Пряхин, В.Ю. Пирайнен – СПб.: Химиздат, 2004. – 640 с
2. В.В. Гончаренко, І.В. Коваленко – Технологія композиційних матеріалів: Навчальний посібник / Гончаренко В.В., Коваленко І.В. – К.:2007 – 131 с.
3. Царенко О.М., Рябець С.І. Нариси з історії техніки та технологій: навч. посіб. / О.М. Царенко, С.І. Рябець – Кіровоград: РВВ КДПУ, 2009. – 502 с
4. <https://sites.google.com/site/compositesua/istoria-kompozitiv-rozlogise>
5. <https://www.popmech.ru/history/5383-spasitel-zhizney-kevlar-prochnee-stali/>
6. Journal of Space Technology, Vol. 8, No. 1, July 2018
7. [https://www.researchgate.net/publication/286266759\\_A\\_Review\\_of\\_the\\_Flammability\\_Factors\\_of\\_Kenaf\\_and\\_Allied\\_Fibre\\_Reinforced\\_Polymer\\_Composites](https://www.researchgate.net/publication/286266759_A_Review_of_the_Flammability_Factors_of_Kenaf_and_Allied_Fibre_Reinforced_Polymer_Composites)
8. <https://www.mdpi.com/1424-8220/15/8/18666/htm>
9. Аналитический отчет. Использование композитных конструкционных материалов при создании пл. ЦКБ МТ «Рубин». Выпуск 18, март 2014 г., 210 с.
10. <http://naftaros.ru/articles/42/index.html>
11. <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=14898>
12. <https://cyberleninka.ru/article/n/tehnologii-pozvolyayuschie-povysit-effektivnost-obrabotki-kompozitsionnyh-materialov-metodom-frezerovaniya/viewer>
13. <https://www.sandvik.coromant.com/sitecollectiondocuments/downloads/global/technical%20guides/ru-ru/c-2920-30.pdf>
14. Шепелев А. А., Сороченко В.Г. Механизм образования поверхностного слоя при алмазно-абразивной обработке полимерных композиционных материалов. Прогрессивные технологии и системы машиностроения : международный сб. научных трудов. Донецк: ДонНТУ, 2004. Вып. 28. С.202–205
15. <https://chemtest.com.ua/ua/autograph-ags-j-ua>
16. Вашуков Ю.А., Митрошкина Т.А. Технологические процессы производства аэрокосмических конструкций из композиционных материалов : учебное издание. Самара: издательство Самарского университета, 2016. С.59 – 63

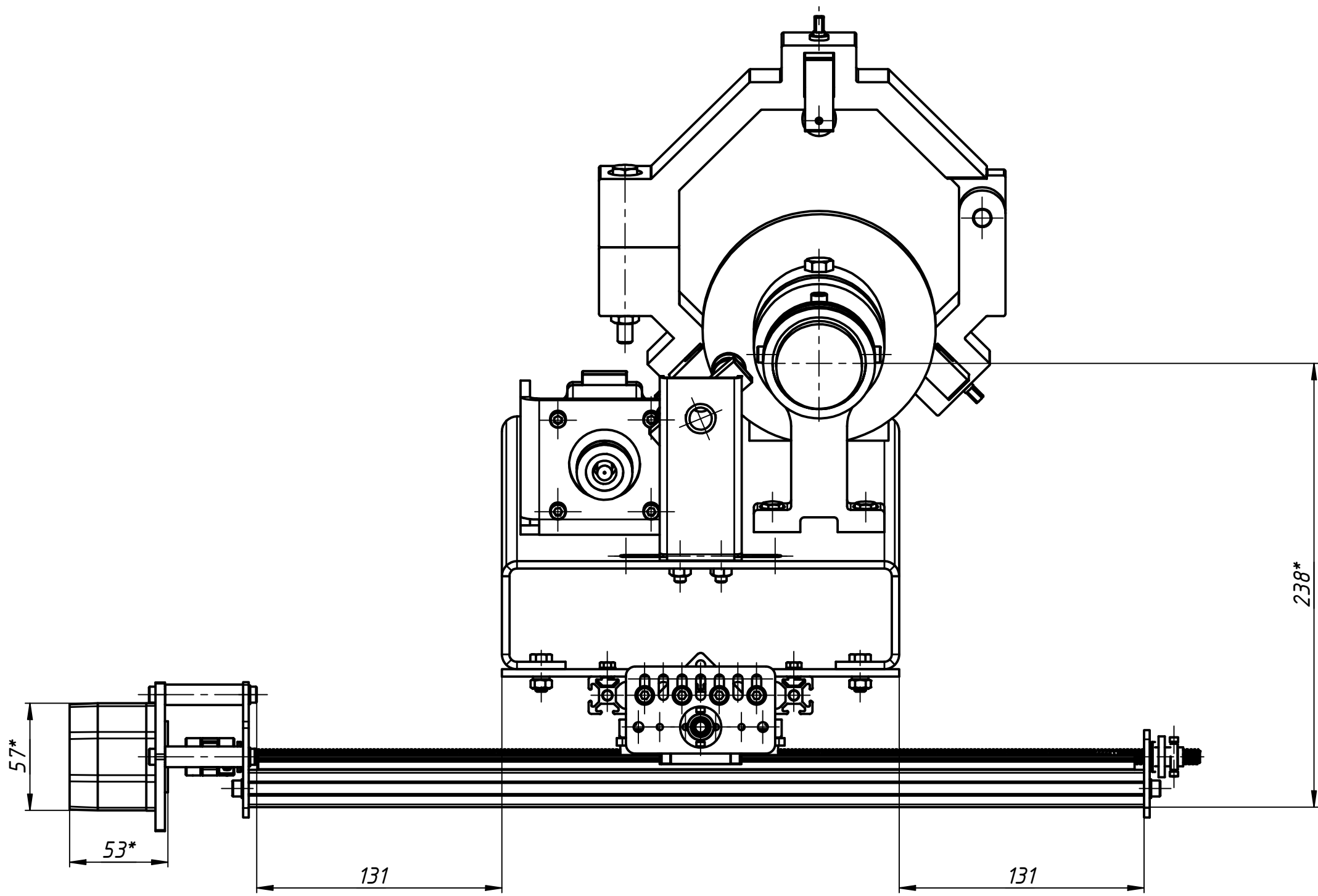
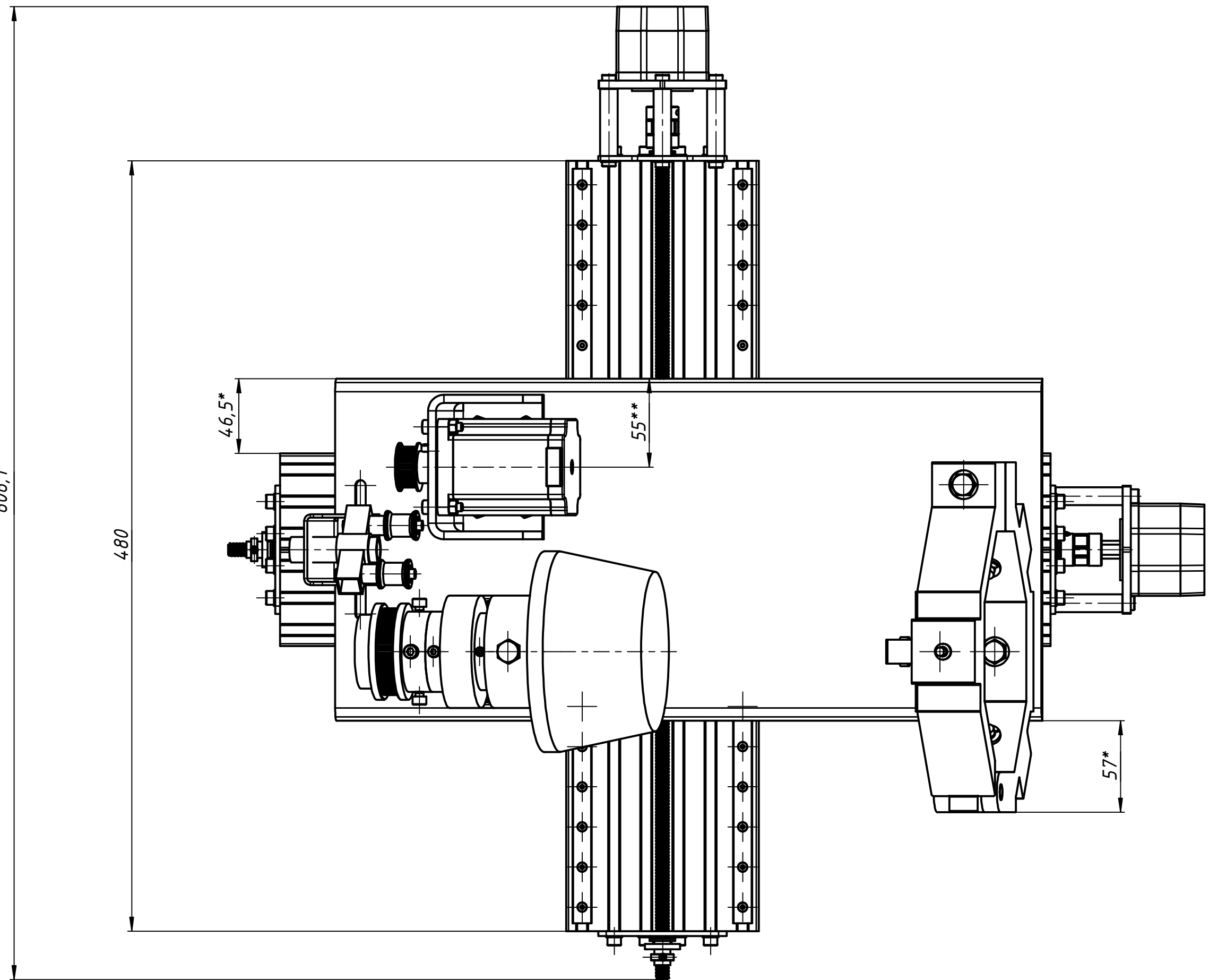
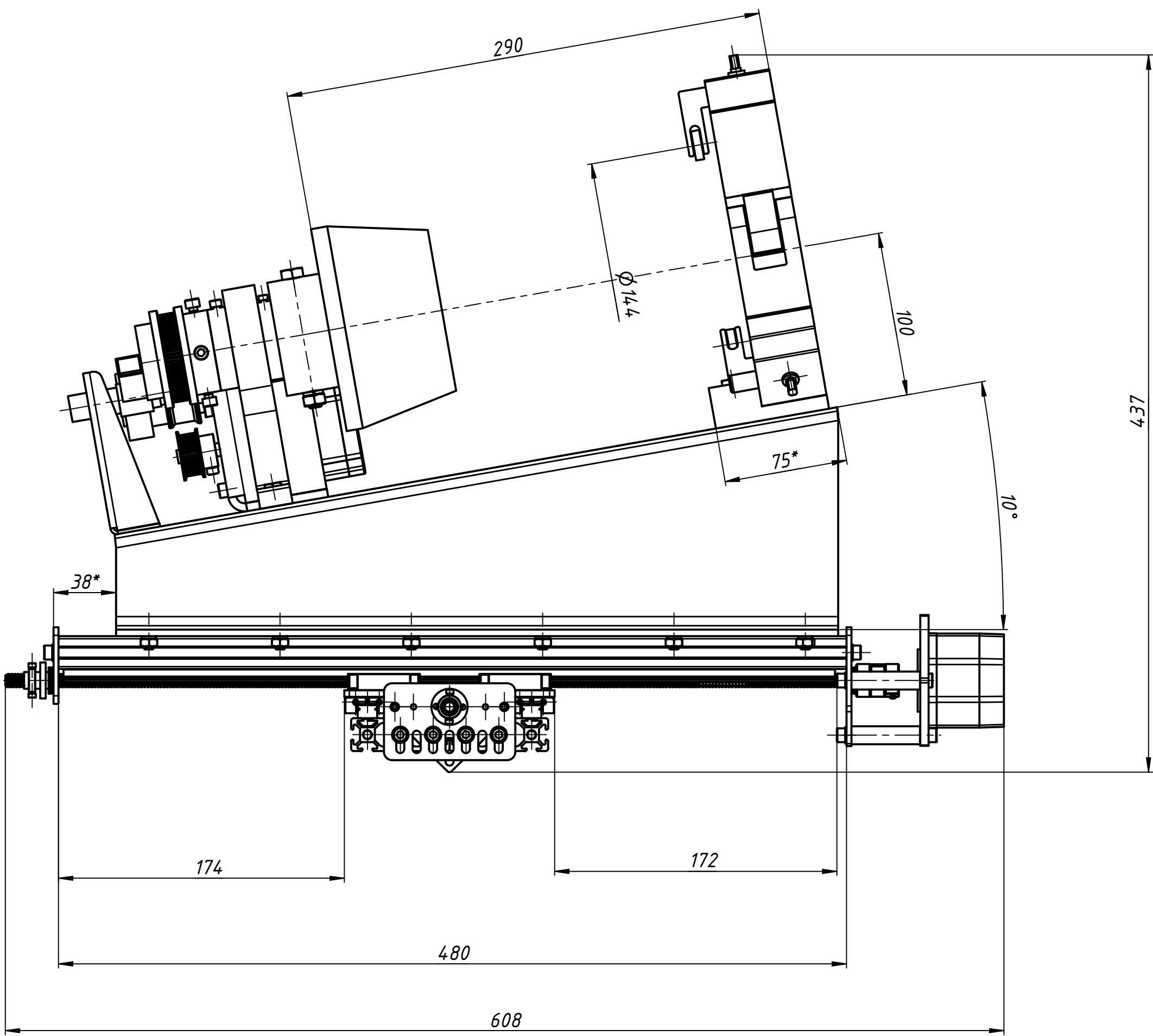
17. <https://www.hoffmann-group.com>
18. <https://www.biesse.com/RU/tehnologicheskikhmaterialov/stanki-dlja-gidroabrazivnoj-rezki>
19. <https://www.eurolaser.com/ru/lazernye-sistemy/kratkii-obzor-lazernykh-sistem/m-800/>
20. Саленко О.Ф. Основи струминно-лазерної обробки матеріалів: монографія / О.Ф. Саленко, В.Т. Щетинін, В.Г. Доценко, О.В. Фомовська. – Кременчук: Вид-во КрНУ ім. М. Остроградського. – 2012. – 362 с.
21. Саленко О.Ф. Дослідження струминно-променевого впливу на поверхні твердих тіл / О.Ф. Саленко, А.В. Луговий, В.А. Дудюк, О.Ю. Безворітний // Вісник КДПУ імені Михайла Остроградського «Нові технології в машинобудуванні». – Вип. №6(49). – Кременчук: КДПУ імені Михайла Остроградського, 2009. – С. 80–85.
22. Саленко О.Ф. Про деякі результати досліджень струминно-лазерного впливу на поверхню твердих тіл / О.Ф. Саленко, О.В. Фомовська, В.О. Дудюк, О.М. Мана // Вісник НТУУ «КПІ». Машинобудування: збірник наукових праць. – 2011. – № 61, т. 2. – С. 172–179.
23. <http://www.acrosscc.com/carbon/>
24. Waterjet-guided Laser Processing // Bernold Richerzhagen, Muneharu Kutsuna, Haruhiko OKADA and Takeshi IKEDA //SYNOVA SA, Parc scientifique/EPFL Lausanne Switzerland // Department of Material Processing Engineering. – Nagoya University. – Japan
25. Synova, S. A. Natural diamond cutting using water jet-guided laser [Electronic resource] / S.A. Synova. – Available at: [http://www.synova.ch/fileadmin/user\\_upload/conferences/2011\\_LIM2011\\_Synova\\_final.pdf](http://www.synova.ch/fileadmin/user_upload/conferences/2011_LIM2011_Synova_final.pdf). – 12.05.2013. – Title from the screen.
26. Холодний В.Ю., ОТРИМАННЯ ОТВОРІВ ПЕРФОРАЦІЇ В СТИЛЬНИКОВИХ КОНСТРУКЦІЯХ ЗАСОБАМИ СТРУМИННО-ЛАЗЕРНОГО ВПЛИВУ. – Кременчук, 2016 – 204с.

