

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

ПРОЕКТУВАННЯ ПОТОЧНИХ ЛІНІЙ

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до виконання комп'ютерних практикумів з практичних занять студентів спеціальності – 7.05050206, 8.05050206 – «Машини і технологія пакування»

Рекомендовано Вченою радою інженерно-хімічного факультету

Київ
НТУУ «КПІ»
2013

Проектування поточних ліній:

Метод. вказівки до викон. комп'ютерних практикумів з практичних занять студентів з дисципліни «Проектування поточних ліній», для студ. спец. 7.05050206, 8.05050206 – «Машини і технологія пакування» / Уклад.: А.Я. Карвацький, Т.В. Лазарєв. – К.: НТУУ «КПІ», 2013. – 35 с.

*Гриф надано Вченою радою ІХФ
(Протокол № 3 від 03. 04. 2013 р.)*

Навчальне видання

ПРОЕКТУВАННЯ ПОТОЧНИХ ЛІНІЙ

Методичні вказівки до виконання комп'ютерних практикумів з практичних студентів спеціальності – 7.05050206, 8.05050206 – «Машини і технологія пакування»

Авторська редакція

Укладачі:

А.Я. Карвацький, д.т.н., проф.
Т.В. Лазарєв, асп.

Відповідальний редактор

Є.М. Панов, д.т.н., проф.

Рецензент:

М.В. Коржик, к.т.н., доц.

Зміст

Вступ	4
1 Основні теоретичні відомості	6
1.1 Математична постановка задачі статичної пружності	6
1.2 Математична постановка динамічної задачі пружності з врахуванням великих деформацій та контактної взаємодії	8
1.3 Розрахунок запасу міцності конструкцій	11
2 Практикум 1. Розрахунок поточних ліній	13
3 Практикум 2. Використання САД-систем для проектування деталей та вузлів поточних ліній	20
4 Практикум 3. Проектування резервуару поточної лінії для розливу рідин на базі числового аналізу його міцності при гідростатичному та температурному навантаженні	25
5 Практикум 4. Числовий аналіз міцності упаковки та її руйнування .	29
6 Контрольні запитання для підготовки до практичних занять	32
7 Список рекомендованої літератури	34
7.1 Основна література	34
7.2 Додаткова література	35

ВСТУП

Дисципліна «Проектування поточних ліній» відноситься до обов'язкової частини навчальної програми і входить до циклу професійної та практичної підготовки студентів спеціальностей 7.05050206, 8.05050206 – «Машини і технологія пакування».

Згідно з ОКХ курс «Проектування поточних ліній» формує відповідні компетенції, а саме здатність: використовувати базові знання в області природничих наук і навичок до застосування основних законів при проектуванні й розробці устаткування поточного виробництва; виконувати числові дослідження з використанням сучасних САД-систем, включаючи обчислювальні, обробляти та аналізувати отримані результати; до проектної діяльності в сфері техніки і технології поточного виробництва; формувати закінчені рішення і представляти отримані результати; до прийняття та обґрунтування конкретних технічних рішень при створенні нових і модернізації діючих видів техніки і технологій поточних ліній.

Дисципліна складається з єдиного кредитного модуля, відноситься до обов'язкової частини навчальної програми, входить до циклу професійної та практичної підготовки студентів і являється спеціалізуючою в галузі проектування поточних ліній.

Вивчення матеріалу дисципліни базується на широкому використанні фізичних уявлень та теоретичних положень фундаментальних і загально-інженерних дисциплін. Успішне засвоєння матеріалу дисципліни потребує від студентів підготовки з вищої математики, інформатики, матеріалознавства, технології конструкційних матеріалів, загальної та неорганічної хімії, нарисної геометрії, обчислювальної математики та програмування.

Метою курсу «Проектування поточних ліній» є надання студентам певного комплексу знань щодо основ проектування поточних ліній, а саме: поточну форму організації виробництва та основні етапи проектування різних типів

поточних ліній; проектування режиму роботи та планування обладнання поточної лінії; теоретичні основи проектування поточних ліній.

Згідно з ОПП, змістом умінь, що забезпечуються, є наступне:

- підбору продукції та типового технологічного обладнання для виготовлення або обробки на поточній лінії з визначенням річної виробничої програми;
- проектування режиму роботи поточної лінії, розрахунку такту та ритму, величини транспортної партії; синхронізації операцій, розрахунку числа робочих місць, розробки регламенту роботи поточної лінії, розрахунку величини доробку, проектування транспортних засобів поточної лінії;
- користування сучасними САД-системами, включаючи обчислювальні, при побудові твердо-тільних та числових моделей деталей або вузлів технологічного обладнання поточних ліній з виготовлення упаковки;
- застосування методів сучасного наукоємного комп'ютерного інжиніринга з використанням спеціалізованих програмних продуктів для проектування поточних ліній;
- проводити аналіз отриманих за допомогою сучасних обчислювальних систем результатів розрахунків фізичних полів технологічного обладнання при проектуванні або модернізації поточних ліній для визначення експлуатаційної придатності деталей або вузлів вибраного обладнання.

1 Основні теоретичні відомості

1.1 Математична постановка задачі статичної пружності

Систему стаціонарних диференціальних рівнянь статичної пружності, яка включає в себе рівняння руху і рівноваги, тензор малих деформацій Коші та узагальнений закон Гука можна записати у векторній формі через переміщення:

$$\begin{cases} \nabla \cdot \hat{\sigma} + \mathbf{f} = 0; \\ \hat{\varepsilon} = \frac{1}{2} (\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T); \\ \hat{\sigma} = \hat{C} : \hat{\varepsilon}, \end{cases} \quad (1.1)$$

де $\nabla = \frac{\partial}{\partial x_i}$, $(i=1,2,3)$ – оператор Гамільтона, m^{-1} ; x_1, x_2, x_3 – декартові координати, m ; \cdot – оператор скалярного добутку вектора на тензор; $\hat{\sigma}$ – симетричний тензор)¹ напружень 2-го рангу, Па; \mathbf{f} – вектор об’ємних сил, наприклад, гравітаційних, Па; $\hat{\varepsilon}$ – симетричний тензор 2-го рангу пружних деформацій Коші; $\mathbf{u} = (u_1, u_2, u_3)$ – вектор переміщень, m ; $C_{ijkl} = \mu(\delta_{ik}\delta_{jl} + \delta_{il}\delta_{jk}) + \lambda\delta_{ij}\delta_{kl}$ – тензор 4-го рангу пружних властивостей ізотропного матеріалу, що, як правило, справедливо для конструкторських розрахунків, Па; $\mu = \frac{E}{2(1+\nu)}$ і $\lambda = \frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)}$ – коефіцієнти Ламе, Па; E – модуль пружності при розтягу, Па; ν – коефіцієнт Пуасона; $\delta_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{при } i = j; \\ 0 & \text{при } i \neq j, \end{cases}$ – символ Кронекера.

¹ Тензором – називається геометрична величина, яка має n^r компонент, де n – розмірність простору, r – ранг тензора, і може бути представлена у вигляді

$\hat{\sigma} = \sigma_{ij}$ – тензор 2-го рангу, (тут знак ^ вказує на те, що це тензор 2-го рангу).

У випадку термопружної задачі для ізотропного матеріалу узагальнений закон Гука приймає дещо інший вигляд

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} (\varepsilon_{ij}^e - \varepsilon_{ij}^T), \quad (1.2)$$

де C^{ijkl} – компоненти тензора 4-го рангу пружності (1.1), Па; ε_{ij}^e – компоненти тензора малих пружних деформацій Коші (1.1); $\varepsilon_{ij}^T = \alpha(T - T_0)\delta_{ij}$ – компоненти тензора температурних деформацій; α – коефіцієнт лінійного температурного розширення матеріалу, K^{-1} ; T_0 і T – початкова і поточна температура тіла, відповідно, К; δ_{ij} – символ Кронекера.

Для однозначності системи диференціальних рівнянь (1.1) треба лише записати граничні умови. Оскільки задача стаціонарна, то початкові умови не використовуються. Винятком слугує температура при врахуванні температурного навантаження (1.2), яка може бути задана як різниця $T - T_0$ для визначення температурної деформації $\varepsilon_{ij}^T = \alpha(T - T_0)\delta_{ij}$.

Запишемо граничні умови для (1.1):

– переміщення або защемлення (хоча б в одній точці на поверхні тіла)

$$\mathbf{u}|_{S_u} = 0, \quad (1.3)$$

де S_u – поверхня (або точка поверхні), на якій задано переміщення;

– симетрії

$$\mathbf{n} \cdot \mathbf{u}|_{S_{su}} = 0, \quad (1.4)$$

де $\mathbf{n} = n_i$ – вектор нормалі до поверхні; S_{su} – поверхня симетрії тіла;

– зовнішні зусилля

$$\hat{\sigma} \cdot \mathbf{n}|_{S_p} = \mathbf{p}, \quad (1.5)$$

де $\mathbf{p} = p^i$ – вектор зовнішньої сили, що діє на поверхні S_p , Па;

– зовнішній тиск

$$(\hat{\sigma} \cdot \mathbf{n}) \cdot \mathbf{n}|_{S_p} = p, \quad (1.6)$$

де p – зовнішній тиск, який задано на поверхні S_p , Па.

1.2 Математична постановка динамічної задачі пружності з врахуванням великих деформацій та контактної взаємодії

Систему нестационарних диференціальних рівнянь динамічної пружності, яка включає в себе нестационарне рівняння руху і рівноваги, геометричні нелінійні рівняння та узагальнений закон Гука можна записати у векторній формі через переміщення:

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho \frac{d^2 \mathbf{u}}{dt^2} = \vec{\nabla} \cdot \boldsymbol{\sigma} + \mathbf{f}; \\ \hat{\varepsilon} = \frac{1}{2} \left(\vec{\nabla} \mathbf{u} + (\vec{\nabla} \mathbf{u})^T + (\vec{\nabla} \mathbf{u})^T \cdot (\vec{\nabla} \mathbf{u}) \right); \\ \hat{\sigma} = \hat{C} : \hat{\varepsilon}, \end{array} \right. \quad (1.7)$$

де $\nabla = \left(\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z} \right)$ – оператор Гамільтона, m^{-1} ; x, y, z – декартові координати,

m ; $\hat{\sigma}$ – симетричний тензор напружень 2-го рангу, Па; \mathbf{f} – вектор об'ємних сил, наприклад, гравітаційних, Па; $\hat{\varepsilon}$ – тензор 2-го нелінійних деформацій; $\mathbf{u} = (u_1, u_2, u_3)$ – вектор переміщень, м; C_{ijkl} – тензор 4-го рангу пружних

властивостей ізотропного матеріалу (1.1), Па; \cdot – оператор подвійного (кратного) скалярного добутку двох тензорів)².