27. Richerzhagen B. The waterjet-guided laser in wafer cutting / B. Richerzhagen // SYNOVA S.A. – Parc Scientifique A 1015 Lausanne. – Switzerland.
28. High-Precision Screen Cutting with the Water-Jet Guided Laser / FPD China 2005 SEMI Technology Seminar. – ©SEMI. – 2005.
29. [http://www.sdtb.kiev.ua/sdtb\\_ukm\\_ru.htm](http://www.sdtb.kiev.ua/sdtb_ukm_ru.htm)
30. <https://www.yuzhnoye.com/ua/services/tacs/thermal-calculations/>
31. Кочергин А.И. Конструирование и расчет металорежущих станков и станочных комплексов. – Минск: Высшая школа, 1991. – 382 с.
32. В. Головня. Деталі машин. – ЖДТУ, 2016. – 97 с.
33. <https://www.kennametal.com/en/resources/engineering-calculators/end-milling-calculators/force-torque-and-power.html?dv=1516431702585>
34. ISO 2901:2016 ISO metrical trapezoidal threads – Basic and design profiles.
35. <https://unitech.com.ua/blog/kak-vibrat-napravljajushhie-dlja-chpu-stanka/>
36. <https://motioncontrolsystems.hiwin.com/configurator/mg-series-assembly>
37. Гейчук В.М. Динамічне моделювання механізмів верстатів та машин в Autodesk Inventor: навч. посіб. Навчальне електронне видання. [для студ. вищ. навч. закл.] / В.М. Гейчук, С.В. Вакуленко. - Київ: НТУУ "КПІ", 2015. – 167 с.
38. Гейчук В.М. Системи комп'ютерного проектування верстатів: метод.вказівки. Навчальне електронне видання. [для студ. вищ. навч. закл.] / В.М. Гейчук, - Київ: НТУУ "КПІ", 2015. – 46 с.
39. Гейчук, В. М. Оптимізація вузлів і деталей верстатів та машин за допомогою модуля «Аналіз напружень» Autodesk Inventor [Електронний ресурс] : навчальний посібник для студентів, які навчаються за спеціальністю «Прикладна механіка» / В. М. Гейчук, К. М. Рудаков ; НТУУ «КПІ» ; відп. ред. О. О. Боронко. – Електронні текстові дані (1 файл: 6,72 Мбайт). – Київ : НТУУ «КПІ»,

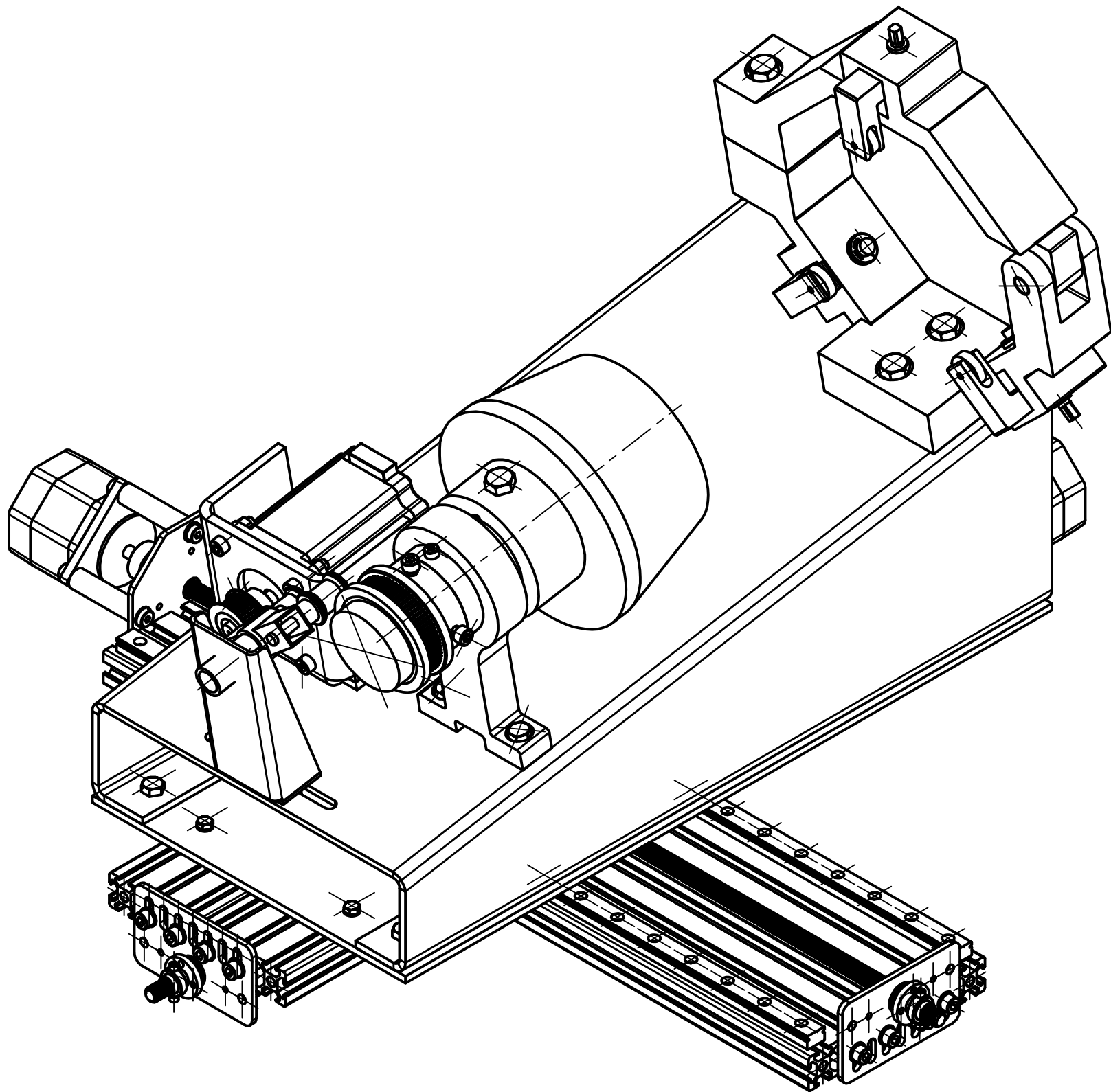
2016. – 176 с. – Бібліогр.: с. 162-164. – Назва з екрана. – Доступ:  
<http://ela.kpi.ua/handle/123456789/15414>.

Перв. примен.	Формат	Зона	Поз.	Обозначение	Наименование	Кол.	Примечание	
Справ. №					Документация			
	A4				Завдання на магістерську дисертацію	2		
	A4			МВ-8101мн.МД000.0000.0000.00	Пояснювальна записка	82		
	A1			МВ-8101мн.МД300.0000.0000.00 3В	Механізований модуль для виготовлення кільцевих зразків з композитної труби	1		
					Загальний вигляд			
	A1			МВ-8101мн.МД300.001000.00 СК	Хрестовий стіл	1		
					Складальний кресленик			
	A1			МВ-8101мн.МД300.002.0000.01	Пристрій для виготовлення кільцевих зразків	1		
					Складальний кресленик			
					Деталювання пристрою для виготовлення кільцевих зразків	2		
Взам. инв. №					Деталювання пристрою для виготовлення кільцевих зразків	2		
	A1				Властивості ВВКМ	1		
	A1				Динамічний аналіз у середовищі Autodesk Inventor	1		
	A1				Розрахунок напружено-деформованого стану модулю	1		
Подп. и дата					Моделювання розсіювання теплових полів при обробці заготовки з композитних матеріалів	1		
Инв. № подл.	Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	МВ-8101мн.МД000.0000.0000.00		
	Разраб.	Басов Д.В.				Розробка механізованих модулів технологічного оснащення для обробки і випробовування композиційних матеріалів	Лит.	Лист
Проб.	Саленко О.Ф.							1
Н.контр.					КПІ ім. Ізгоря Сікорського			
Утв.					ММІ, КМІ, МВ-81мн			



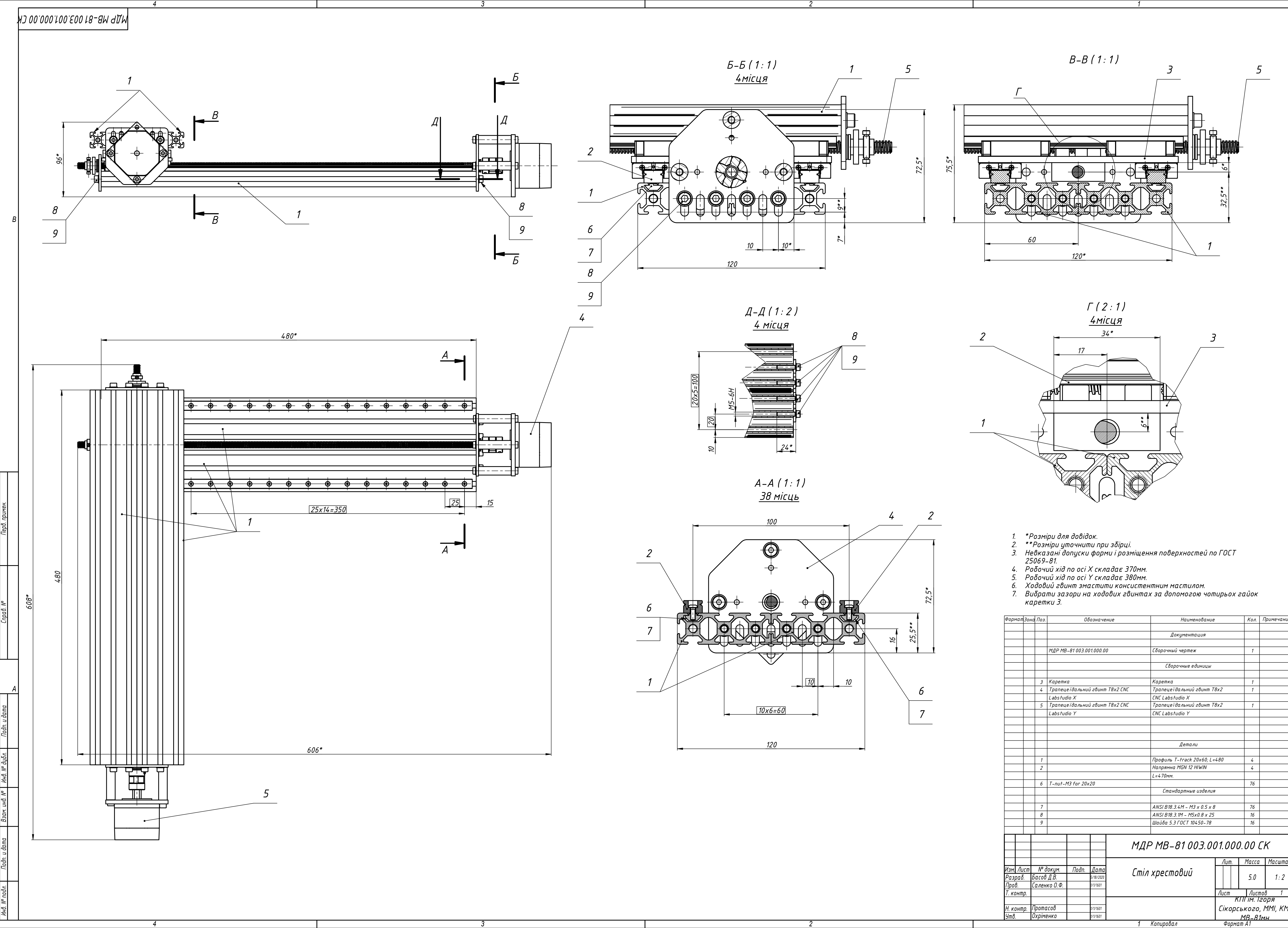


Аксонетрія



- \*Розміри для довідок
- \*\*Розміри уточнити при складанні.
- Горизонтальний хід стола 346 мм
- Вертикальний хід стола 262 мм
- Напрямні змастити консистентним мастилом

				МВ-81 мн.МД300.000.000.00 ЗВ			
				Механізований модуль для виготовлення кільцевих зразків із композитної труби			
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	Лит.	Масса	Масштаб
Разраб.	Басов Д.В.			6/16/2020		17,6	1:2,5
Пров.	Саленко О.Ф.				Лист 1		
Т. контр.	Самойленко						
Н. контр.	Протасов С.В.				КПІ ім. Ігоря Сікорського, ММІ, КМ, МВ-81 мн		
Утв.	Охріменко О.А.						
				1	Копіював		
					Формат А1		



Формат	Зона	Поз.	Обозначение	Наименование	Кол.	Примечание
				Документация		
			МДР МВ-81 003.001.000.00	Сборочный чертеж	1	
				Сборочные единицы		
		3	Каретка	Каретка	1	
		4	Тrapeцедальний гвинт T8x2 CNC Labstudio X	Тrapeцедальний гвинт T8x2 CNC Labstudio X	1	
		5	Тrapeцедальний гвинт T8x2 CNC Labstudio Y	Тrapeцедальний гвинт T8x2 CNC Labstudio Y	1	
				Детали		
		1	Профиль T-Track 20x60; L=480	Профиль T-Track 20x60; L=480	4	
		2	Напряжна MGN 12 HWIN L=470мм	Напряжна MGN 12 HWIN L=470мм	4	
		6	T-nut-M3 For 20x20	T-nut-M3 For 20x20	76	
				Стандартные изделия		
		7	ANSI B18.3.4M - M3 x 0.5 x 8	ANSI B18.3.4M - M3 x 0.5 x 8	76	
		8	ANSI B18.3.1M - M5x0.8 x 25	ANSI B18.3.1M - M5x0.8 x 25	16	
		9	Шайба 5.3 ГОСТ 10450-78	Шайба 5.3 ГОСТ 10450-78	16	

МДР МВ-81 003.001.000.00 СК				Лист 1		
Стіл хрестовий				КПІ ім. Ігоря Сікорського, ММІ, КМ, МВ-Вісн		
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	Лист	Листов
Разраб.	Басов Д.В.			6/18/2020		1
Пров.	Саленко О.Ф.			1/1/1601		
Т. контр.						
Н. контр.	Протасов			1/1/1601		
Этб.	Охріменко			1/1/1601		



	A
--	---



[illegible][illegible][illegible][illegible][illegible]