Система диференціальних рівнянь (1.7) включає нестационарний член, тому для неї необхідно записати початкові умови для вектора переміщень в початковий момент часу, $t = 0$

$$\mathbf{u}|_{t=0} = \varphi_u(\mathbf{x}), \quad (1.8)$$

де $\mathbf{x} = x_i, (i = 1, 2, 3)$ – декартова система координат.

Для однозначності системи диференціальних рівнянь (1.7) треба також записати граничні умови. Для цього можна скористатись граничними умовами (1.3)–(1.6).

Для врахування граничних умов контактного типу скористаємося умовами у вигляді таких нерівностей

$$\begin{cases} \mathbf{n}^+ \mathbf{u}^+ + \mathbf{n}^+ \mathbf{u}^- - \delta \leq 0; \\ \{\boldsymbol{\sigma}^{(n)} \cdot \mathbf{n}\} \leq 0; \\ (\mathbf{n}^+ \mathbf{u}^+ + \mathbf{n}^+ \mathbf{u}^- - \delta) \boldsymbol{\sigma}^{(n)} \cdot \mathbf{n} = 0; \\ |\sigma_\tau| \leq -f \boldsymbol{\sigma}^{(n)} \cdot \mathbf{n}; \end{cases} \quad (1.9)$$

де δ – початковий зазор у напрямку нормалі до поверхонь, що контактують, м;

$\boldsymbol{\sigma}^{(n)} = \boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{n}$ – компоненти напруження в нормальному напрямку до поверхні

контакту, Па; $\sigma_\tau = \sqrt{|\boldsymbol{\sigma}^{(n)}|^2 + (\sigma_n)^2}$ – тангенціальна складова напруження, Па;

$\sigma_n = (\boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{n}) \cdot \mathbf{n} = \boldsymbol{\sigma}^{(n)} \cdot \mathbf{n}$ – нормальне напруження на поверхні контакту, Па;

f – коефіцієнт сухого тертя.

² На відміну від тензорів однакового рангу, результатом подвійного (кратного) скалярного добутку двох тензорів різного рангу, наприклад, 2-го і 3-го буде вектор: $\mathbf{a} = \mathbf{T} : \mathbf{P}$ з компонентами $a_i = T_{jk} P_{jki}$. Такий

добуток не є комутативним. Результатом подвійного добутку $\hat{\mathbf{C}} : \hat{\mathbf{E}}$ є тензор другого рангу.

Перша нерівність (1.9) є умовою взаємного непроникнення тіл та пов'язано з силовим співвідношення (друга нерівність (1.9)), оскільки закриття зазору призводить до виникнення контактного тиску. Третє рівняння (1.9) відповідає нульовим контактним напруженням, що викликає роз'єднання контактних тіл. Четверта нерівність описує умови фрикційної взаємодії тіл (поверхневих напружень) у формі закону Амонтона-Кулона.

1.3 Розрахунок запасу міцності конструкцій

Еквівалентні деформації $\varepsilon_{\text{eqvM}}$ і напруження σ_{eqvM} за Мізесом визначаються за формулами:

$$\varepsilon_{\text{eqvM}} = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\varepsilon_{11} - \varepsilon_{22})^2 + (\varepsilon_{22} - \varepsilon_{33})^2 + (\varepsilon_{33} - \varepsilon_{11})^2 + \frac{3}{2}(\varepsilon_{12}^2 + \varepsilon_{23}^2 + \varepsilon_{13}^2)}, \quad (1.10)$$

$$\sigma_{\text{eqvM}} = \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + (\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + (\sigma_{33} - \sigma_{11})^2 + 6(\sigma_{12}^2 + \sigma_{23}^2 + \sigma_{13}^2)}, \quad (1.11)$$

де $\sigma_{ij}, i, j = 1, 2, 3$ – компоненти тензора напружень, Па; $\varepsilon_{ij}, i, j = 1, 2, 3$ – компоненти тензора деформацій.

Запас міцності F_s пластичних матеріалів визначається за формулою

$$F_s = \frac{[\sigma_T]}{\sigma_{\text{eqvM}}}, \quad (1.12)$$

де $[\sigma_T]$ – межа текучості матеріалу, Па; σ_{eqvM} – еквівалентне напруження за Мізесом (1.11), Па.

Обернена величина до запасу міцності пластичних матеріалів називається коефіцієнтом напруження σ^* і визначається за формулою

$$\sigma^* = \frac{1}{F_s} = \frac{\sigma_{\text{eqvM}}}{[\sigma_T]}. \quad (1.13)$$

Запас міцності F_s крихких матеріалів визначається за формулою

$$F_s = \left[\frac{\sigma_1}{[\sigma_+]} + \frac{\sigma_3}{[\sigma_-]} \right]^{-1}, \quad (1.14)$$

де σ_1, σ_3 – головні напруження ($\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$), Па; $[\sigma_+], [\sigma_-]$ – відповідно межа міцності на розтяг і стискання, Па.

Обернена величина до запасу міцності крихких матеріалів також називається коефіцієнтом напруження σ^* і визначається за формулою

$$\sigma^* = \frac{\sigma_1}{[\sigma_+]} + \frac{\sigma_3}{[\sigma_-]}, \quad (1.15)$$

Міцність конструкції за розглянутими критеріями забезпечується при:

$$F_s > 1, \quad (1.16)$$

$$\sigma^* < 1. \quad (1.17)$$

2 Практикум 1. Розрахунок поточних ліній.

Мета практикуму: на прикладі прямої поточної лінії (ПЛ) навчитися розраховувати план-графік роботи обладнання і чисельність робочих, будувати епюри оборотних заділів. Оволодіти навичками аналізу отриманих результатів.

Порядок виконання практикуму:

1. Завдання та вихідні дані для розрахунку згідно індивідуального завдання представлені в прикладі 1 та в таблиці 2.1, відповідно.
2. Методика розрахунків прямої ПЛ наведена нижче по тексту.
3. Виконання розрахунків.
4. Побудова план-графіку завантаження обладнання і робочих, епюри міжопераційних оборотних заділів на прямої.
5. Аналіз результатів розрахунків.
6. Формулювання висновків.

Таблиця 2.1 – Варіанти завдання

Вар.	Кіл. змін	$F_{зм}$, ч	$N_{зм. вип}$	t_1 , хв	t_2 , хв	t_3 , хв	t_4 , хв	t_5 , хв
1	2	8	100	2,97	1,83	6,4	3,2	–
2	1	8	90	3,6	1,73	8,0	2,66	–
3	2	8	150	2,07	1,13	5,0	1,4	–
4	2	6	65	2,54	3,0	9,02	2,05	–
5	1	8	125	2,78	1,06	5,5	2,18	–
6	2	8	116	2,47	1,67	5,81	2,47	–
7	2	6	69	3,07	2,15	6,46	3,98	–
8	1	8	95	2,86	2,19	5,9	4,2	–
9	1	6	68	3,12	2,17	6,53	4,05	–
10	2	8	96	3,13	1,87	5,99	4,01	–
11	1	8	88	4,17	1,28	7,0	3,91	–
12	2	6	70	2,8	2,35	6,1	4,18	–
13	2	6	72	2,5	2,5	7,3	2,7	–
14	2	6	140	2,74	2,21	5,9	4,0	–
15	1	8	130	3,05	2,1	6,0	4,3	–

Приклад 1. Ділянка ПЛ працює у 2 зміни по 8 год. ($2F_{зм}$). На ділянці обробляється за дві зміни $2N_{зм.вип} = 184$ дет. на добу. Норми часу на обробку одної деталі: $t_1 = 2,9$ хв, $t_2 = 2,3$ хв, $t_3 = 6,2$ хв, $t_4 = 4,21$ хв.

Розрахувати план-графік роботи обладнання та чисельність робочих ПЛ, побудувати епюри оборотних заділів.

Методика розрахунків прямої поточної лінії. Визначимо такт роботи ПЛ за формулою $r = \frac{F_{зм} \cdot 2}{N_{зм.вип} \cdot 2} = 8 \cdot 60 \cdot 2 / 184 = 5,2$ хв на 1 деталь. Тут $8 \cdot 60 = 480$ хв тривалість робочої зміни у хвиликах. Далі розрахуємо кількість робочих місць (станків) $w_{pi} = \frac{t_i}{r}$ та їх індивідуальне завантаження. Всі розрахунки зведемо в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2

№ операції	Розрахована кількість робочих місць, w_{pi}	Прийнята кількість робочих місць, $w_{прин i}$	Індивідуальний коефіцієнт завантаження станків на операції, $k_{ind} = w_{pi} \cdot 100\%$
1	$2,9/5,2 = 0,56$	1,0	1.1 – 56 %
2	$2,3/5,2 = 0,44$	1,0	2.1 – 44 %
3	$6,2/5,2 = 1,19$	2,0	3.1 – 100 %; 3.2 – 19%
4	$4,21/5,2 = 0,81$	1,0	4.1 – 81 %
Разом:		5 станків	

Визначимо чисельність робочих на ПЛ виходячи із трудомісткості виробничої програми. Змінна програма випуску $N_{зм.вип} = 184/2 = 92$ од. у зміну.

Трудомісткість змінного завдання: $t_{н-ч.i} = N_{зм.вип} \cdot \sum_{i=1}^4 t_i = 92(2,9+2,3+6,2+4,21) =$

1436 хв. Чисельність робочих $1436/480 = 3$ чол. В результаті 5 станків повинні обслуговувати 3 робочих.

Вибираємо період комплектування заділу на ПЛ рівний $R=240$ хв або 0,5 від тривалості робочої зміни. План графік завантаження обладнання і робочих на ПЛ у продовж періоду комплектування $R=240$ хв показано на рисунку 2.1.

А) Якщо час виконання операції ($R \cdot k_{ind} / 100$) розділити на норму часу, то отримаємо кількість деталей, які вироблено за період комплектування заділу (ВПКЗ):

- на 1-й операції $134/2,9 = 46$ од. ($R \cdot k_{ind} / 100 = 240 \cdot 56 / 100 = \sim 133$);
- на 2-й операції $106/2,3 = 46$ од. ($R \cdot k_{ind} / 100 = 240 \cdot 44 / 100 = \sim 106$);
- на 3-й операції $286/6,2 = 46$ од. ($R \cdot k_{ind} / 100 = 240 \cdot 119 / 100 = \sim 285$);
- на 4-й операції $194/4,21 = 46$ од. ($R \cdot k_{ind} / 100 = 240 \cdot 81 / 100 = \sim 194$).

№ операції	№ станка	№ робочого	R = 240		ВПКЗ
			←	→	
1	1.1	1	0,56		$240 \cdot 56 / 100 = \sim 133$
2	2.1	1		0,44	$240 \cdot 44 / 100 = \sim 106$
3	3.1	2	1,0		$240 +$
	3.2	3	0,19		$+ 240 \cdot 19 / 100 = \sim 285$
4	4.1	3		0,81	$240 \cdot 81 / 100 = \sim 194$

Рисунок 2.1 – План графік завантаження обладнання і робочих на ПЛ у продовж періоду комплектування $R=240$ хв

Таким чином, у продовж робочої зміни буде виготовлено $46 \cdot 2 = 92$ дет., що і потрібно по плану виробництва. На рисунку 2.1 видно, що 1-й робочий обслуговує станки 1.1 і 2.1; 2-й робочий працює на одному станку 3.1; 3-й

робочий зайнятий на станках 3.2 і 4.1. Таким чином, робочі багатостаночники 1-й і 3-й за період комплектування заділу виконують по одному переходу від станка до станка, а за зміну по 2 переходи.

Б) На рисунку 2. показані графіки (епюри) міжопераційних оборотних заділів.

Розрахуємо епюру заділу між першою і другою операціями в два етапи. Виберемо період часу, в продовж якого на суміжних операціях стан станків лишається незмінним: на 1-й операції – це один працюючий станок, а на 2-й операції – це один непрацюючий станок. Очевидно, що тривалість першого періоду $T_1 = 0,56 \cdot 240$ хв:

$$\Delta Z_{1-2} = (T_1 \cdot w_1) / t_1 - (T_1 \cdot w_2) / t_2 = (0,56 \cdot 240 \cdot 1) / 2,9 - (0,56 \cdot 240 \cdot 0) / 2,3 = 46 \text{ од.}$$

На епюрі заділ росте з нульового значення до 46 од. У продовж 2-го періоду часу – ($T_2 = 0,44 \cdot 240$ хв) на першій операції станок стоїть, а на 2-й функціонує:

$$\Delta Z'_{1-2} = (T_2 \cdot w_1) / t_1 - (T_2 \cdot w_2) / t_2 = (0,44 \cdot 240 \cdot 0) / 2,9 - (0,44 \cdot 240 \cdot 1) / 2,3 = -46 \text{ од.}$$

На епюрі заділ збуває до нульового значення.

Заділ між 2-ю і 3-ю операціями розраховується у три етапи: зміна заділу упродовж **(I)**– $T_1 = 0,56 \cdot 240$ хв; упродовж **(II)**– $T_3 = (0,44 - 0,19) \cdot 240 = 0,25 \cdot 240$ хв і **(III)**– $T_4 = 0,19 \cdot 240$ хв:

$$\text{(I)} - \Delta Z_{2-3} = (T_1 \cdot w_2) / t_2 - (T_1 \cdot w_3) / t_3 = (0,56 \cdot 240 \cdot 0) / 2,3 - (0,56 \cdot 240 \cdot 1) / 6,2 = -22 \text{ од.};$$

$$\text{(II)} - \Delta Z'_{2-3} = (T_3 \cdot w_2) / t_2 - (T_3 \cdot w_3) / t_3 = (0,25 \cdot 240 \cdot 1) / 2,3 - (0,25 \cdot 240 \cdot 1) / 6,2 = = 17 \text{ од.};$$

$$(III) - \Delta Z''_{2-3} = (T_4 \cdot w_2) / t_2 - (T_4 \cdot w_3) / t_3 = (0.19 \cdot 240 \cdot 1) / 2.3 - (0.19 \cdot 240 \cdot 2) / 6.2 = 5 \text{ од.}$$

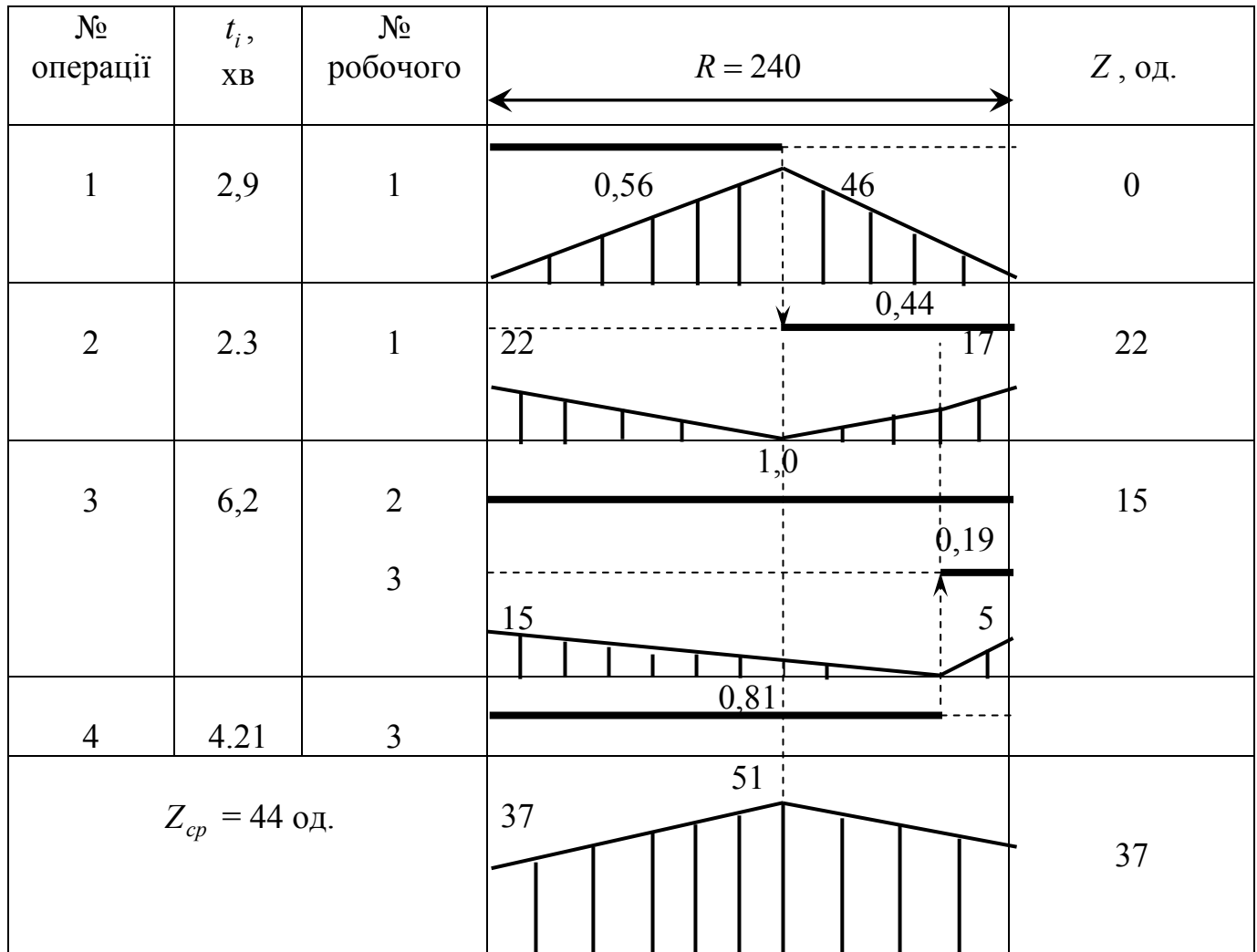


Рисунок 2.2 – Епюри міжопераційних оборотних заділів на прямоточній ПЛ

Тут $w_3 = 2$ тому, що на цьому відрізку часу зміни працюють 2 станки.

У продовж 1-ї частини період комплектації (0,56·240 хв) на 2-й операції станок стоїть, а на 3-й працює один станок: у 2-й частині періоду на 2-й і 3-й операціях діє по одному станку; в третій частині періоду на 3-й операції працює два станки, а на 2-й операції один. По приведеним формулам розраховується зміна оборотного заділу, тому від'ємне значення $\Delta Z - 22$ од. на початку періоду комплектації заділу означає, що в початковий момент часу не вистачає саме

такого запасу деталей для початку 3-ї операції. Епюра заділу між 2-ю і 3-ю операціями формується таким чином: на початок періоду комплектації до 3-го станка подають 22 од. деталей, які пройшли обробку на 2-му станку; у продовж 1-ї частини першого періоду цей заділ зменшується до нуля (+22 од. початкового запасу мінус 22 од., виготовлених на 3-му станку); у продовж другої частини періоду заділ збільшується до 17 од.; у продовж третього періоду до 17 од. запасу додається ще 5 од. і, таким чином, до кінця періоду комплектування заділ стає рівним $17 + 5 = 22$ од. Якщо епюра побудована правильно, то величина заділу на початок і кінець періоду комплектації повинна співпадати (див. рисунок 2.2).