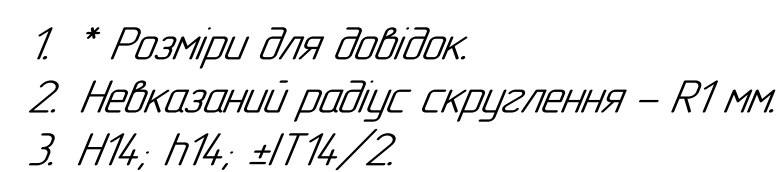
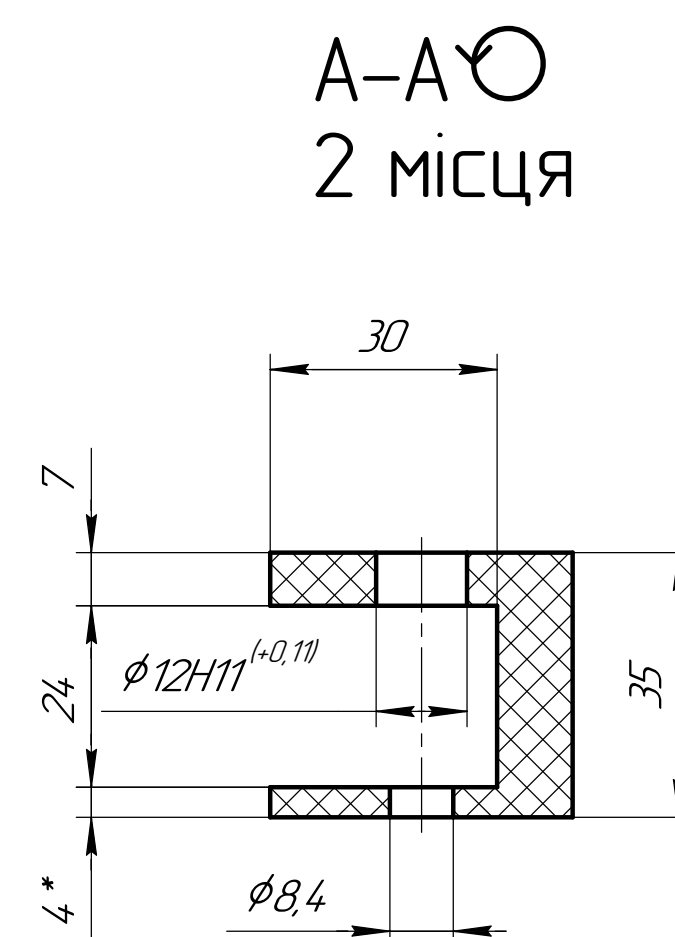
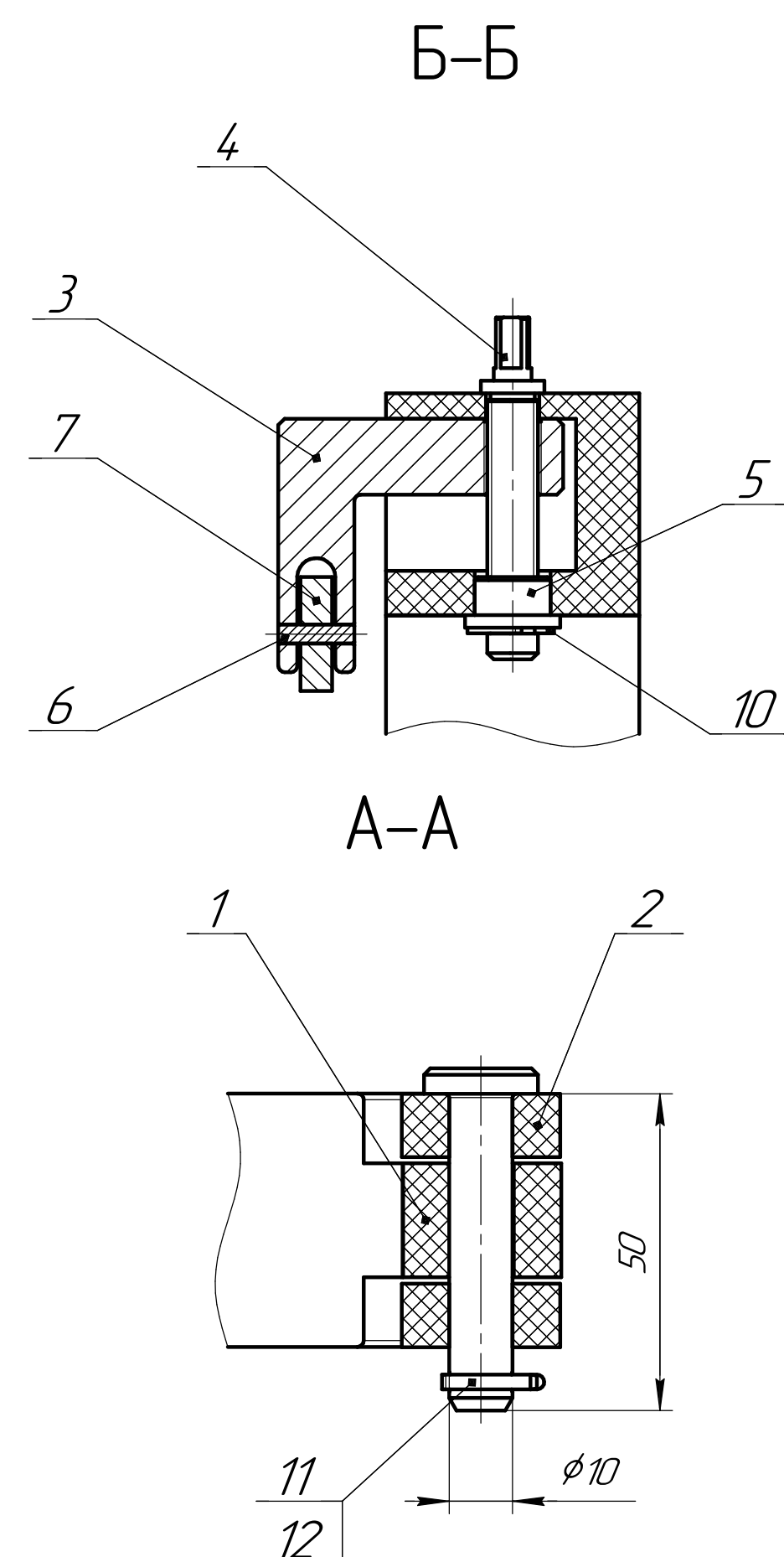
Technical drawing of a mechanical part. The front view shows a circular base with a diameter of  $\phi 70$  and a central hole of  $\phi 4.2$ . The side view shows a profile with a total width of 100, a base height of 20, and a top flange with a diameter of  $\phi 6.4$  and a thickness of 2. The cross-sectional view shows a central shaft with a diameter of  $\phi 4.2$  and a flange with a diameter of  $\phi 6.4$  and a thickness of 2. The drawing includes various radii (R2, R20) and chamfers (6 подтупит). The part is labeled with a drawing number MB-8101M1M1300.002.000.05.

Наименование		Материал		Масса		Длина	
№ п/п	Наименование	Материал	Масса	Длина	Материал	Длина	Масса
1	Корпус	АК2Ж(МЛ-2) ГОСТ 1583-93	0.7	11	АК2Ж(МЛ-2) ГОСТ 1583-93	11	0.7

МБ-8101М1М1300.002.000.05

МБ-8101М1М1300.002.000.05

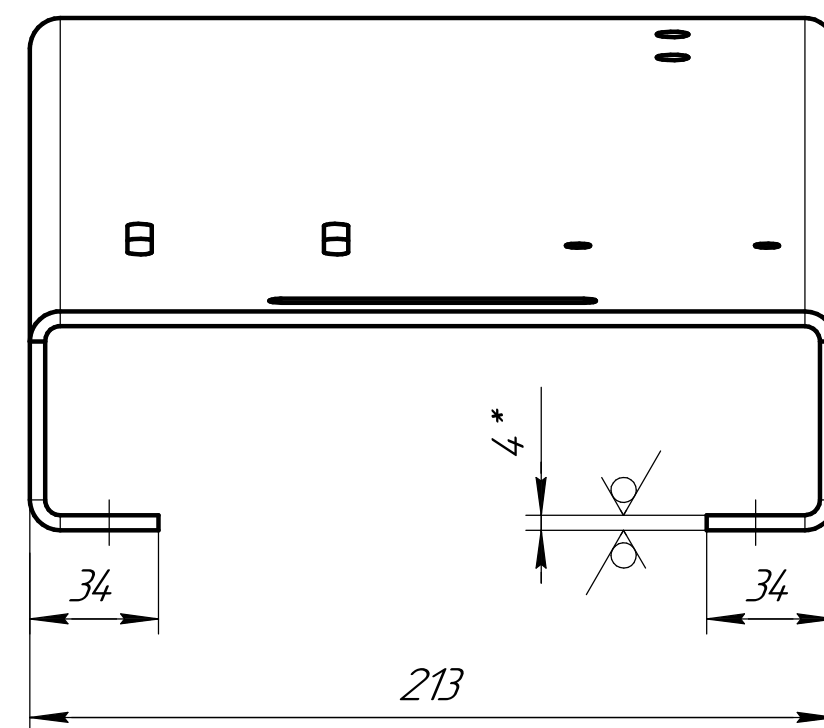
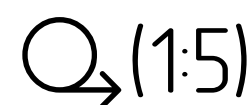


MB-8101MH.M1300.002.100.00 CK

1. Всі розміри для довідок.  
2. Краї деталі Вісь поз. 6, після установки деталі Ролік поз. 7, розквітати.

Копировал	Формат A2
-----------	-----------

[illegible]



B

						МВ-8101мн.МД300.002.000.02				
Изм./Лист	№ докум.	Подп.	Дата	База			Лист	Масса	Масштаб	
Разраб.	Басов Д.В.							В	6,2	1:2
Проб.	Саленко О.Ф.						Лист		Листов 1	
Т.контр.	Самойленко О.В.									
Н.контр.	Протасов С.В.			Лист 02	А-0-4,0 ГОСТ 19904-90 08кп ГОСТ 14.918-80	КПІ ім. Ізгоря Сікарського				
Утв.	Охріменко О.А.					ММІ, КМ, МВ-8101мн				



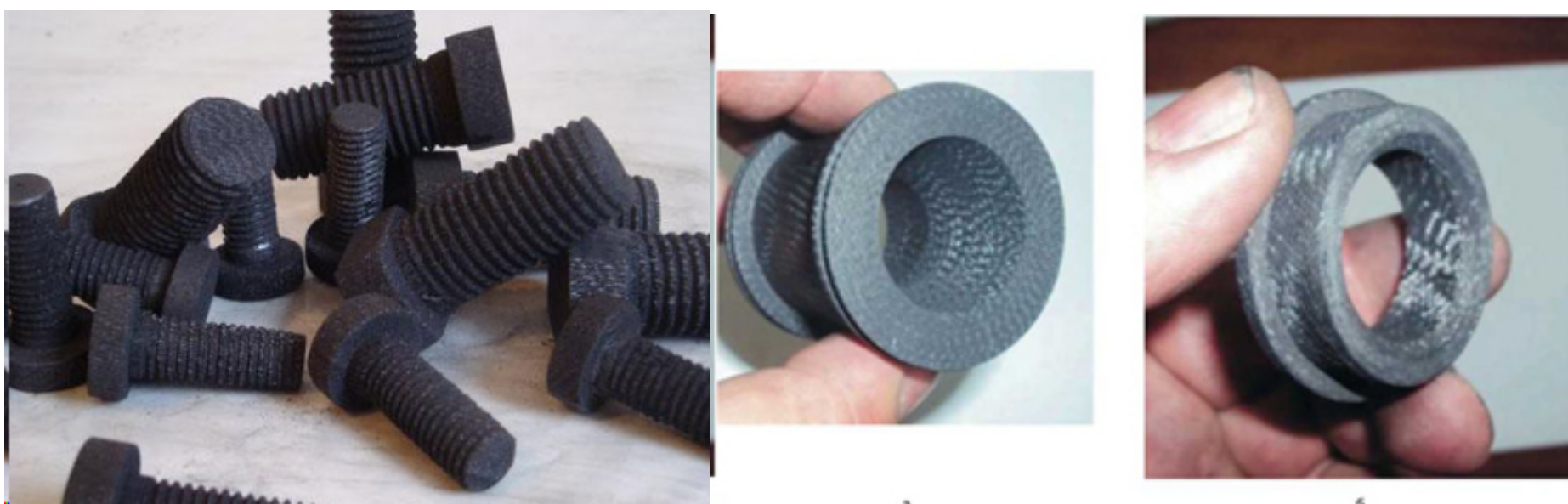
Властивості вуглець-вуглецевих композиційних матеріалів

Вуглець-вуглецеві композиційні матеріали – матеріали на основі вуглецевої матриці та вуглецевих волокон. В якості матриці використовують піролітичний вуглець, або коксові залишки термореактивних смол чи нафтового пеку, а в якості наповнювачів – високоміцні вуглецеві волокна.

Деталі виготовлені з ВВКМ



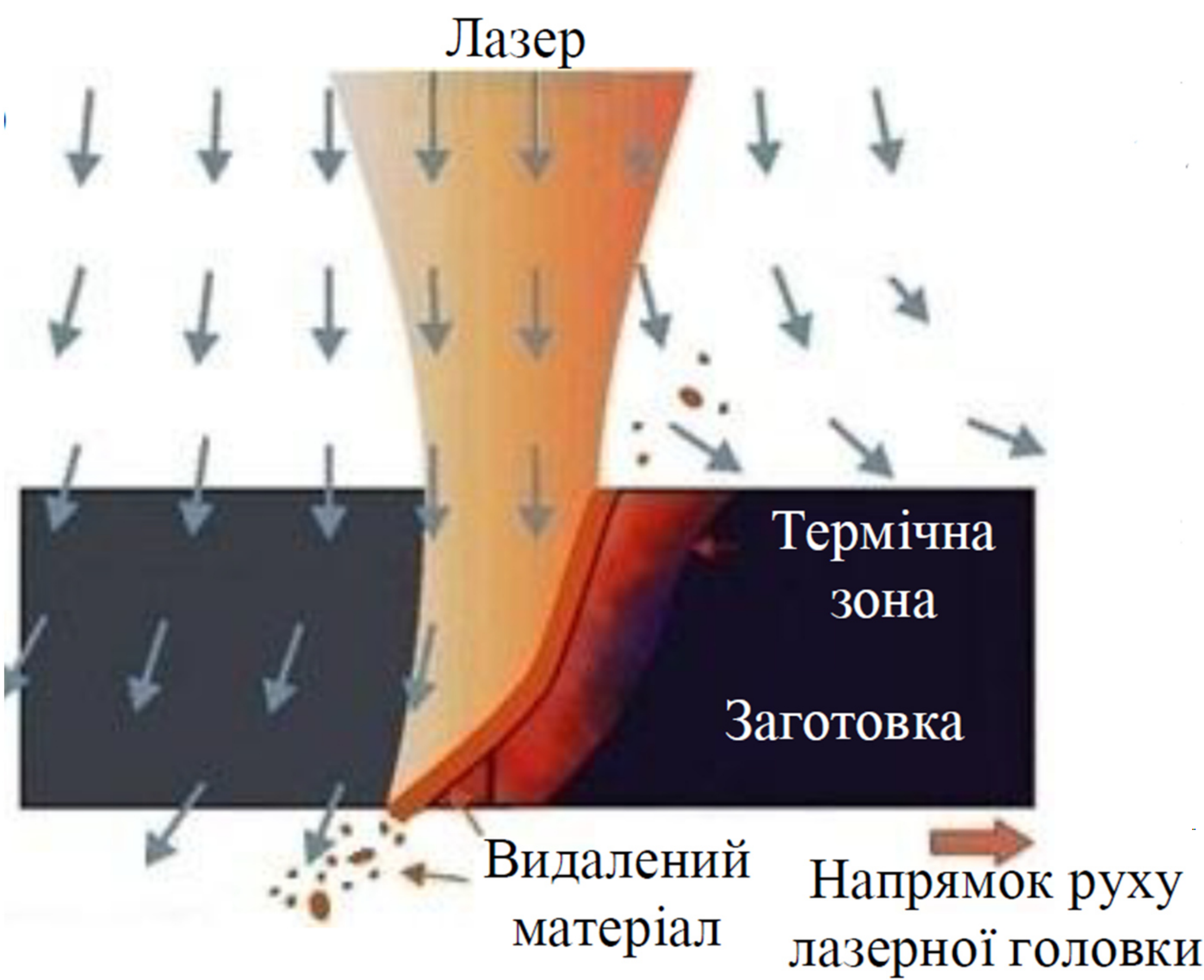
Труба з вуглець-вуглецевого композитного матеріалу