Між третьою і четвертою операціями розрахунок зміни заділу і побудова епюри здійснюється аналогічно, але з тією різницею, що виділяють дві частини періоду комплектування, у продовж яких станки знаходяться у незмінному стані.

$$T_5 = 0,81 \cdot 240 \text{ хв:}$$

$$\Delta Z_{3-4} = (T_5 \cdot w_3) / t_3 - (T_2 \cdot w_4) / t_4 = (0,81 \cdot 240 \cdot 1) / 6,2 - (0,81 \cdot 240 \cdot 1) / 4,21 = -15 \text{ од.}$$

$$\Delta Z'_{2-3} = (T_4 \cdot w_3) / t_3 - (T_4 \cdot w_4) / t_4 = (0,19 \cdot 240 \cdot 2) / 6,2 - (0,19 \cdot 240 \cdot 0) / 4,21 = 15 \text{ од.}$$

Аналіз результатів розрахунків. Із рисунка 2.2 видно, що якщо у початковий момент часу до 4-го станка помістити 15 од. деталей, то до кінцевого періоду комплектування цей заділ самовідтворюється і біля четвертого станка як і раніше буде 15 од. деталей, які пройшли обробку на третьому станку.

Величина оборотного заділу, яка склалася до кінця періоду його комплектування, називається перехідним заділом $Z_{пер}$. Перехідний заділ повинен бути мінімальним. В даному прикладі сумарний перехідний заділ становить 37 од., відповідно, до кінця робочої зміни ці напівфабрикати

необхідно або передати бригаді робочих, які працюють у 2-у зміну, або забезпечити їх зберігання до наступного дня. Чим менше перехідний заділ, тим менші витрати на ці допоміжні роботи.

Сумарний оборотний заділ на поточній лінії визначають складанням кількості деталей, які знаходяться в заділі між операціями на даний момент часу. Наприклад, до моменту часу $240 \cdot 0,56 = \sim 134$ хв між першою і другою операціями в заділі знаходиться 46 од., між 2-ю і 3-ю операціями 0 од., між 3-ю і 4-ю – 5 од. Сумарна величина заділу: $46+0+5 = 51$ од. (див. рисунок 2.2). Середня величина заділу або, інакше, середня величина незавершеного виробництва на поточній лінії становить

$$Z_{\text{ср}} = (51+37)/2 = 44 \text{ од.}$$

Висновки. Розрахований план-графік роботи обладнання та чисельності робочих ПЛ і побудовані епюри оборотних заділів дають можливість оптимізувати завантаження обладнання та робітників ПЛ, зменшити тривалість простоїв устаткування.

3 Практикум 2. Використання CAD-систем для проектування деталей та вузлів поточних ліній

Мета практикуму: оволодіння навичками користування сучасними CAD-системами при побудові твердо-тільних моделей деталей, вузлів та креслень технологічного обладнання поточних ліній.

Порядок виконання практикуму:

1. Завдання на побудову твердо-тільних моделей деталей, вузлів (збірок з декількох деталей) та креслень наведено на рисунках 3.1–3.10 .
2. Ознайомлення з CAD-системою: створення декількох простих твердо-тільних моделей деталей (рисунок 3.1, схема побудови деталей: ескіз → витягнута бобишка).
3. Створення твердо-тільних моделей більш складних деталей за допомогою допоміжних площин (рисунок 3.2–3.4, по схемі: ескіз → витягнута бобишка, площина → ескіз → витягнута бобишка → ескіз → витягнутий виріз та ін.).
4. Виконання збірок деталей (рисунки 3.5, 3.6).
5. Виконання креслень деталей на основі створених твердо-тільних моделей деталей (рисунки 3.7–3.10).
6. Формулювання висновків.

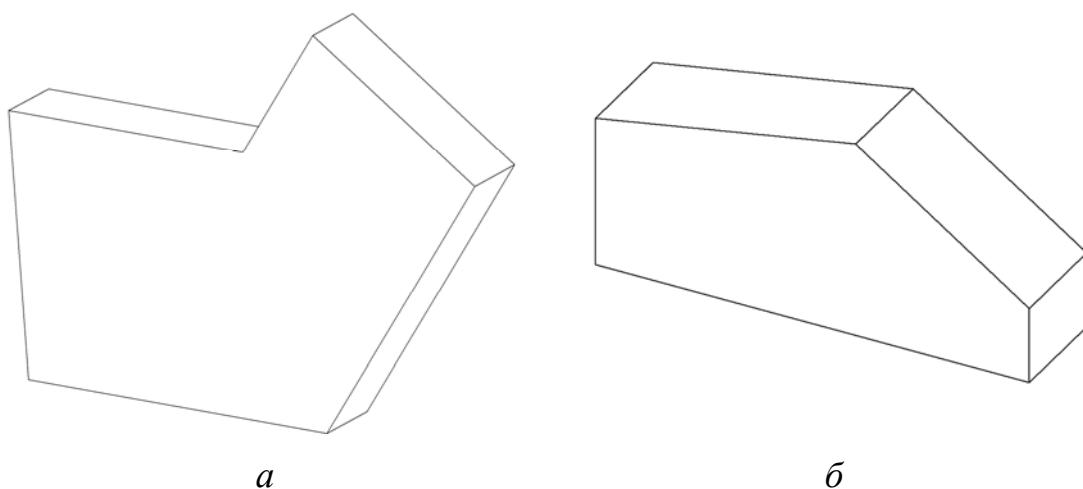


Рисунок 3.1 – Твердо-тільні моделі простих деталей

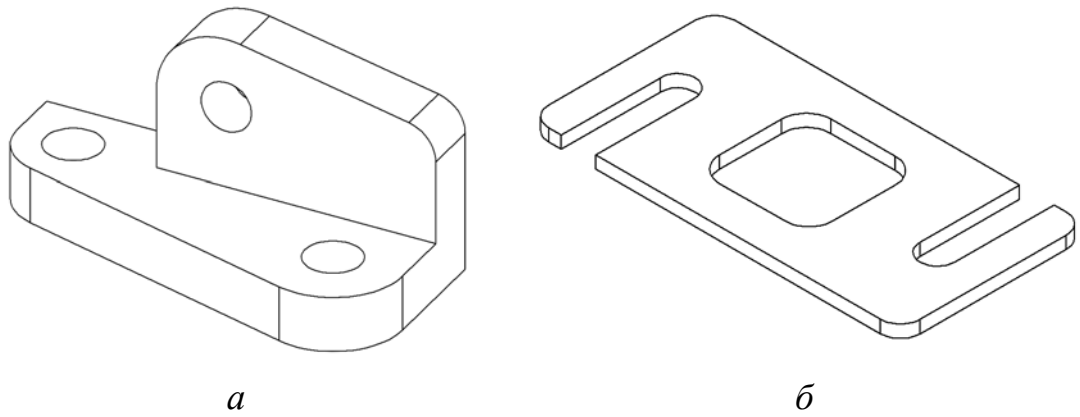
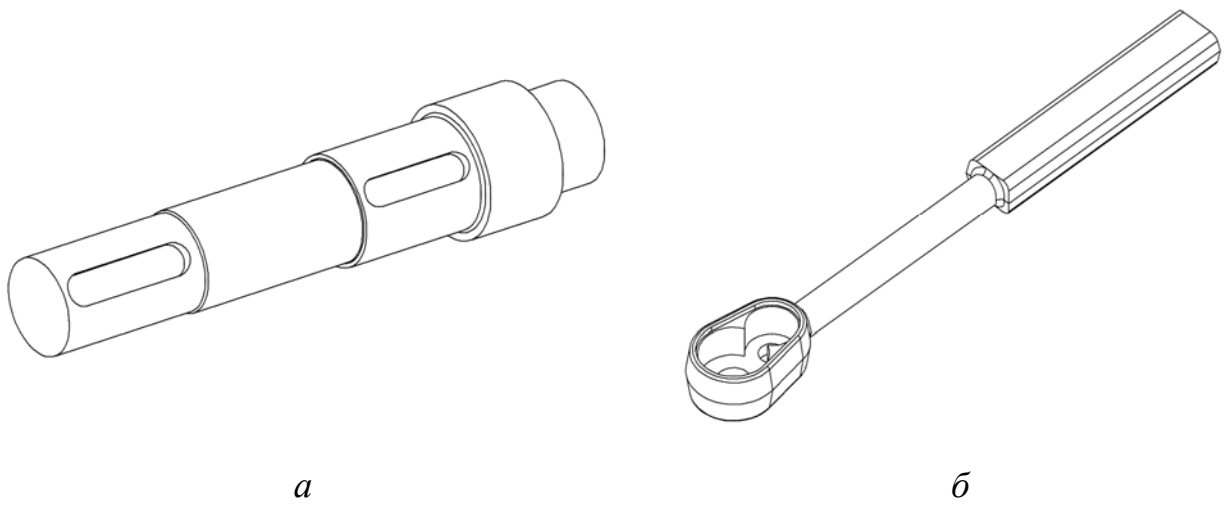
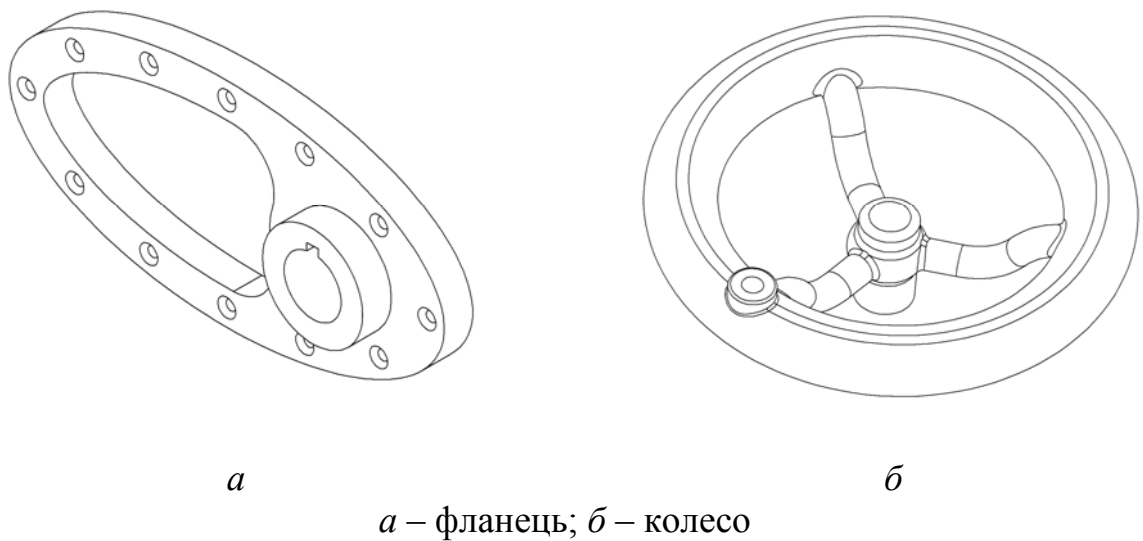