Таблиця фізико-механічних властивостей деяких конструкційних матеріалів

Матеріал	Щільність, кг/м³	Міцність при розтязі, МПа	Модуль Юнга, ГПа	Питома міцність, е*10³, км	Питомий модуль, Е*10⁶, км
Вуглепластик	1450-1600	780-1800	120-130	5,-112	9-25
Склопластик	2120	1926	69	91	3,2
Високоміцна сталь	7806	1402	210	18	2,7
Алюмінієвий сплав	2710	503	75	18	2,7
Титановий сплав	4430	1002	110	28	2,5
Поліамід 6,6	1140	82,6	28	7,24	0,24

Схема впливу тепломеханічного потоку при обробці заготовки



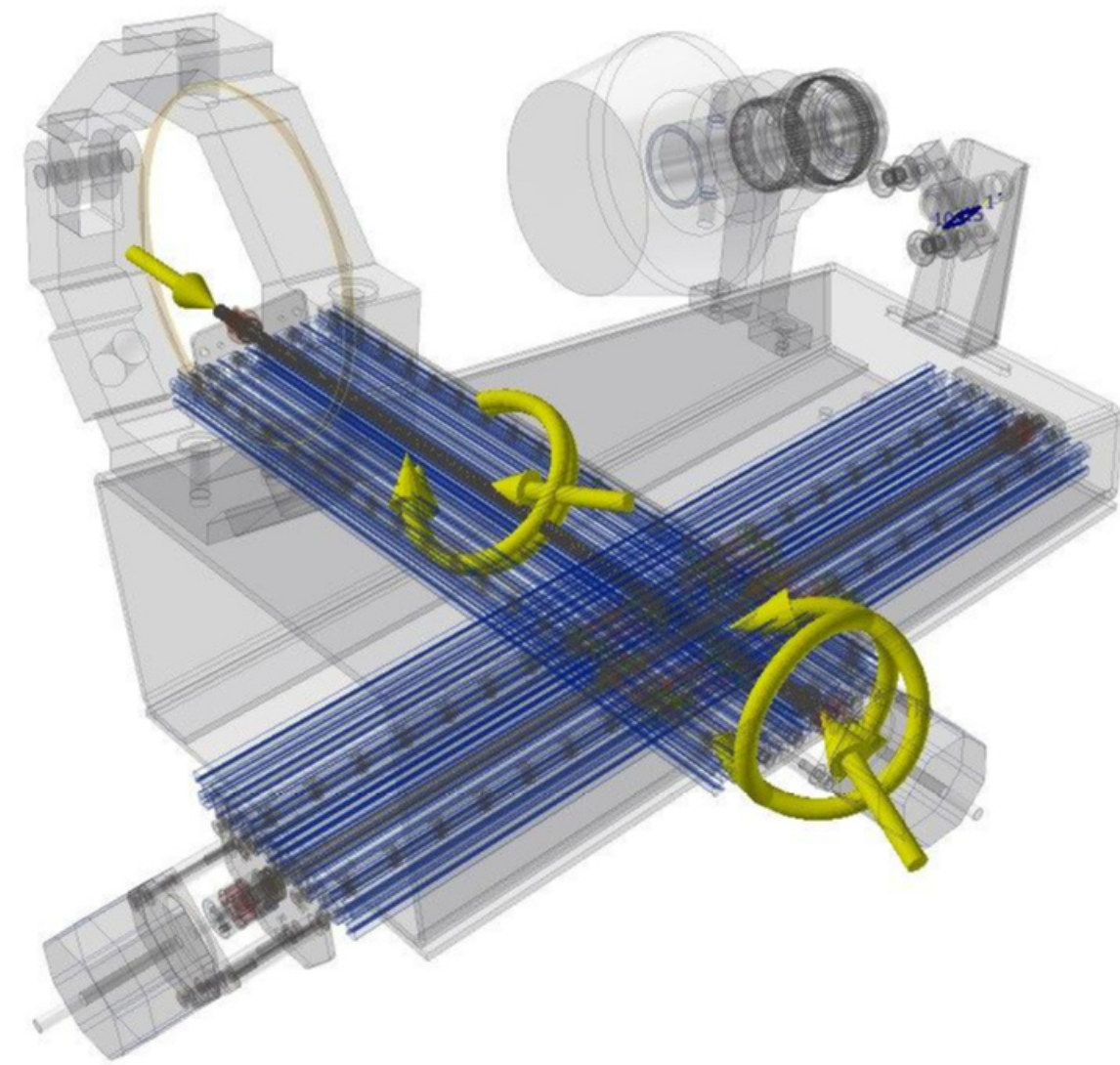
Таблиця фізико-механічних властивостей ВВКМ типу КІМФ

Об’ємна щільність, не менше, г/см³	1,7 г/см³, (фактично не менше 1,78 г/см³)
Руйнівні зусилля кг/см³ при стиску по осям армування X(Y), не менше	1200 (фактично не менше 1700)
Руйнівні зусилля кг/см³ при розтягу по осям армування X(Y), не менше	240 (фактично не менше 600)
Руйнівне зусилля при зрізі, МПа, не менше	24,5
Руйнівне зусилля при згині, МПа, не менше	88,2
Коефіцієнт теплопровідності (при температурі 50°С), ккал/м час, град	7
Модуль пружності при стиску по осям армування X(Y), Мпа, не більше	2,45·10⁴
Пористість матеріалу, %	*8,7
Ударна в’язкість, КДж/м³	*10
Утримуючий електроопір, Ом*мм²/м	30

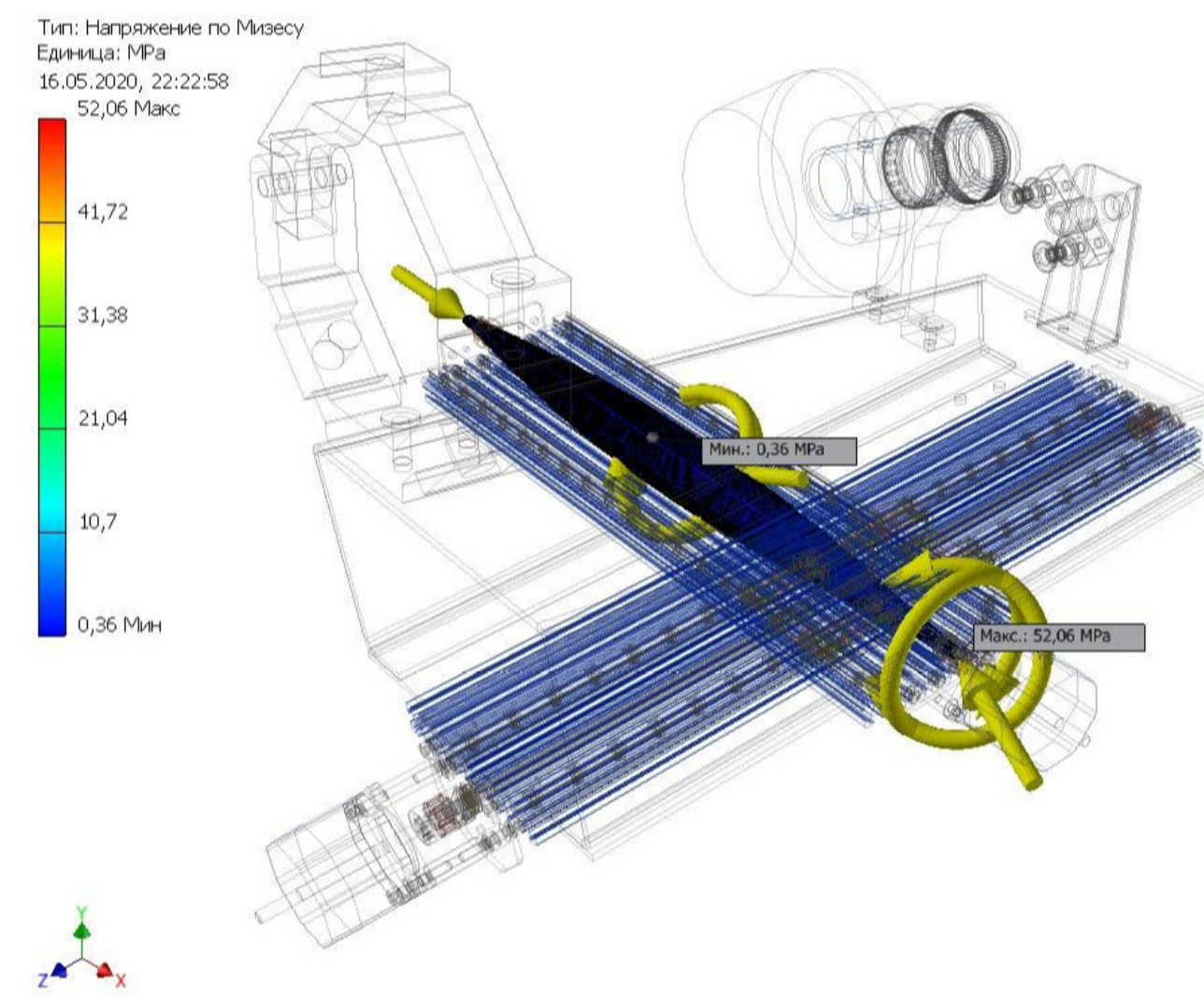


# Динамічний аналіз у віртуальному середовищі Autodesk Inventor

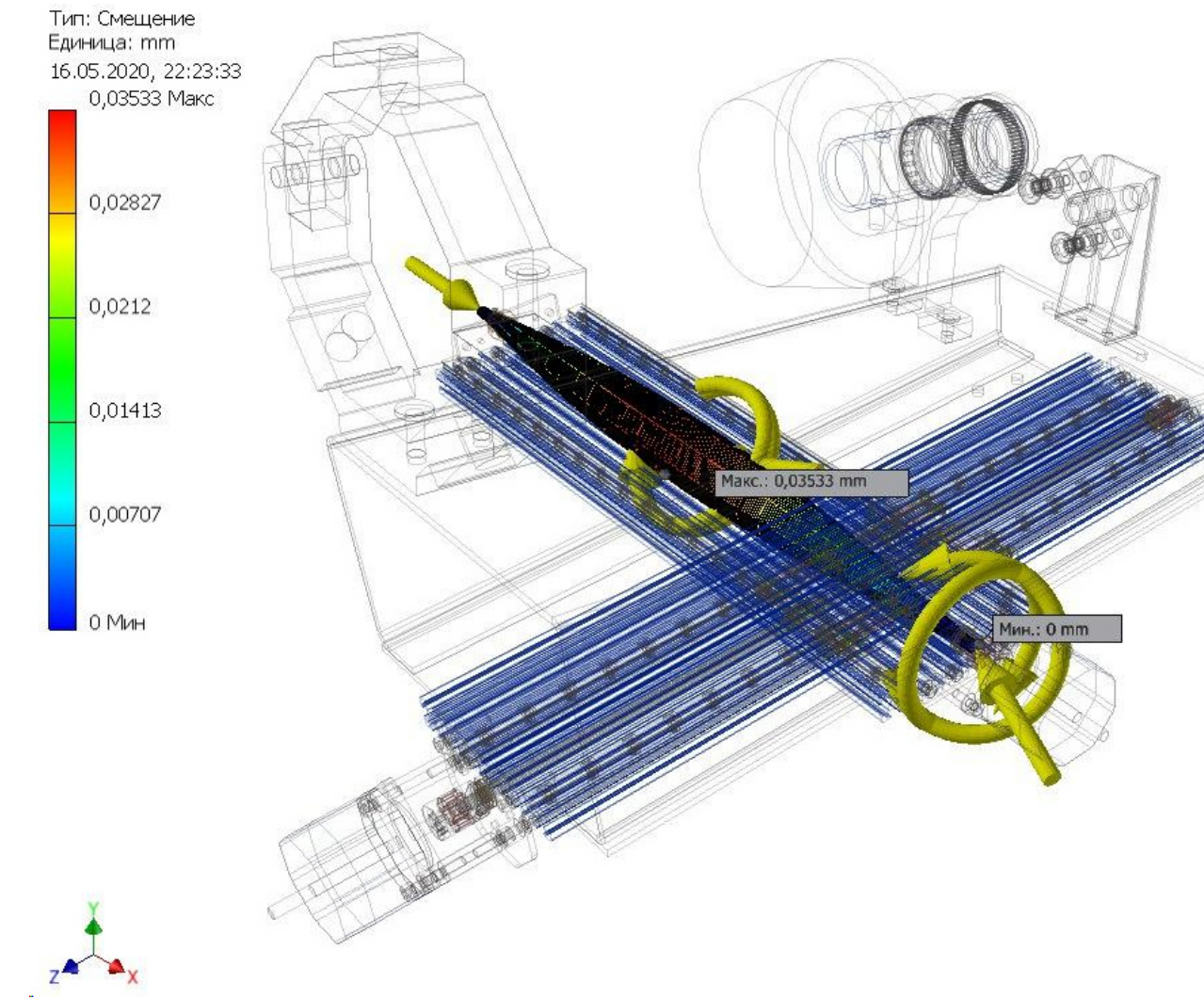
## Результати розрахунку ходового звинта