Рисунок 3.2 – Твердо-тільні моделі більш складних деталей



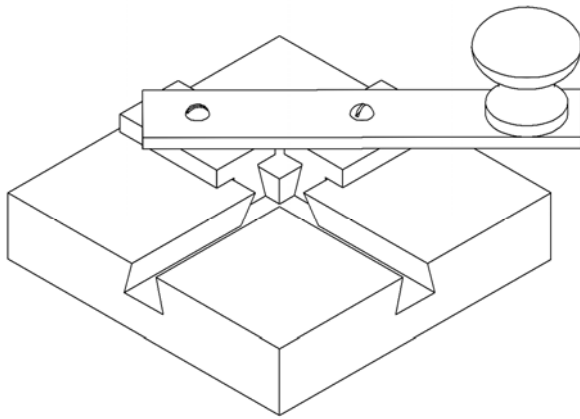
a – вал; *б* – важіль

Рисунок 3.3 – Твердо-тільні моделі більш складних деталей

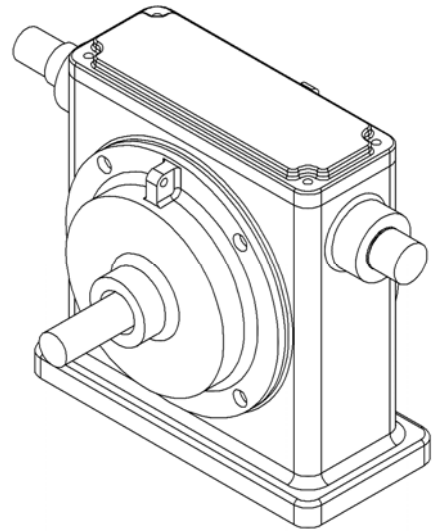


a – фланець; *б* – колесо

Рисунок 3.4 – Твердо-тільні моделі складних деталей



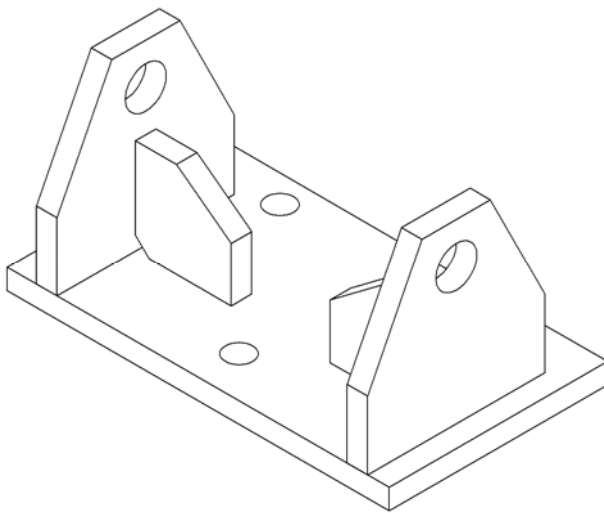
a



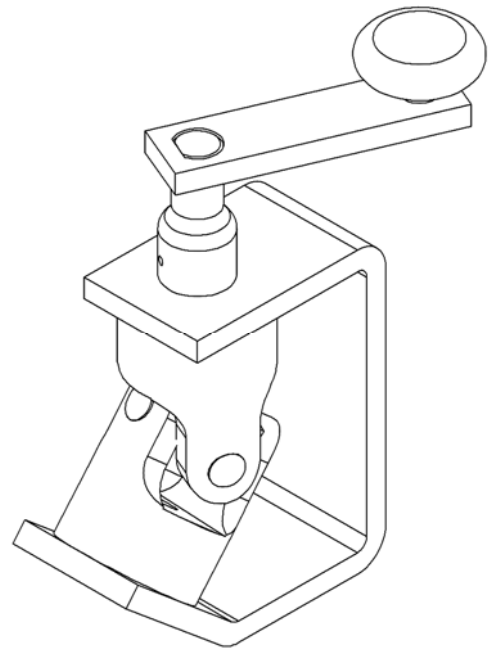
б

a – кавомолка; *б* – редуктор

Рисунок 3.5 – Збірки деталей



a



б

a – корпус; *б* – шарнір

Рисунок 3.6 – Збірки деталей

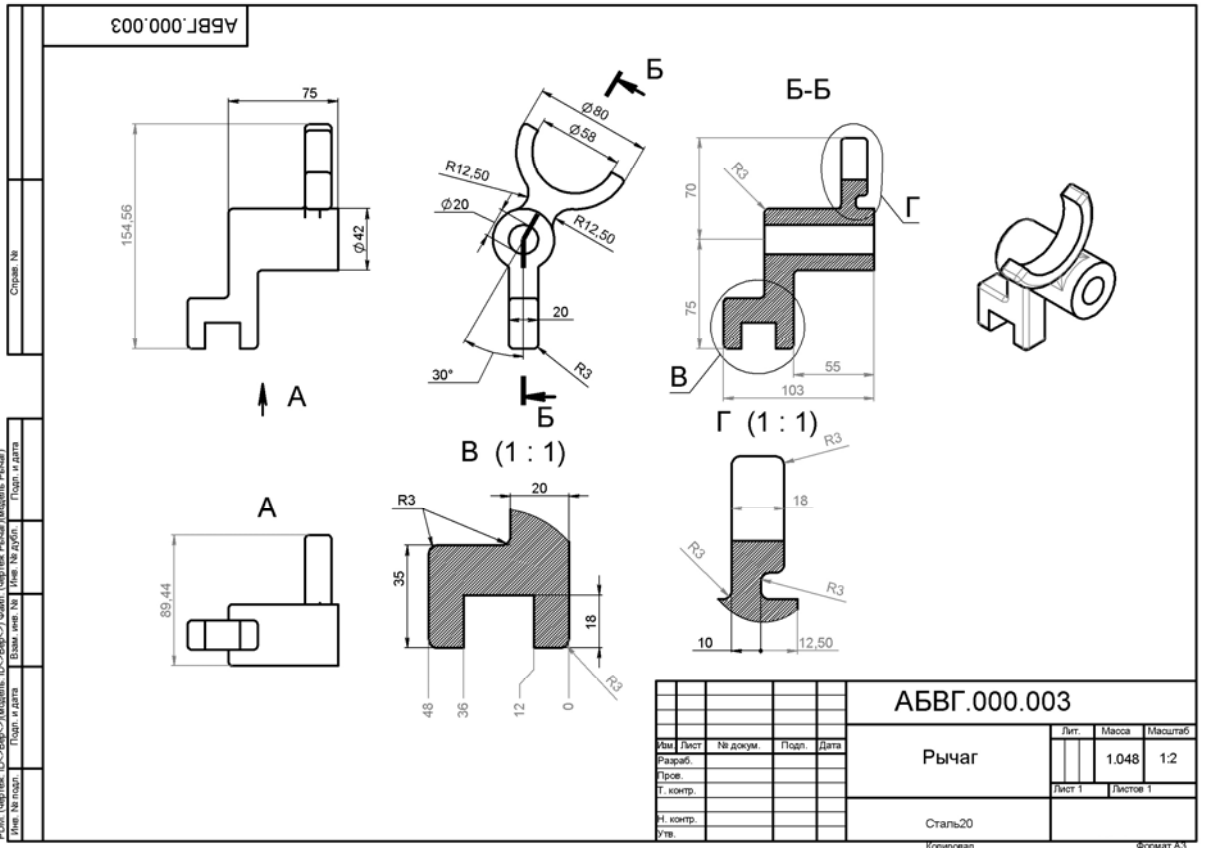


Рисунок 3.7 – Кресления вазеля

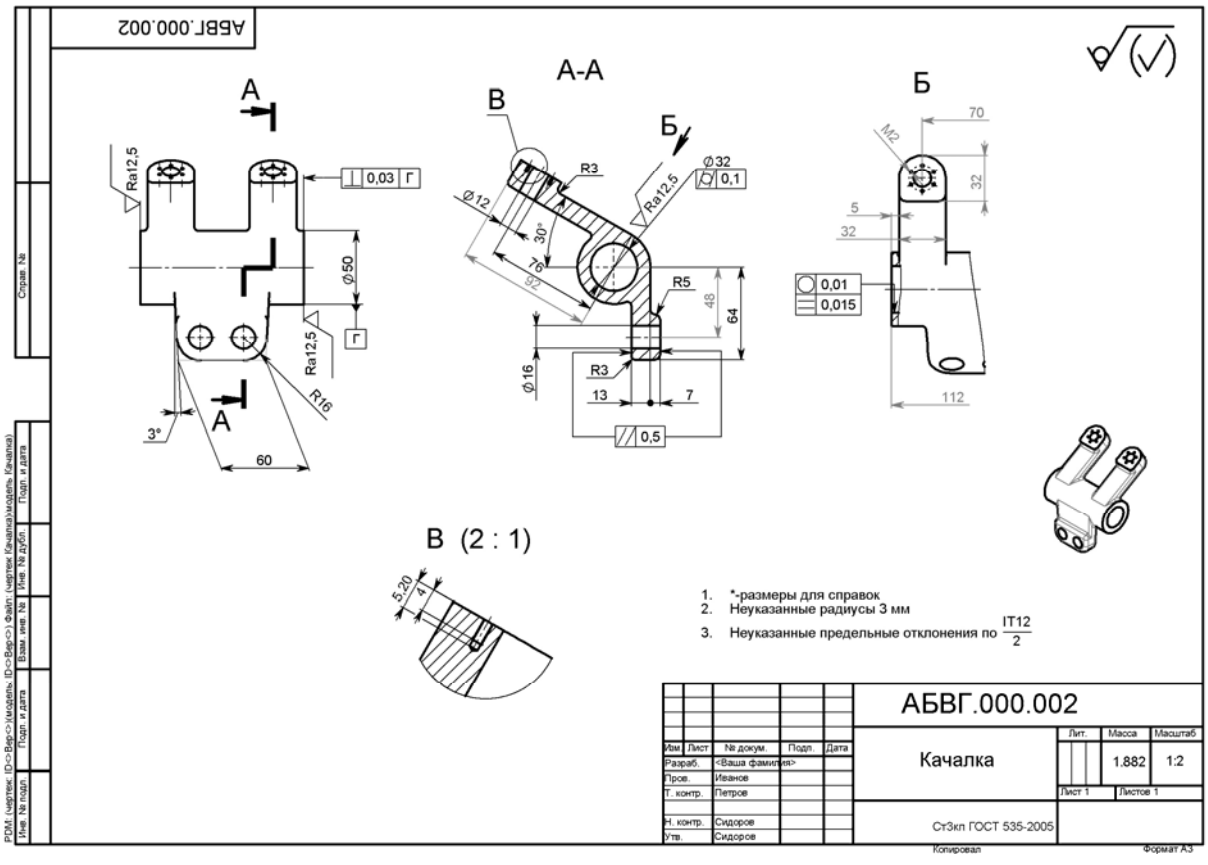


Рисунок 3.8 – Кресления качалки

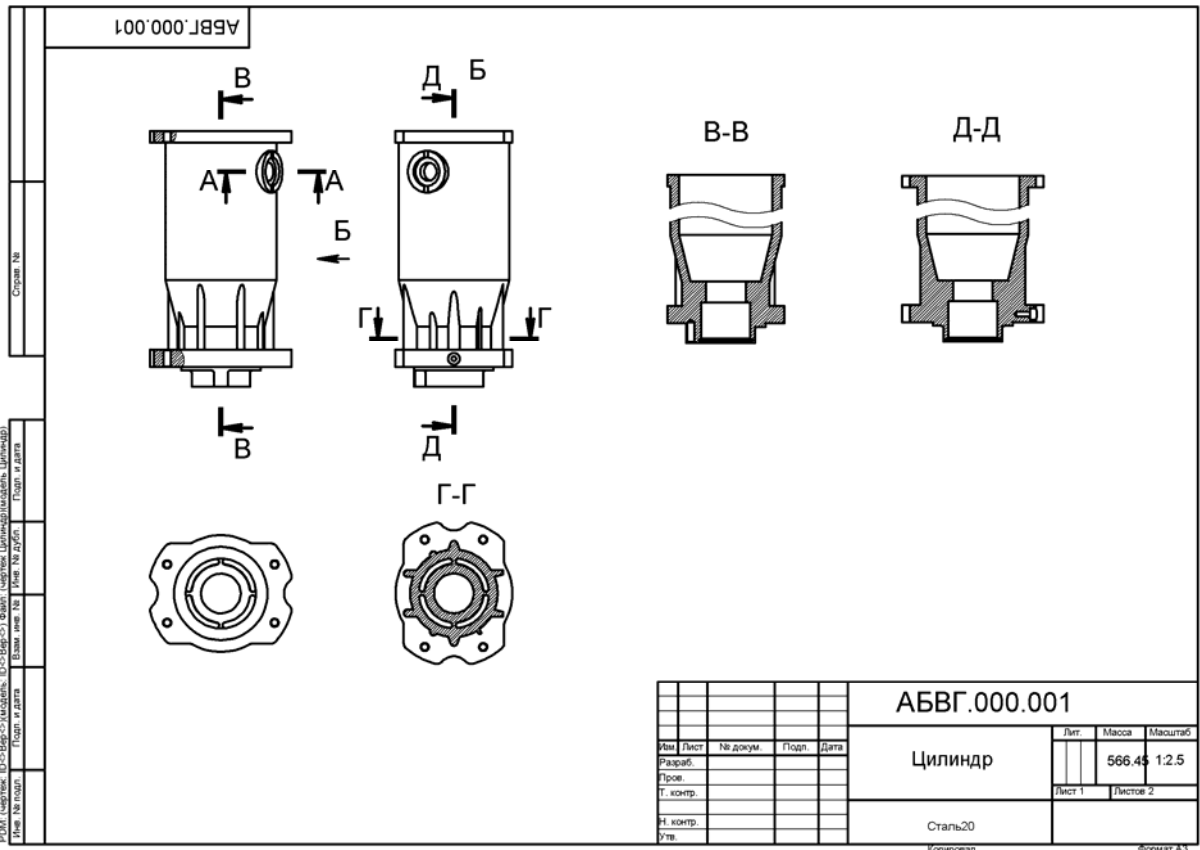


Рисунок 3.9 – Креслення цилиндра

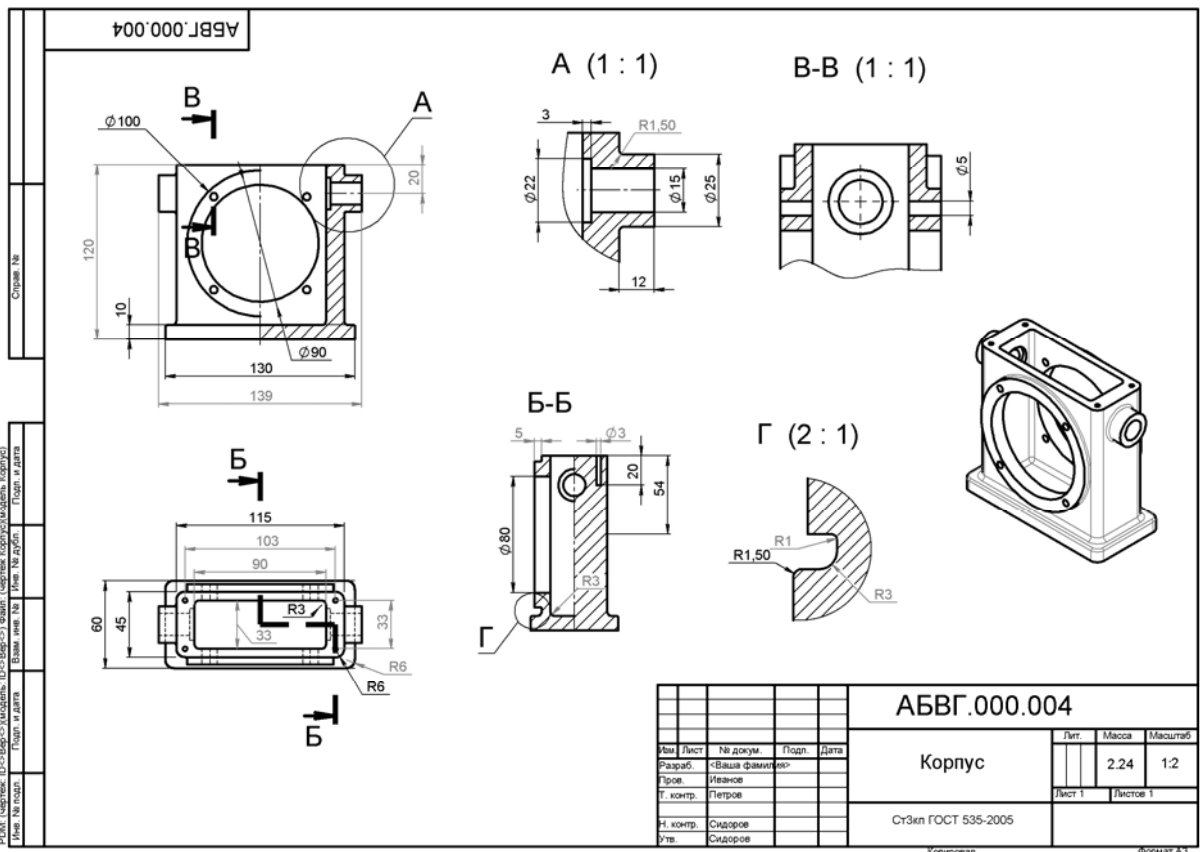


Рисунок 3.10 – Креслення корпуса редуктора

Висновки. Твердо-тільні моделі складних деталей та їх збірок в окремі вузли створені в САД-системах необхідні для швидкої побудови плоских креслень будь-якої складності та для числового аналізу міцності (термопружності) при проектуванні, наприклад, обладнання поточних ліній.

4 Практикум 3. Проектування резервуару поточної лінії для розливу рідин на базі числового аналізу його міцності при гідростатичному та температурному навантаженні

Мета практикуму: оволодіння навичками конструювання вузлів поточних ліній з використанням САД-систем та числового аналізу міцності конструкцій.

Порядок виконання практикуму:

1. Завдання на проектування резервуару наведено нижче за текстом і в таблиці 4.1.
2. Конструювання і побудова в САД-системі конструкції резервуара без та з наявністю ребер жорсткості (рисунок 4.1).
3. Виконання числового аналізу напруженого стану конструкції резервуару з врахуванням гідростатичного навантаження без та з наявністю ребер жорсткості (рисунок 4.2, 4.3), при збільшеному у 1,5 рази гідростатичному навантаженні, при одночасному врахуванні гідростатичного тиску та температурного навантаження (тобто розв'язання задачі термопружності).
4. Аналіз результатів розрахунків.
6. Формулювання висновків.

Завдання на практикум 3. Виконати конструювання витратного резервуара для заданого об'єму рідини.

Підтвердити розроблену конструкцію розрахунками на міцність під дією таких навантажень:

- конструкція навантажена гідростатичним тиском рідини заданого об'єму;

- конструкція навантажена тиском, який у 1,5 рази перевищує робочий;
- конструкція навантажена гідростатичним тиском рідини заданого об'єму з температурою 90 °С.

Примітки до конструкторських розробок.

Рідина: вода. Матеріал резервуару – листовая сталь з розмірами:

- 1250×1500×2 мм;
- 1500×2500×2 мм.