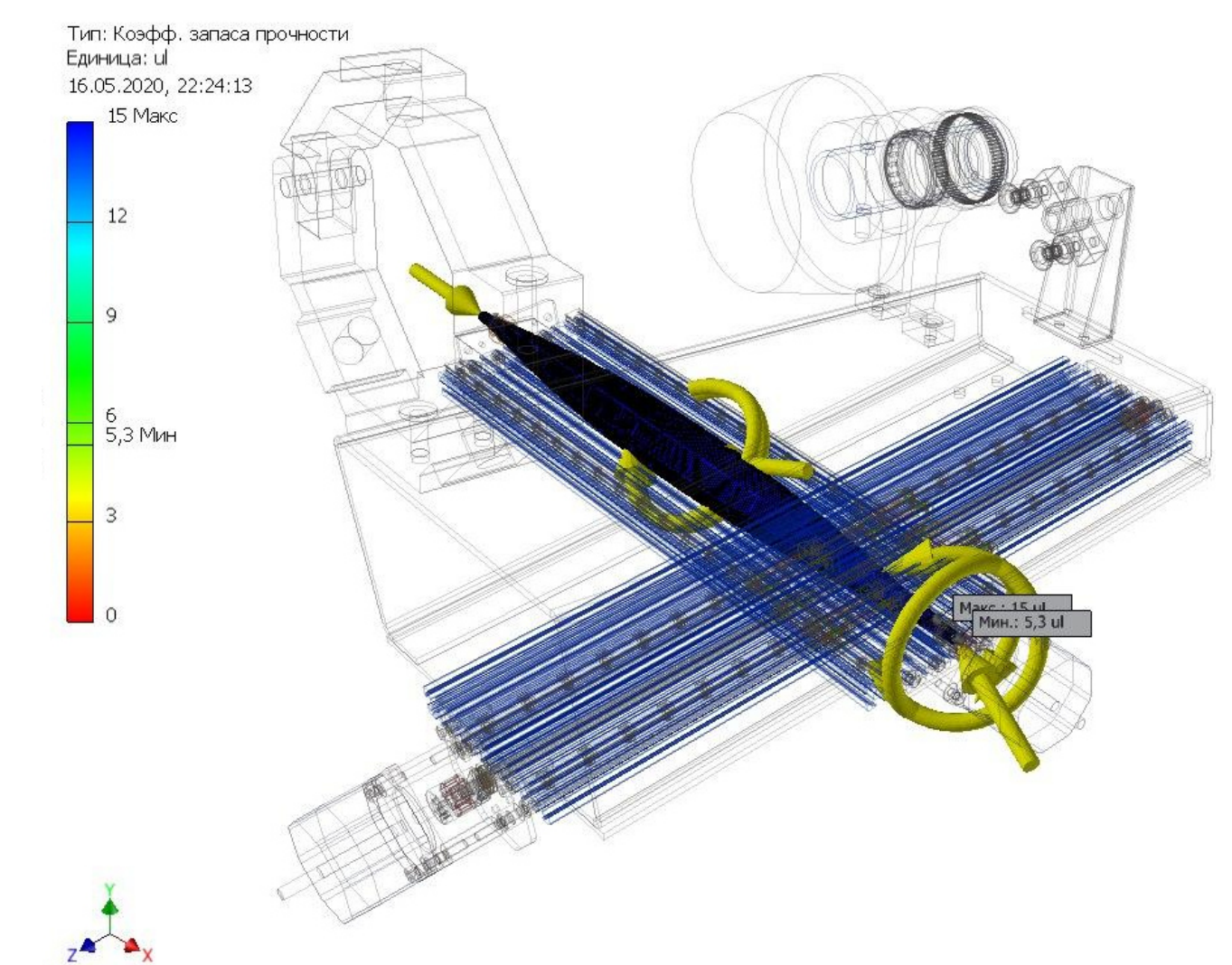
Розрахункова схема



Напруження по Мізесу

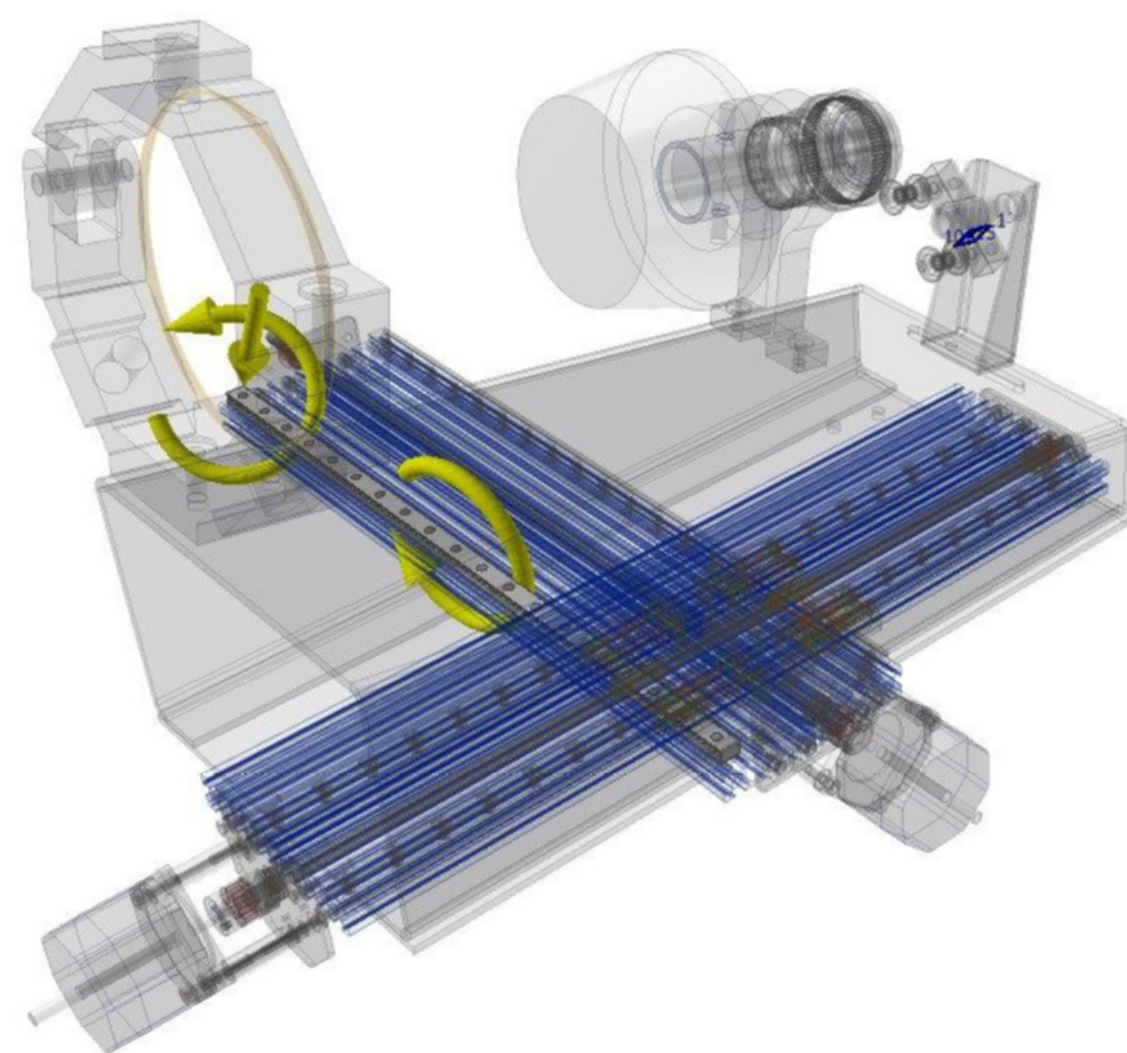


Зміщення

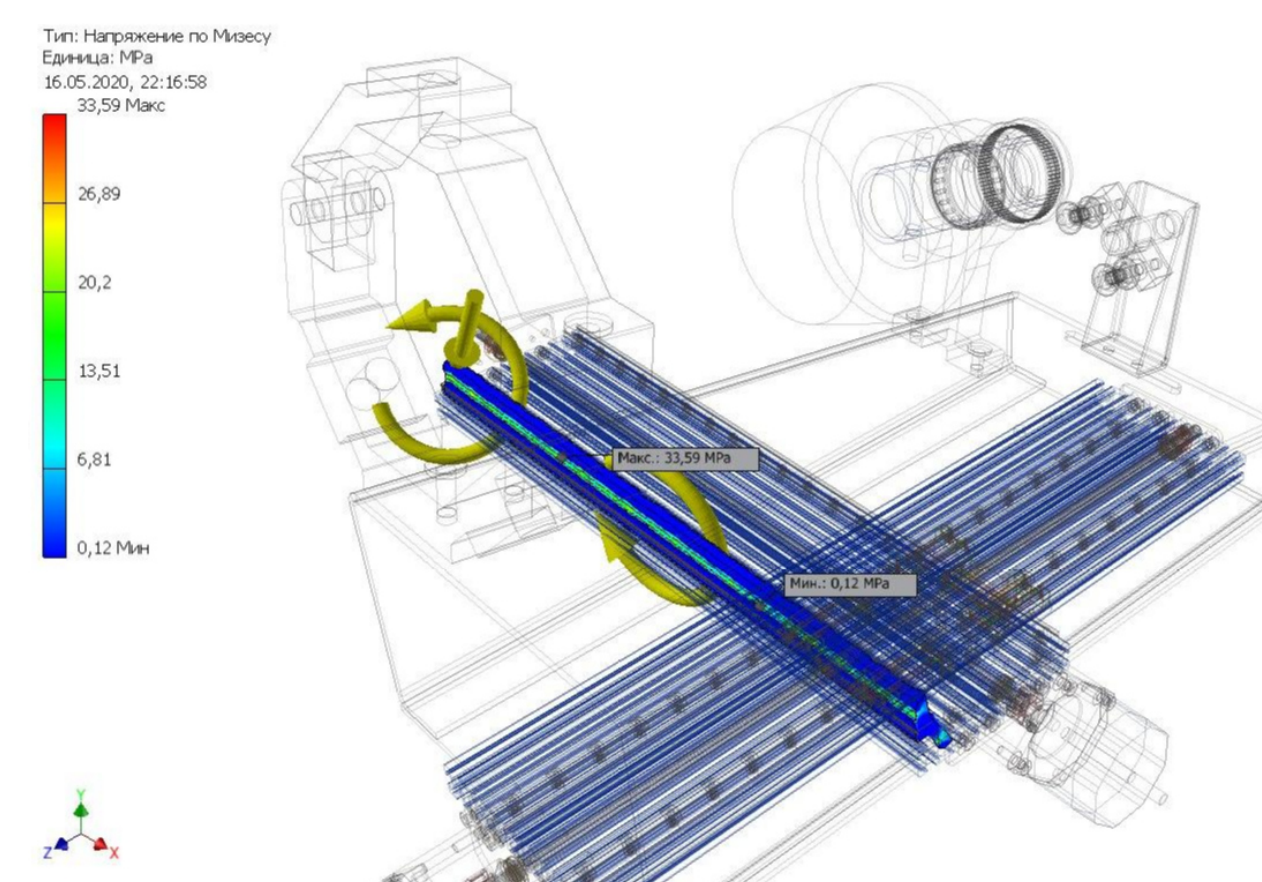


Коефіцієнт запасу міцності

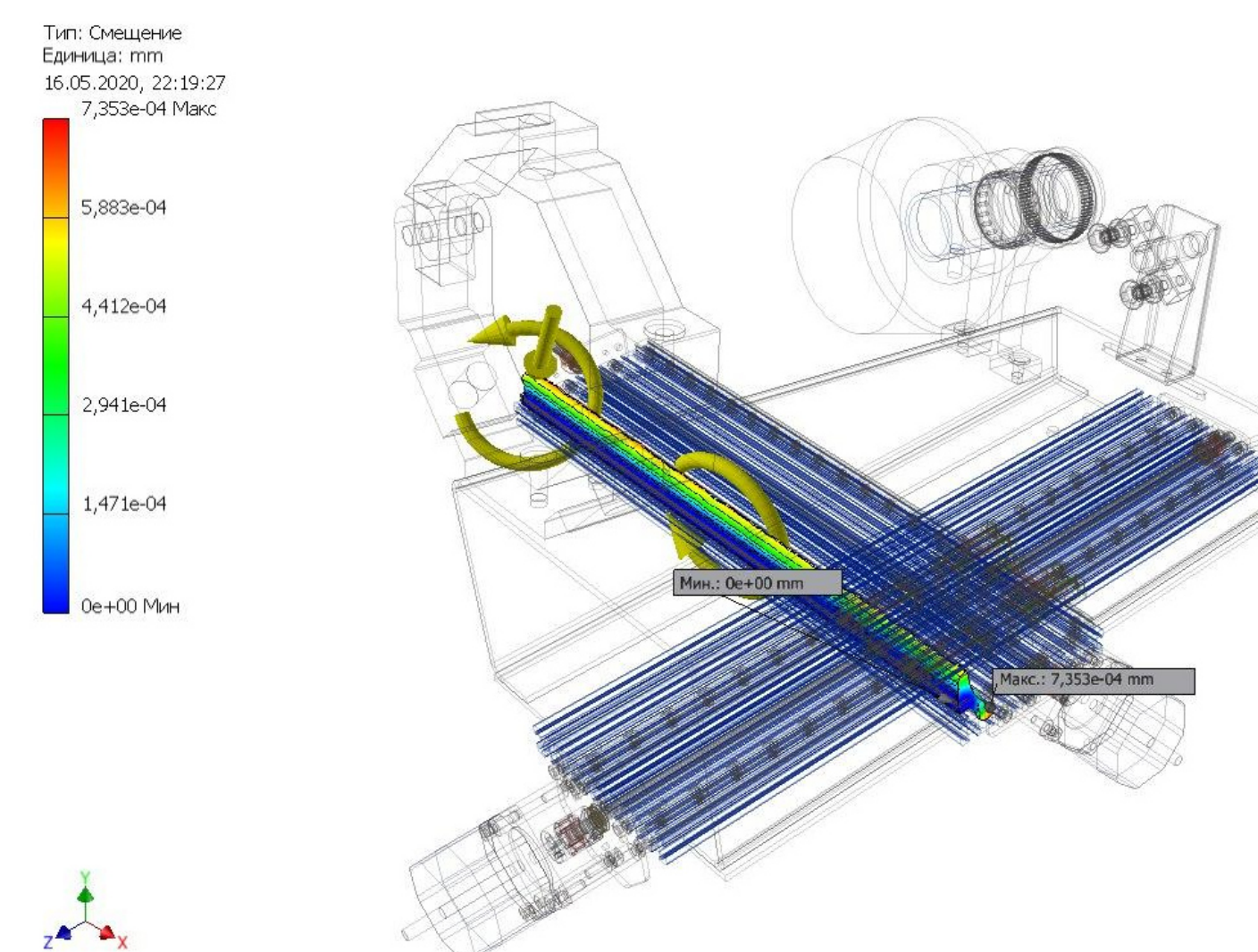
## Результати розрахунку напрямної



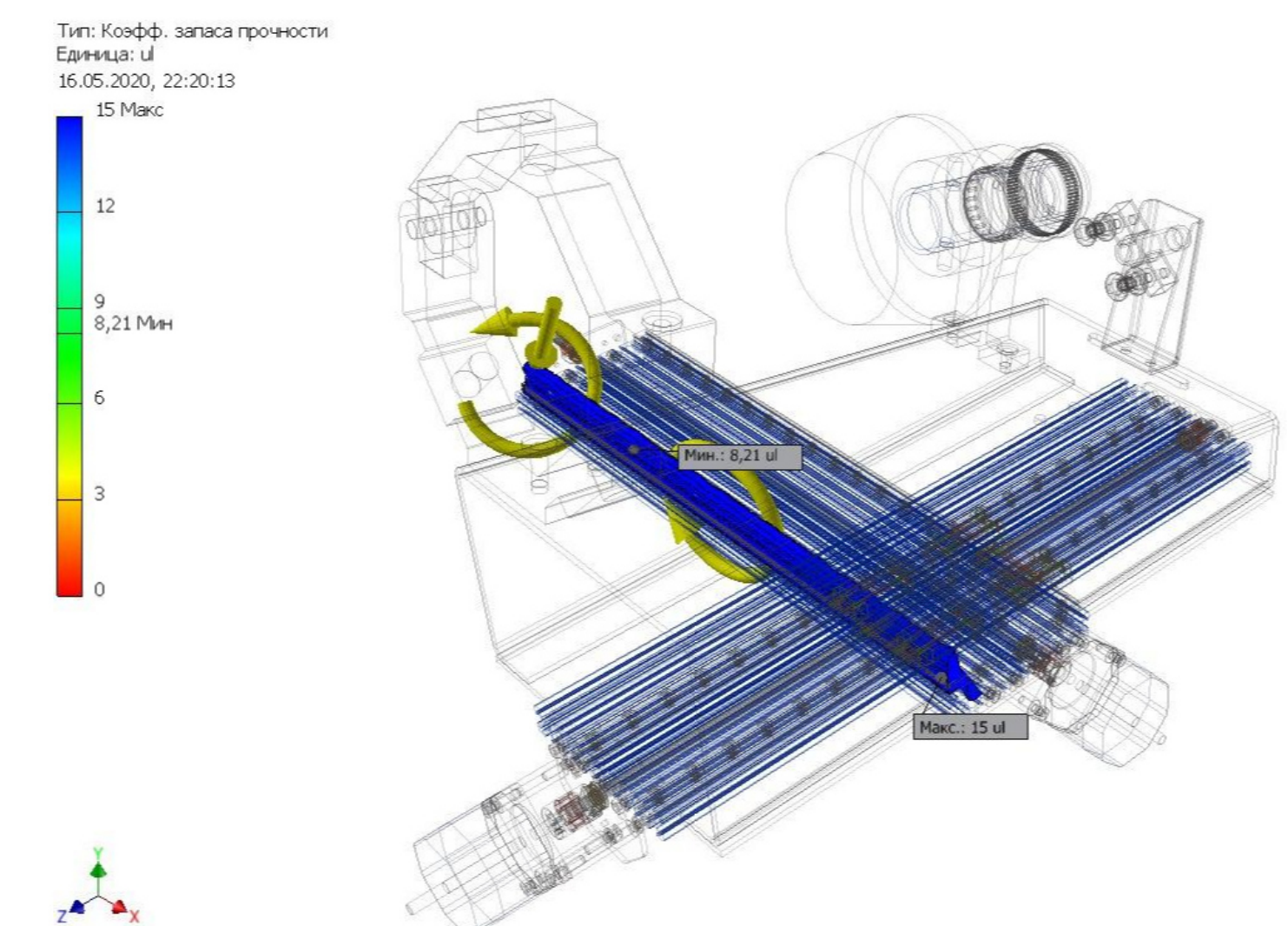
Розрахункова схема



Напруження по Мізесу



Зміщення



Коефіцієнт запасу міцності

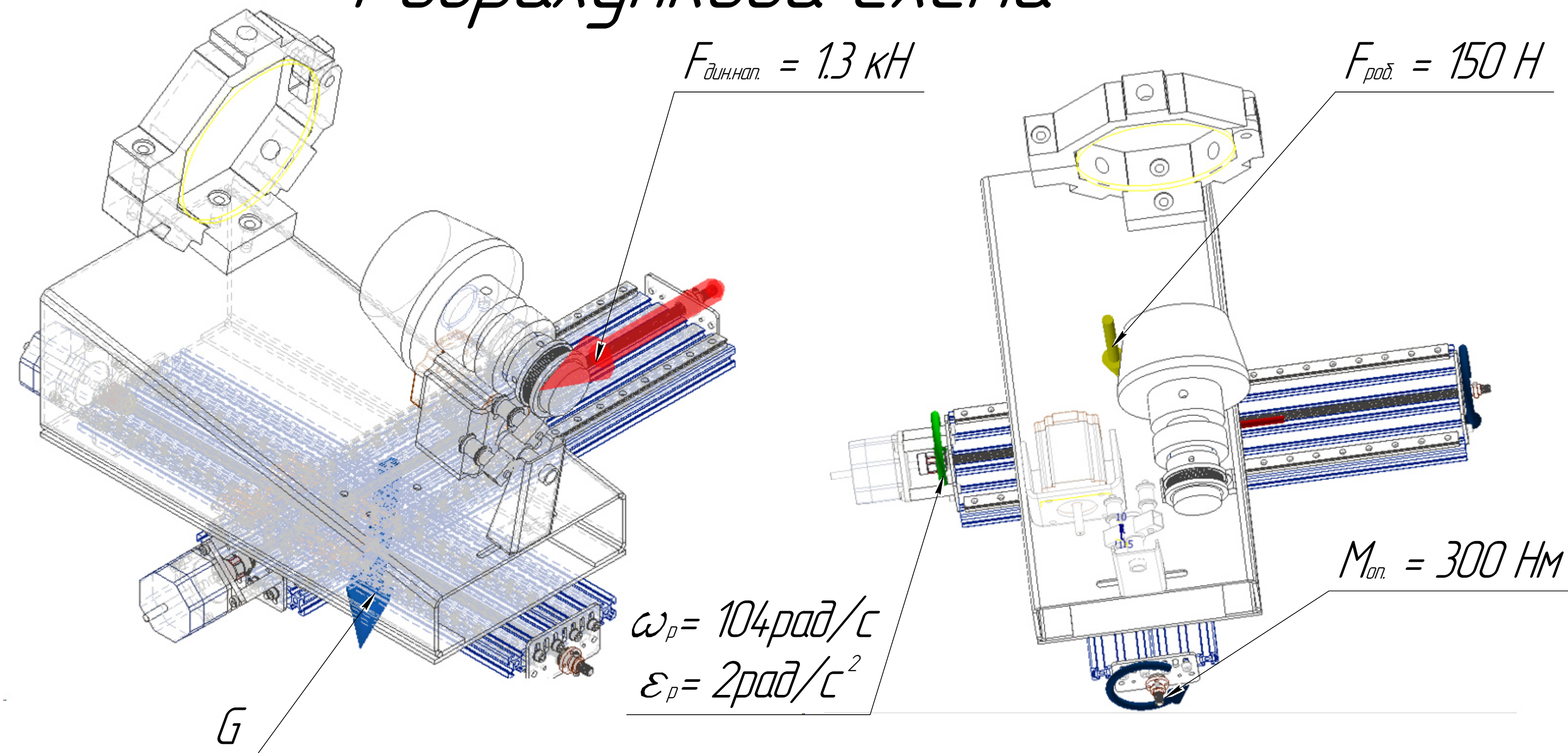
КПІ ім. Ігоря Сікорського, ММІ, КМ, МВ-81мн

Розробив: \_\_\_\_\_/Басов Д.В.  
Керівник: \_\_\_\_\_/дтн, професор Саленко О.Ф.



# Розрахунок напружено-деформованого стану модулю

## Розрахункова схема



$\omega_p$  – кутова швидкість руху;

$\varepsilon_p$  – кутове прискорення руху;

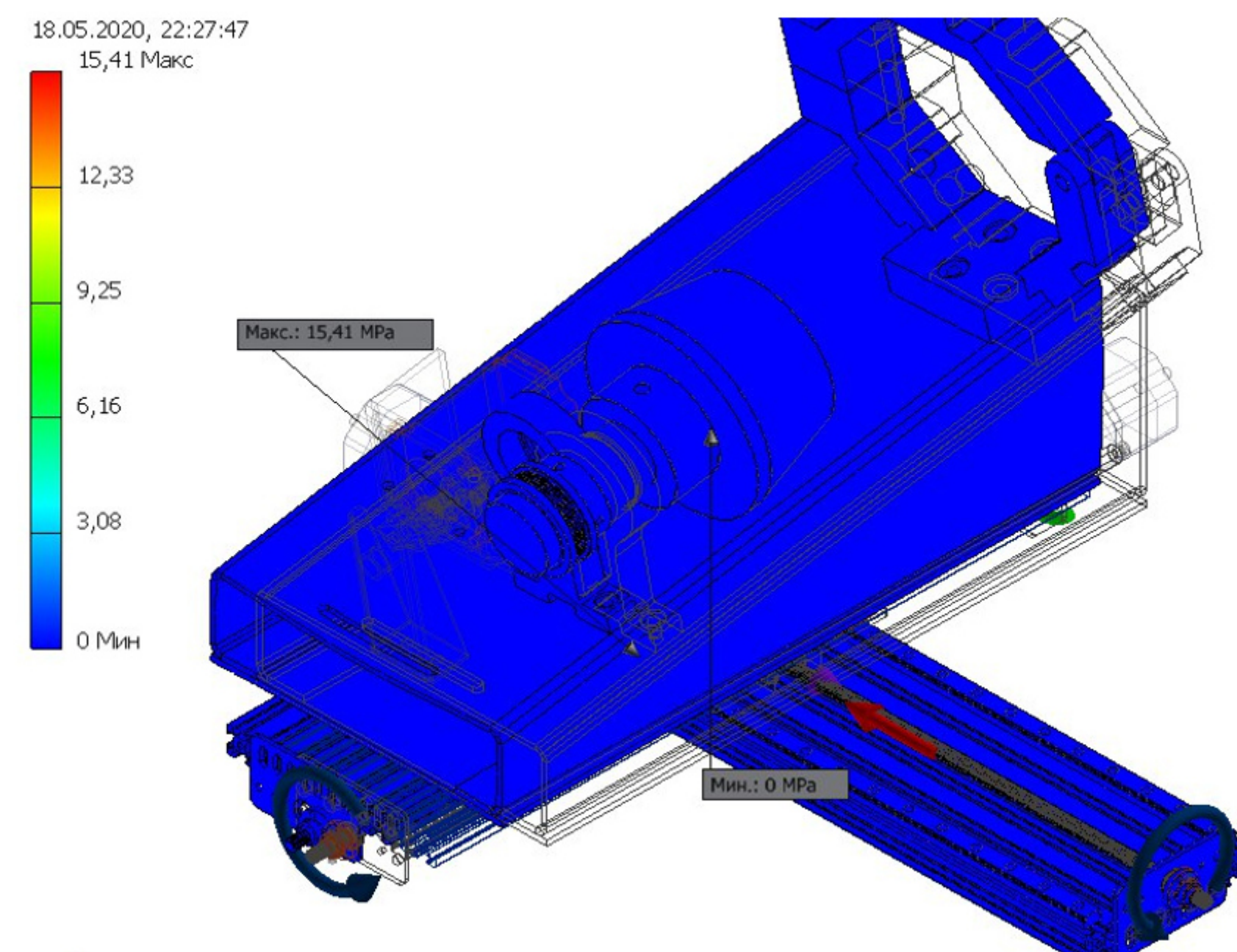
$G$  – сила тяжіння;

$F_{\text{дин.оп.}}$  – зусилля динамічних навантажень;

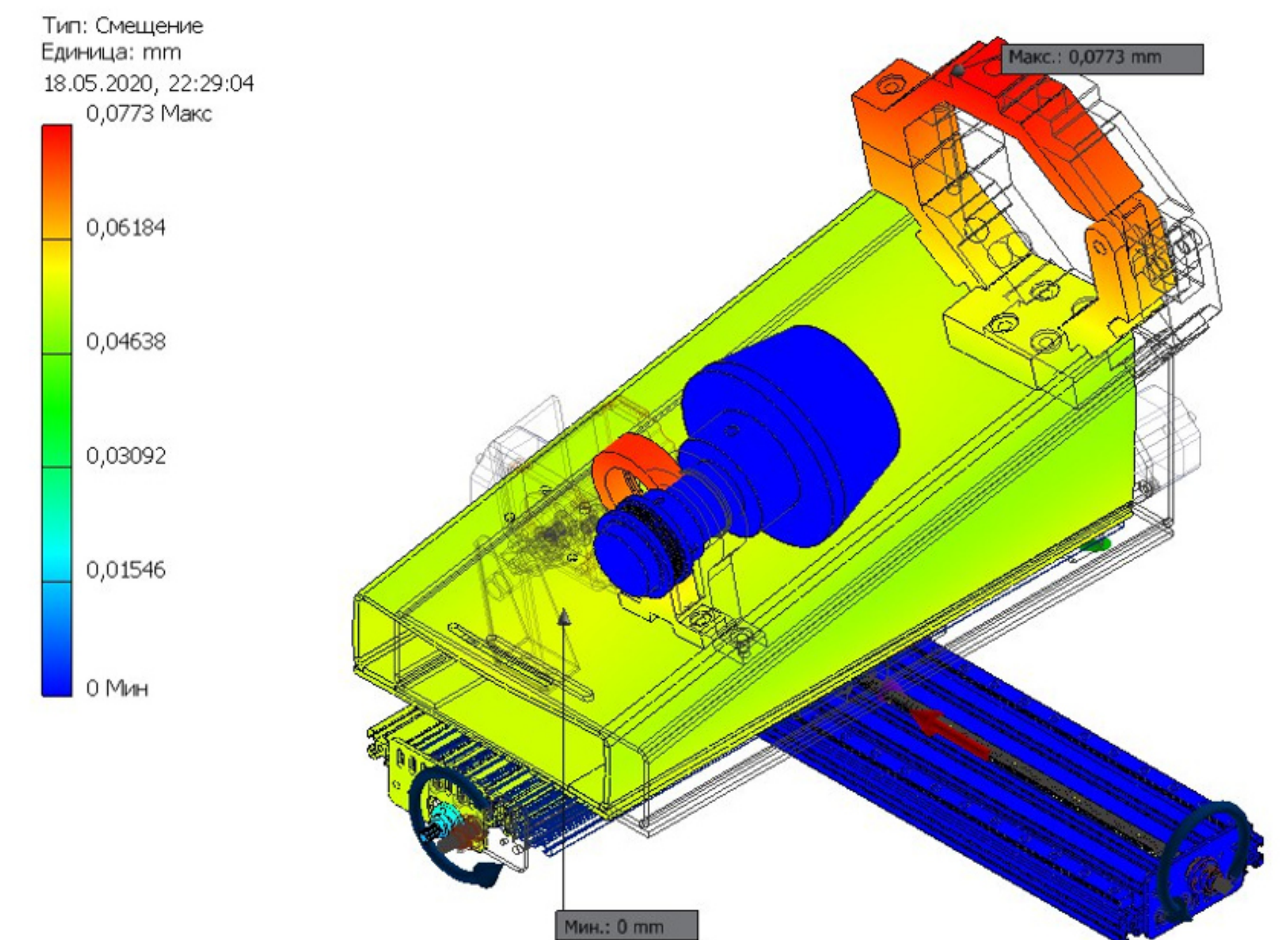
$F_{\text{роб.}}$  – зусилля від робочих навантажень;

$M_{\text{оп.}}$  – момент опору динамічних навантажень;