В конструкції необхідно використовувати як найменше зварних швів.

Таблиця 4.1 – Варіанти індивідуальних завдань

№ варіанта	Об'єм рідини, м ³	Форма резервуара	Форма днища
1	1	паралелепіпед	два уклони
2	1,5	паралелепіпед	два уклони
3	2	паралелепіпед	один уклон
4	2,5	паралелепіпед	плоске
5	3	паралелепіпед	один уклон
6	1	куб	два уклони
7	1,5	куб	один уклон
8	2	куб	чотири уклони
9	2,5	куб	плоске
10	3	куб	два уклони
11	1,1	паралелепіпед	плоске
12	1,2	куб	плоске
13	1,3	паралелепіпед	плоске
14	2,1	куб	плоске
15	2,2	паралелепіпед	плоске

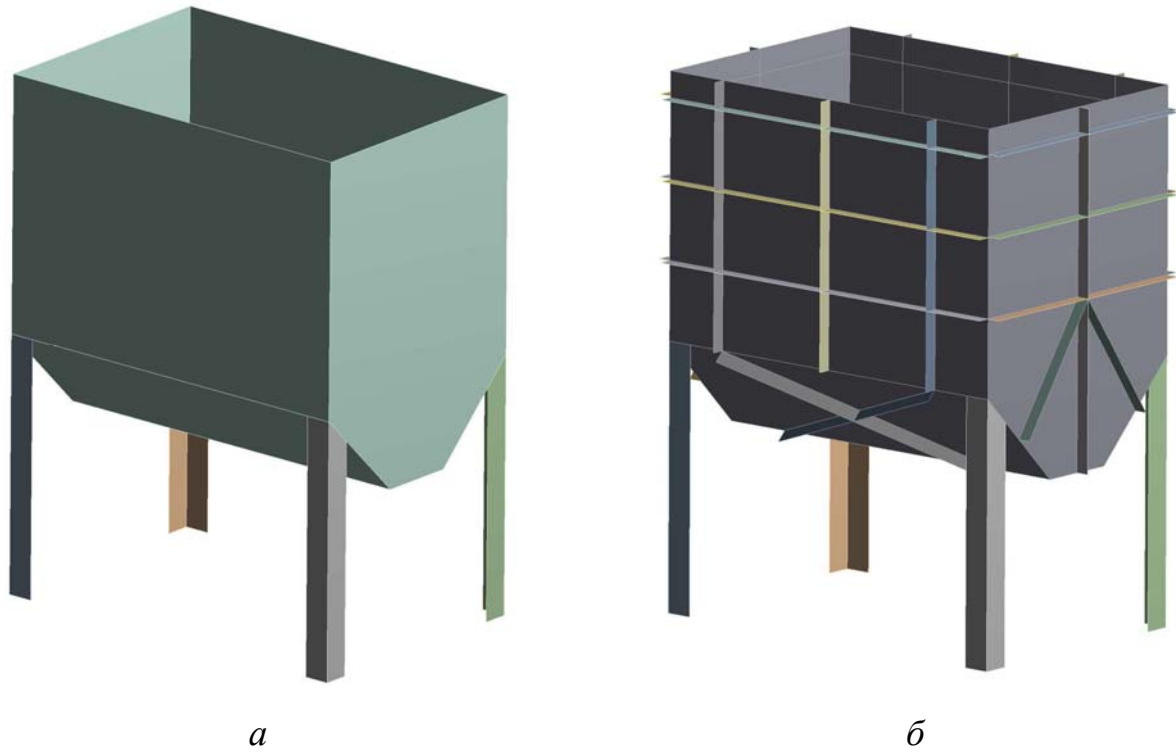


Рисунок 4.1 – Конструкція резервуару у формі паралелепіпеда з двома уклонами днища без (а) та з наявністю ребер жорсткості (б)

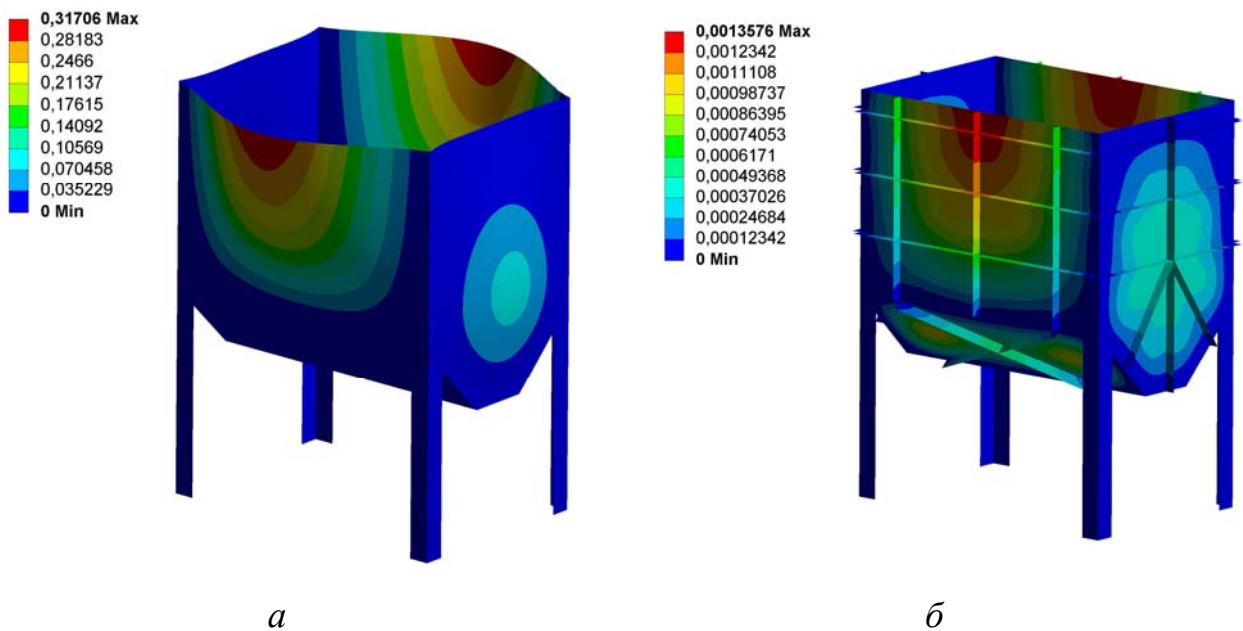
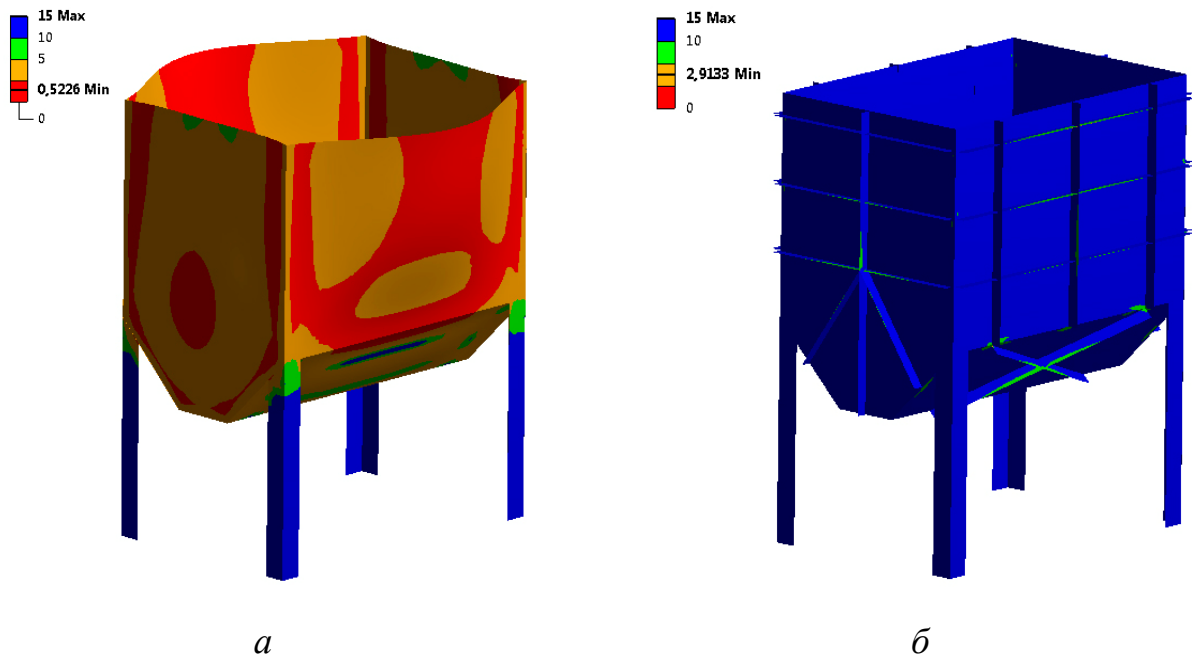


Рисунок 4.2 – Результати розрахунків сумарних переміщень конструкцій резервуару у формі паралелепіпеда з двома уклонами днища без (а) та з наявністю ребер жорсткості (б)



$$a - F_{s\min} = 0,52; \quad b - F_{s\min} = 2,91$$

Рисунок 4.3 – Результати розрахунків запасу міцності конструкцій резервуару у формі паралелепіпеда з двома уклонами днища без (а) та з наявністю ребер жорсткості (б)

Аналіз результатів розрахунків. Отримані результати розрахунків напружено-деформованого стану свідчать про те, що гладкий витратний резервуар, який сконструйовано з листової сталі без ребер жорсткості, має надто велику сумарну деформацію (див. рисунок 4.2а) і запас міцності менший за одиницю. Тобто він знаходиться у пластичному стані, який в свою чергу викликає залишкові або незворотні деформації, що не зникають після зняття навантаження.

На відміну від гладкого резервуару (тобто без ребер жорсткості), конструкція резервуара з ребрами має незначні значення максимальних деформацій, тобто знаходиться в пружному стані і має запас міцності набагато більший за одиницю.