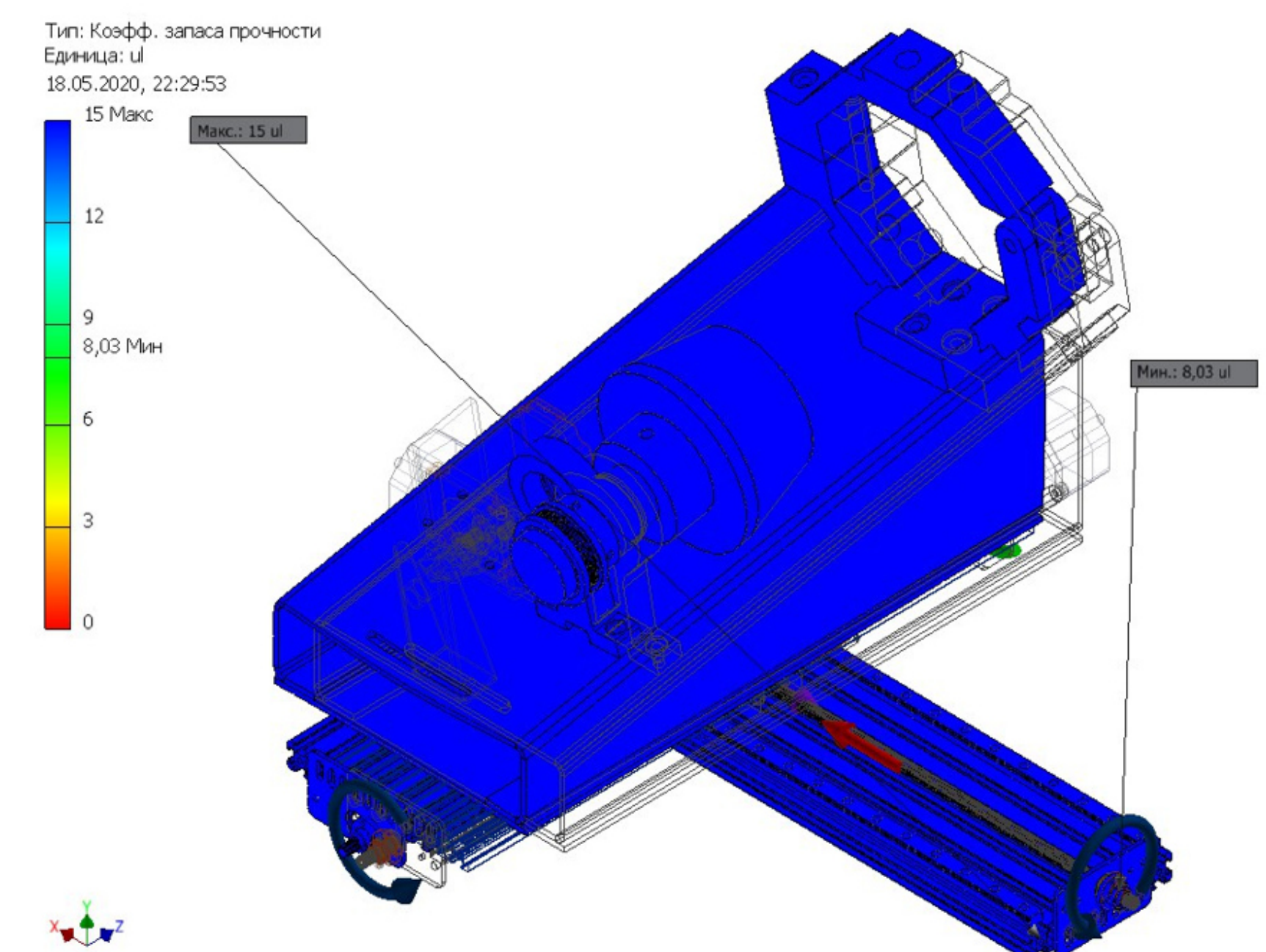
## Напруження по Мізесу



## Зміщення



## Коефіцієнт запасу міцності

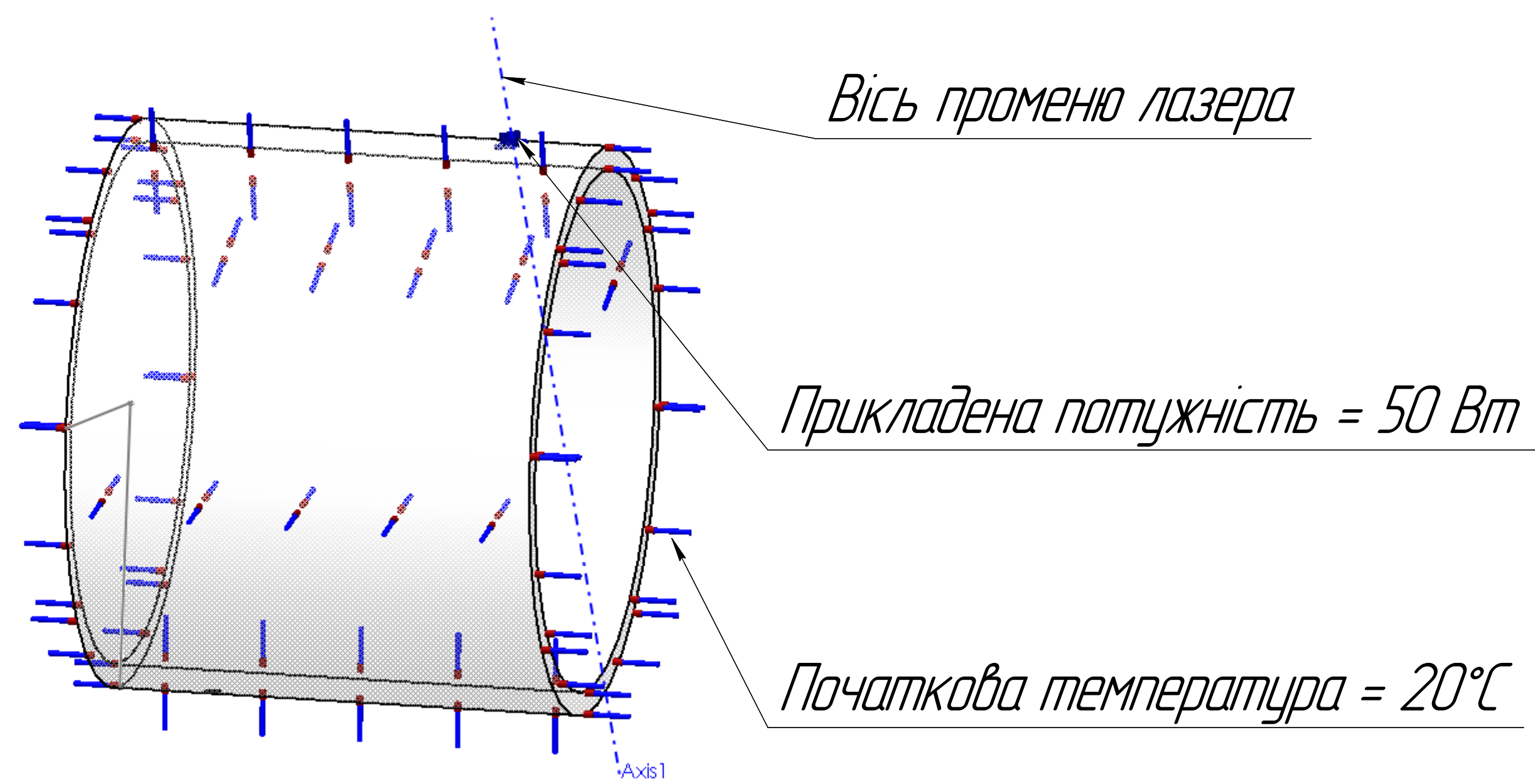


КПІ ім. Ізгоря Сікарського, ММІ, КМ, МВ-81мн

Розробив: \_\_\_\_\_/Басов Д.В.  
Керівник: \_\_\_\_\_/дтн, професор Саленко О.Ф.

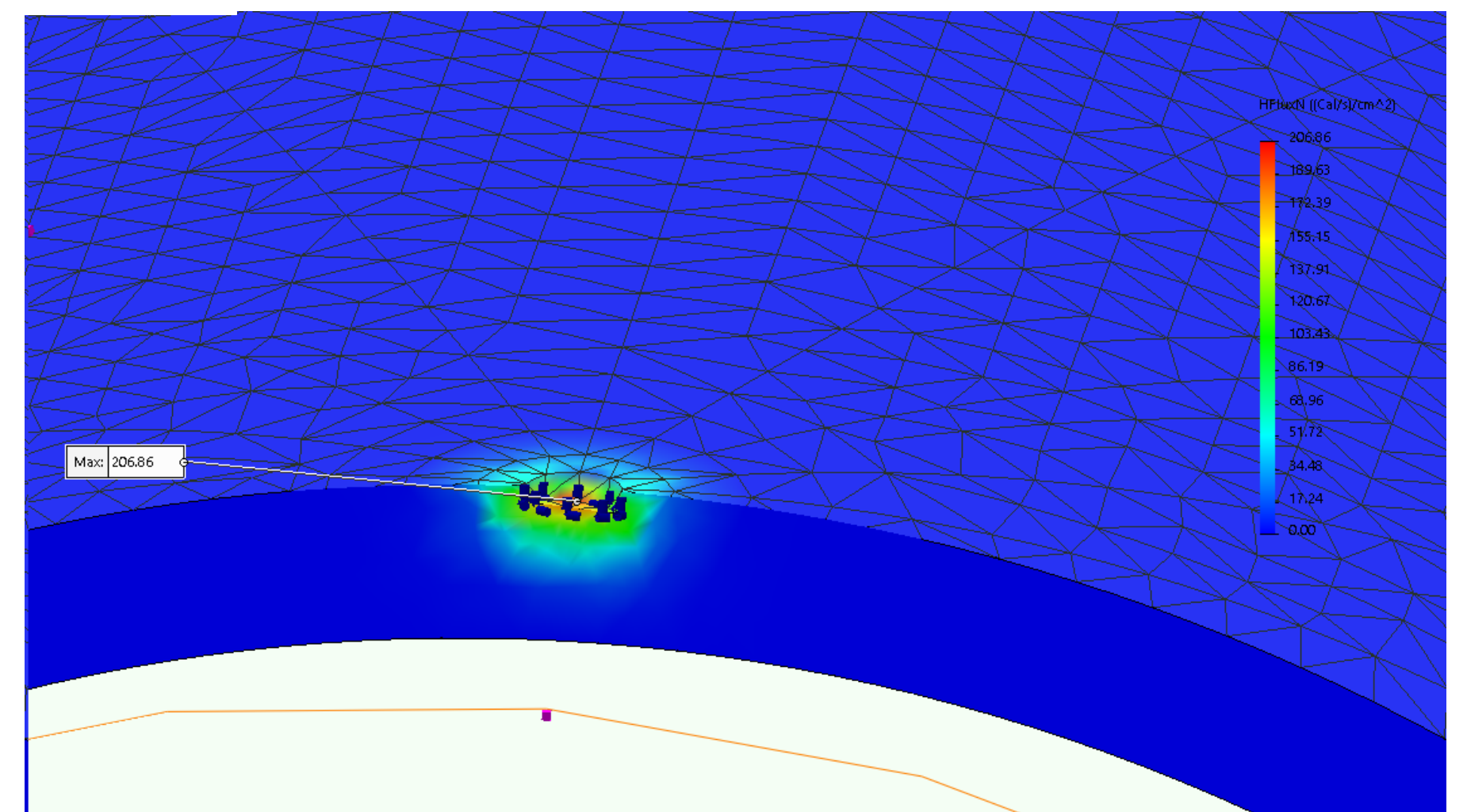
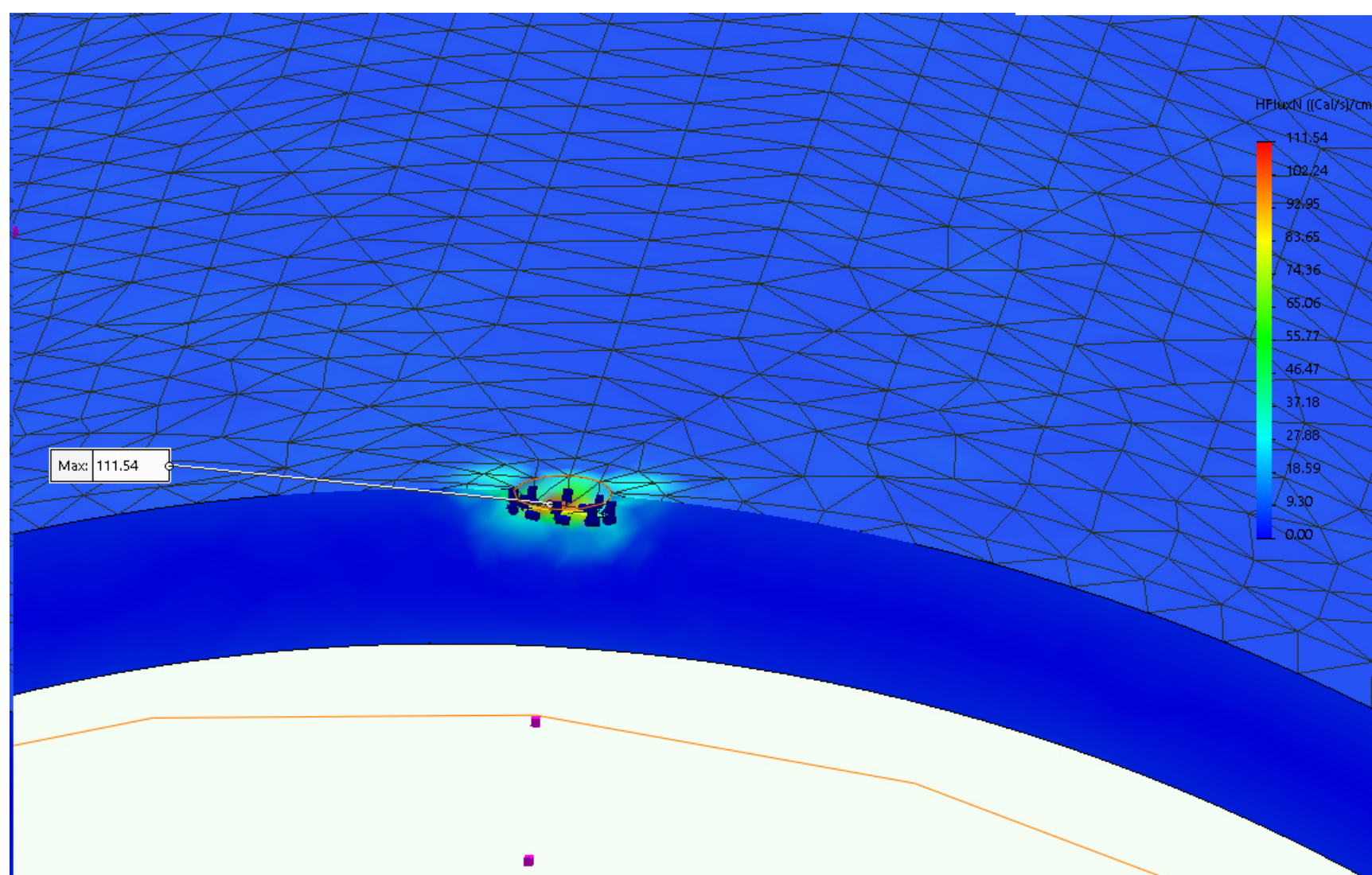


# Моделювання розсіювання теплових полів при обробці заготовки з композиційного матеріалу

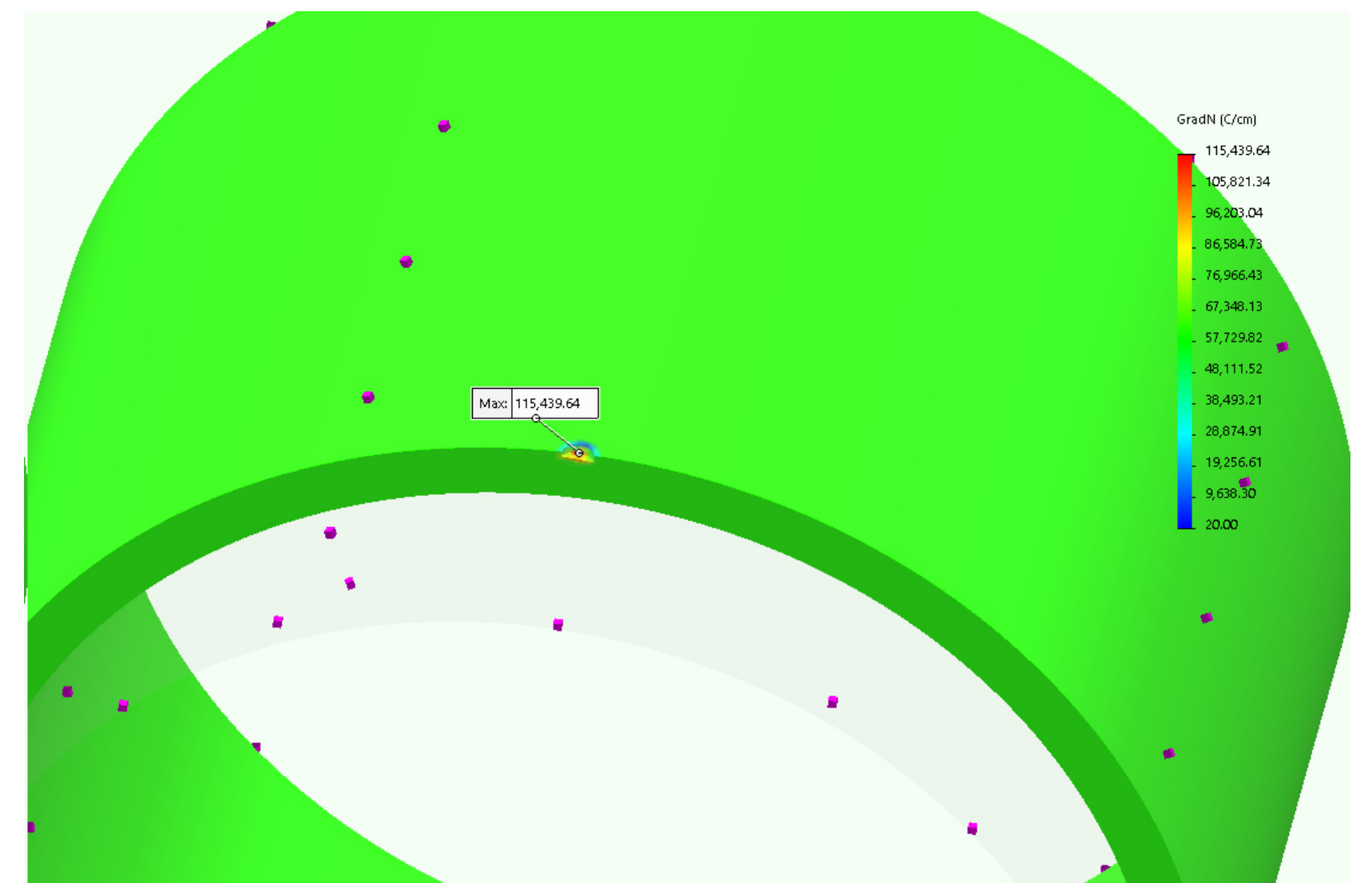
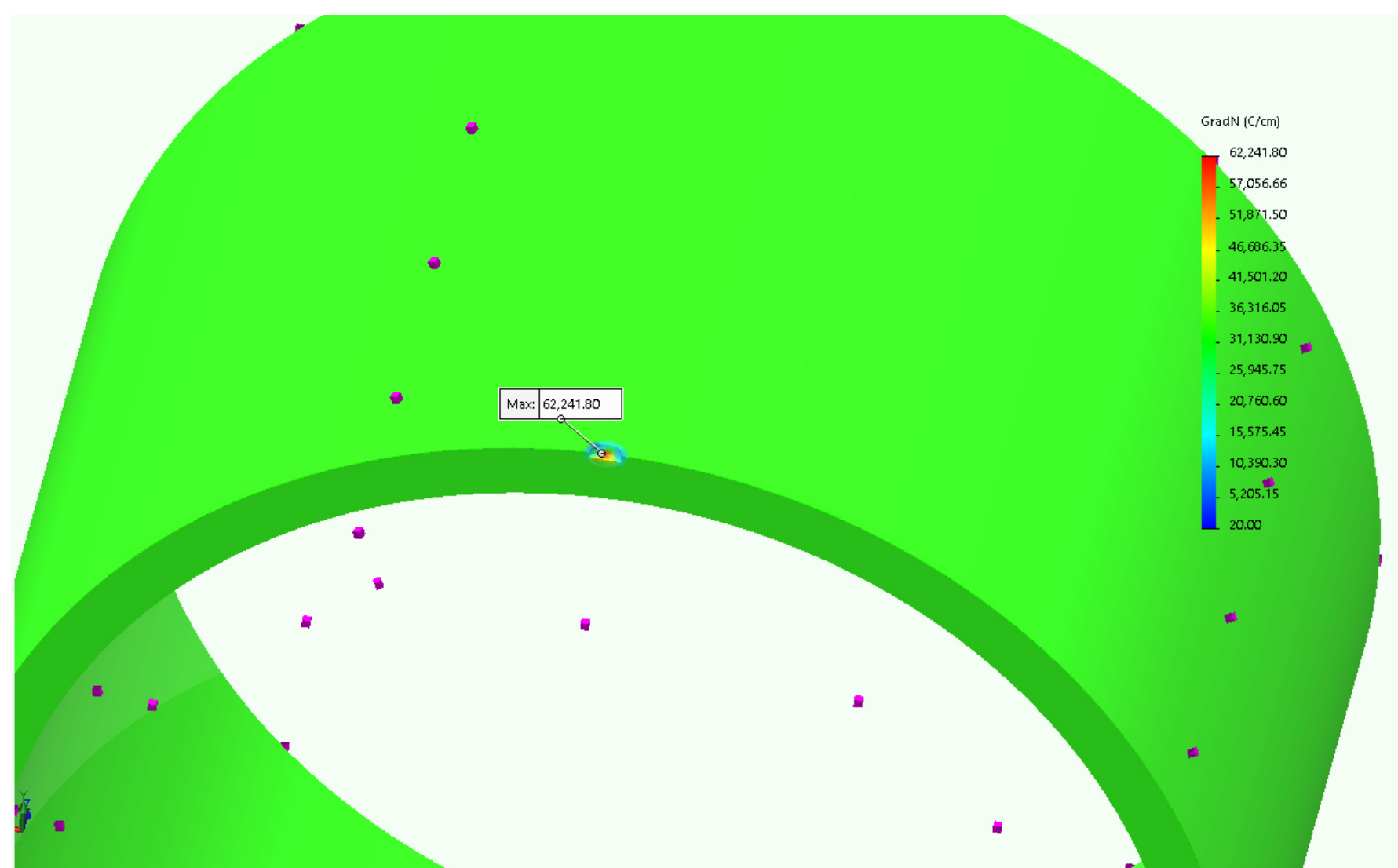


Тривалість процесу – 3 с  
Крок – 0,05 с  
Кількість ітерацій –  $i = 60$

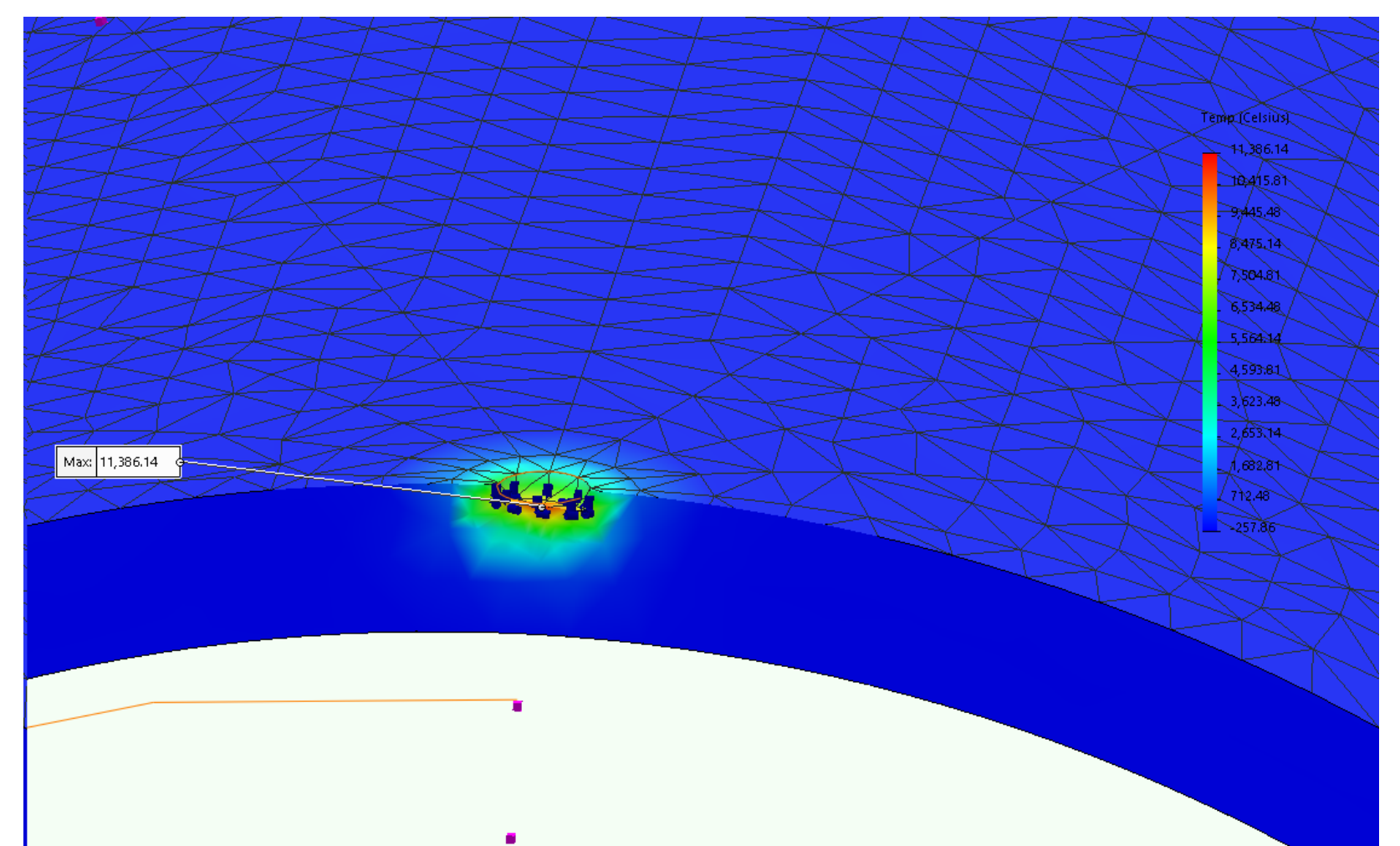
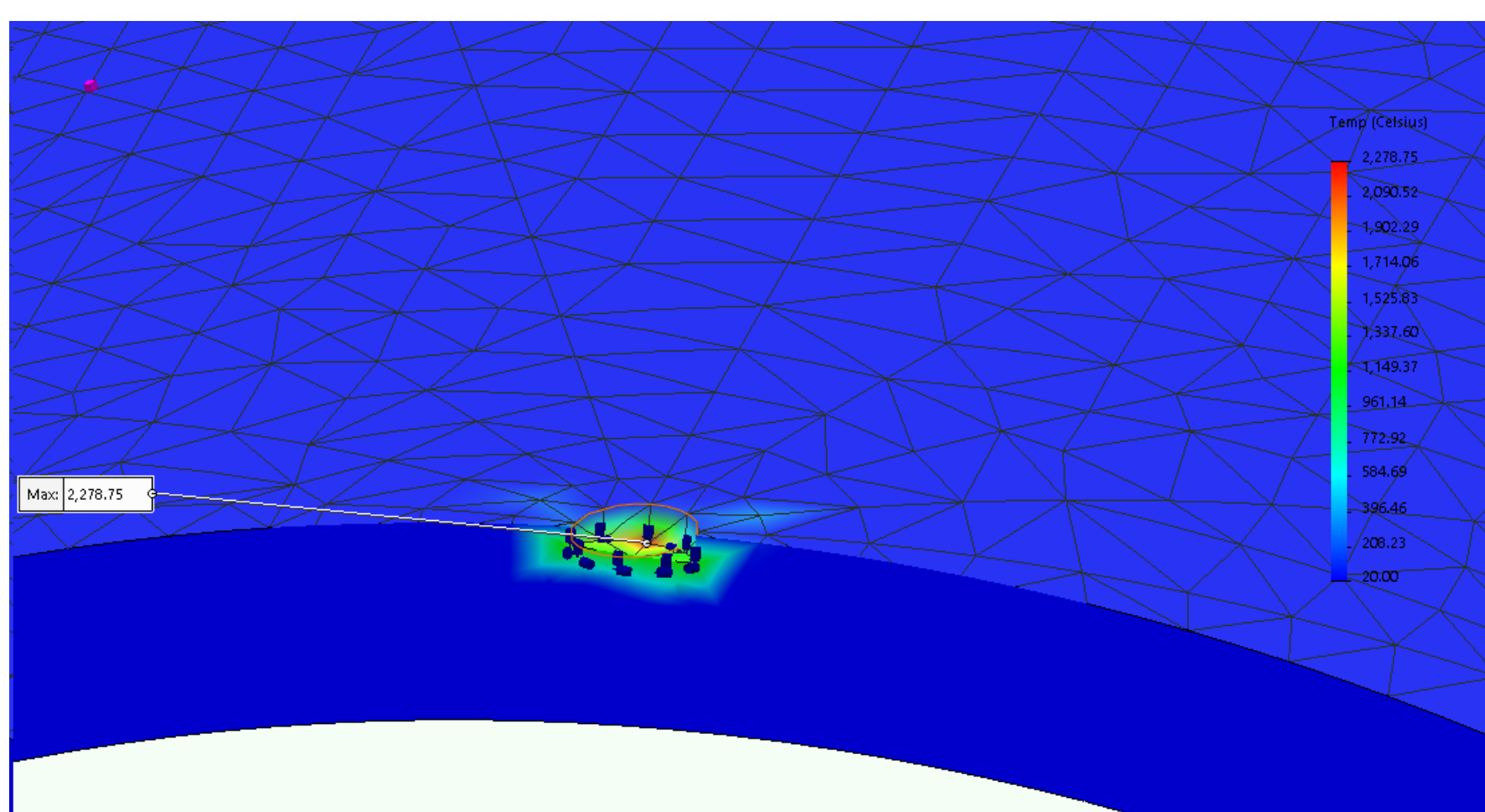
Теловий потік  $\frac{\text{кал}}{\text{с}}/\text{см}^2$



Температурний градієнт  $^{\circ}\text{C}/\text{см}$



Температура  $^{\circ}\text{C}$



КПІ ім. Ізгоря Сікорського, ММІ, КМ, МВ-81мн

Розробив: \_\_\_\_\_/Басов Д.В.  
Керівник: \_\_\_\_\_/дтн, професор Саленко О.Ф.