Висновки. Конструкція витратного резервуару з ребрами жорсткості, на відміну від гладкого, відповідає умовам міцності конструкцій (максимальне значення деформації резервуара з ребрами у 230 разів менша, а мінімальний

запас міцності у 5,6 разів більший, порівняно з гладким резервуаром (див. рисунок 4.2, 4.3)) і може бути використана на поточній лінії.

5 Практикум 4. Числовий аналіз міцності упаковки та її руйнування

Мета практикуму: оволодіння навичками конструювання упаковки з використанням САД-систем та динамічного аналізу міцності та руйнування.

Порядок виконання практикуму:

1. Завдання на проектування банки, брусків і пластини наведено нижче за текстом, на рисунках 5.1, 5.2 і в таблиці 5.1.
2. Побудова в САД-системі банки, брусків і пластини та виконання збірок для проведення тестів руйнування банки (рисунок 5.1, 5.2).
3. Виконання за допомогою спеціалізованої обчислювальної системи динамічного аналізу деформації (руйнування) банки під дією бруска різної форми. Побудова динамічних графіків навантаження і деформації.
4. Аналіз результатів розрахунків.
6. Формулювання висновків.

Завдання на практикум 4.

1. Використовуючи САД-систему створіть збірку з деталей (рисунок 5.1):
 - cap (банка) – розташована горизонтально – матеріал сталь;
 - plate (пластина) – матеріал алюміній;
 - block_1, block_2 (брусок), $L=100$ мм – матеріал сталь.
2. Проведіть динамічний аналіз деформації (руйнування) банки під дією бруска різної форми за допомогою спеціалізованої обчислювальної системи, використовуючи при цьому явну схему інтегрування за часом.

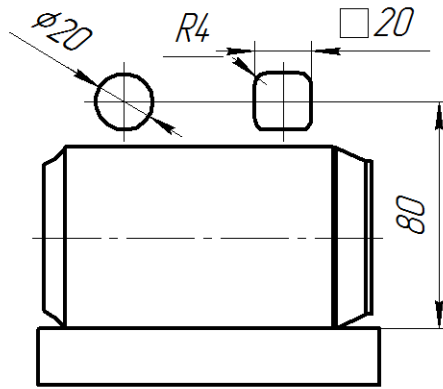


Рисунок 5.1 – Збірка, що включає пластину, банку та брусок
(товщина банки 0,25 мм)

Брусок переміщується за такими координатами:

- $t = 0,0$ с, $Y = 0,0$ м;
- $t = 5 \times 10^{-4}$ с, $Y = -0,06$ м;
- $t = 6 \times 10^{-4}$ с, $Y = -0,03$ м.

3. Використовуючи CAD-систему створіть збірку з деталей:

- can (банка) – розташована вертикально;
- plate (пластина) – 2 шт.

4. Проведіть динамічний аналіз деформації банки під дією пластини, що здавлює банку за допомогою спеціалізованої обчислювальної системи, використовуючи при цьому явну схему інтегрування за часом.

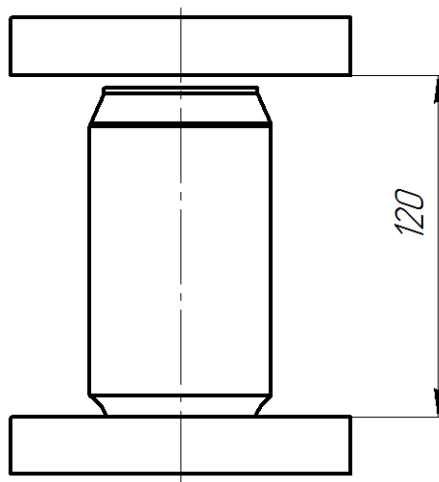


Рисунок 5.2 – Збірка, що включає дві пластини та банку

Пластина переміщується за такими координатами:

- $t = 0,0$ с, $Y = 0,0$ м;
- $t = 5 \times 10^{-4}$ с, $Y = -0,03$ м;
- $t = 6 \times 10^{-4}$ с, $Y = -0,0$ м.

Таблиця 5.1 – Механічні властивості матеріалів

Матеріал	Густина ρ , кг/м ³	Модуль пружності E , МПа	коефіцієнт Пуассона ν	Межа текучості [σ_T], МПа
Сталь	7800	$2,1 \times 10^5$	0,28	220,6
Алюміній	2700	$0,69 \times 10^5$	0,33	275,7

6 Контрольні запитання для підготовки до практичних занять

Практикум 1.

1. Ознаки поточної лінії.
2. Класифікація поточних ліній.
3. Основні етапи проектування поточних ліній.
4. Побудова плану-графіку роботи обладнання на поточній лінії та визначення чисельності робочих місць на ПЛ.
5. Порядок побудови епюр міжопераційних оборотних заділів на прямопоточній поточній лінії.
6. Такт поточної лінії.
7. Види заділів на всіх видах поточних ліній.
8. Методика розрахунку міжопераційних оборотних заділів.
9. Особливості організації праці робочих на поточній лінії.
10. Переваги поточної форми організації виробництва.

Практикум 2.

1. Основні етапи побудови твердо-тільних моделей деталей в САД-системі.
2. Етапи виконання збірок в САД-системі.
3. Побудова креслень за виконаними в САД-системі твердо-тільних моделей деталей або збірок.

Практикум 3.

1. Система стаціонарних диференціальних рівнянь статичної пружності.
2. Які рівняння входять в систему стаціонарних диференціальних рівнянь статичної пружності?
3. Визначення тензора.
4. Граничні умови до системи стаціонарних диференціальних рівнянь статичної пружності.

5. Узагальнений закон Гука. Коефіцієнти Ламе та їх зв'язок з модулем пружності та коефіцієнтом Пуассона.
6. Тензори малих пружних та температурних деформацій.
7. Формула для визначення еквівалентного напруження за Мізесом.
8. Визначення запасу міцності конструкцій, що зроблені з пластичних і крихких матеріалів.
9. Порядок побудови моделей гладкого та ребреного витратного резервуару в CAD-системі.
10. Методика виконання числового аналізу пружного та термопружного стану витратного резервуару.

Практикум 4.

1. Система нестационарних диференціальних рівнянь динамічної пружності.
2. Геометричні нелінійні рівняння. В чому полягає різниця між лінійними та нелінійними геометричними рівняннями?
3. Початкові умови системи нестационарних диференціальних рівнянь динамічної пружності.
4. Граничні умови, що описують контактну взаємодію між тілами.
5. Нормальне і тангенціальне напруження на поверхні. Формули для їх визначення.
6. Методика проведення числового аналізу міцності та руйнування упаковки.

7 Список рекомендованої літератури

7.1 Основна література

1. Кодра Ю. В., Стоцько З. А. Технологічні машини. Розрахунок і конструювання: Навч. посібник / За ред. З. А. Стоцько. — Львів : Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2004. — 468 с.
2. Новицкий Н. И. Организация производства на предприятии : [учебн. метод. пособ.]. — М. : Финансы и статистика, 2001. — 391 с.
3. Тюленев Л. В. Организация планирования машиностроительного производства / Л. В. Тюленев. — СПб. : 2001. — 465 с.
4. Организация и планирование машиностроительного производства: производственный менеджмент / Под.ред. Ю. В. Скворцова. — М. : Высшая школа, 2003. — 470 с.
5. Организация производства на предприятии / Под.ред. О. Г. Туровука. — М. ;, 2002. — 462 с.
6. Фатхудинов Р. А. Организация производства / Р. А. Фатхудинов. — М. : , 2002. — 670 с.
7. Тику Ш. Эффективная работа: SolidWorks 2005. / Ш. Тику. — СПб. : Питер, 2006. — 816 с.
8. ОАП Интерактивный учебник. CAD-CAM. <http://www.oap.org.ru>
9. Оборудование и основы проектирования заводов резиновой промышленности : Учеб. пособие для вузов / Бекин Н. Г., Захаров Н. Д., Пеунков Г. К. и др.: Под общ. ред. Н. Д. Захарова. — Л. : Химия, 1985. — 504 с.
10. Ханлон Дж. Ф. Упаковка и тара: проектирование, технологи, применение / Дж. Ф. Ханлон, Р. Дж. Келси, Х. Е. Форсинио ; пер. с англ. под. ред. В. Л. Жавнера. — СПб. : Профессия, 2006. — 632 с.

11. Мікульонок І. О. Обладнання і процеси переробки термопластичних матеріалів з використанням вторинної сировини [Текст] : моногр. / І. О. Мікульонок. — К. : НТУУ «КПІ», 2009. — 264 с.
12. Серебренников Г. Г. Организация производства: Учеб. пособие. Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2004. — 96 с.
13. Теоретичні та експериментальні дослідження теплоелектричного та механічного стану високотемпературних агрегатів [Текст] : моногр. / А. Я. Карвацький, Є. М. Панов, С. В. Кутузов та ін. — К. : НТУУ «КПІ», 2012. — 352 с.

7.2 Додаткова література

14. Сайт: Інтернет-портал для управленців. — Режим доступу: <http://www.management.com.ua/finance/fin006.html> — Оценки комплексных показателей эффективности инвестиций.
15. Сайт: Корпоративный менеджмент. — Режим доступу: <http://www.cfin.ru/encycl/npv.shtml> — Чистая приведенная стоимость.
16. Каплун А. Б. ANSYS в руках инженера А.Б. Каплун, Е.М. Морозов, М.А. Олферова. — М. : УРСС, 2003. — 270 с.
17. Алямовский А. А. и др. SolidWorks. Компьютерное моделирование в инженерной практике / Алямовский А. А., Собачкин А. А., Одинцов Е. В., Харитонович А. И., Пономарев Н. Б. — СПб. : БХВ-Петербург, 2005. — 800 с.
18. Прохоренко В. П. SolidWorks. Практическое руководство / В. П. Прохоренко. — М. : ООО Бином-Пресс, 2004. — 448 с.
19. Брагинский В. А. Технология прессования точных деталей из термореактивных пластмасс / В. А. Брагинский. — Л. : Химия, 1971. — 256 с.
20. Боткин М. Н. Расчет и конструирование деталей из пластмасс / М. Н. Боткин, О. Г. Циплаков. — Л. : Машиностроение, 1966. — 175 с.