

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ФАКУЛЬТЕТ ІНЖЕНЕРІЇ, ТРАНСПОРТУ ТА АРХІТЕКТУРИ  
Кафедра трибології, автомобілів та матеріалознавства

## Пояснювальна записка

до дипломної роботи

магістра

Освітньо-кваліфікаційний рівень

Напрямок підготовки (спеціальність) 132 «Матеріалознавство. Відновлення та  
технічний сервіс автомобілів»  
Шифр і назва напрямку підготовки (спеціальності)

на тему: «Дослідження працездатності деталей заднього мосту  
автомобіля МАЗ-5551»

Шифр МРТАМ 2116153.000 ПЗ

Виконав: студент 2-го курсу, група МТВАм-20-1

  
Підпис

I.V. Коробка  
Ініціали, прізвище

Керівник *к.т.н., доц. каф. ТАМ*

  
Підпис

O.Yu. Рудик  
Ініціали, прізвище

До захисту допускаю:

Зав. кафедри ТАМ д.т.н., проф.

  
Підпис

O.V. Диха  
Ініціали, прізвище

10 12 2021 р.

Хмельницький, 2021

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інженерії, транспорту та архітектури

Кафедра трибології, автомобілів та матеріалознавства


Світньо-кваліфікаційний рівень магістр

Напрямок підготовки (спеціальність) 132 «Матеріалознавство»

Світньо-професійна програма Відновлення та технічний сервіс автомобілів»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ТАМ

 проф., д.т.н. Духа О.В.  
21 серпня 2021 року

**ЗАВДАННЯ**  
НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Коробці Івану Васильовичу

Прізвище, ім'я, по батькові

Тема проекту (роботи) Дослідження працездатності деталей заднього мосту автомобіля МАЗ-5551

Рівень проекту (роботи) Рудик Олександр Юхимович к.т.н., доцент

Прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання

Затверджено наказом університету від 25 серпня 2021р. № 102 (25)

Строк подання студентом проекту на кафедру 10 грудня 2021 р.

Вихідні дані до проекту (роботи) Матеріали практики; робочі креслення досліджуваних деталей; нормативно-технологічна документація з розбирання, ефектації, складання і регулювання вузла тертя.

Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

Конструкція, ремонт і технічне обслуговування заднього мосту автомобіля МАЗ-551.

Розрахунки заднього мосту автомобіля МАЗ-5551.

Комп'ютерне моделювання напружено-деформованого стану вал-шестерні головної передачі заднього мосту автомобіля МАЗ-5551.

Дослідження міцності веденої конічної шестірні за допомогою SolidWorks Simulation.

Застосування SolidWorks Simulation для дослідження міцності фланця заднього мосту автомобіля МАЗ-5551.

Інформація про матеріали досліджуваних деталей. Цементация сталі 20.

Дослідження зносостійкості сталей.

Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслень)

Графічну частину проекту представити у вигляді презентації на слайдах

6. Консультанти розділів проекту (роботи)

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

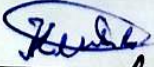
7. Дата видачі завдання \_\_\_\_\_


### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту (роботи)	Приміт
1	Літературний огляд	30.09.2021	
2	Технологічний розділ	25.10. 2021	
3	Дослідницький розділ	15.11. 2021	
4	Оформлення розрахунково-пояснювальної записки	22.11. 2021	
5	Оформлення презентації магістерської роботи	1.12. 2021	
6	Нормоконтроль магістерської роботи	5.12. 2021	
7	Підписання розділів. Затвердження дати захисту	10.12. 2021	

Студент

Керівник проекту (роботи)

  
Підпис

  
Підпис

I.В. Коробка  
Ініціали, прізвище

О.Ю. Рудик  
Ініціали, прізвище

## РЕФЕРАТ

**Обсяг пояснювальної записки** – 93 сторінки, кількість рисунків – 40, таблиць – 5, додатків – 2, кількість джерел згідно із переліком посилань – 29.

**Об'єкт дослідження:** деталі заднього мосту автомобіля МАЗ-5551.

**Мета роботи:** заміна матеріалів вал-шестерні (сталь 20ХГНМ) та веденої конічної шестірні (сталь 15ХГН2ТА) головної передачі, фланця (сталь 45Х) заднього мосту (гартування) на цементовану та гартовану сталь 20 для виготовлення цих деталей.




**Результати та їх новизна:** з точки зору забезпечення міцності для виготовлення цих деталей заміна їх матеріалу є можливою. Перевірними розрахунками за зношуванням встановлено, що у випадку заміни цих гартованих сталей на цементовану та гартовану сталь 20 інтенсивність зношування зменшується в 1,14 рази.

**Рекомендації щодо використання результатів роботи:** для виготовлення вал-шестерні та веденої конічної шестірні головної передачі, фланця заднього мосту автомобіля МАЗ-5551 використати цементовану та гартовану сталь 20.

**Перелік ключових слів:** АВТОМОБІЛЬ МАЗ-5551, ЗАДНІЙ МІСТ, ГОЛОВНА ПЕРЕДАЧА, СТАЛЬ 20, ГАРТУВАННЯ, ЦЕМЕНТАЦІЯ, ЗНОСОСТІЙКІСТЬ.

## Зміст

Вступ.....	7
<b>1 Конструкція, ремонт і технічне обслуговування заднього мосту автомобіля МАЗ-5551.....</b>	<b>8</b>
1.1 Будова і деталі заднього мосту автомобіля МАЗ-5551.....	8
1.2 Редуктор заднього мосту автомобіля МАЗ-5551.....	3
1.3 Ремонт і технічне обслуговування заднього мосту автомобіля МАЗ-5551.....	13
<b>2 Розрахунки заднього мосту автомобіля МАЗ-5551.....</b>	<b>22</b>
2.1 Підбір матеріалу для основних деталей.....	22
2.2 Визначення числа зубів шестірні головної передачі.....	22
2.3 Розрахунковий момент.....	22
2.4 Вихідні дані.....	22
2.5 Контактна втома.....	22
2.5.1 Контактні напруження зубчастої пари.....	22
2.5.2 Момент на валу шестерні.....	22
2.5.3 Допустиме напруження за тривалої межі контактної витривалості.....	22
2.6 Розрахунок зубів на втому при вигині.....	22
2.7 Розрахунки міцності зубчастих коліс.....	22
2.8 Розрахунки ведучого вала головної передачі на статичну міцність.....	22
2.9 Вибір підшипників.....	22

МРТАМ 2116153.000 ПЗ				
Зм.	Арк.	Недокум.	Підпис	Дата
Виконав	Коробка			
Перевір.	Рудик			
Н.контр.	Бабак			
Дослідження працездатності деталей заднього мосту автомобіля МАЗ-5551				
		Літера	Аркуш	Аркушів
		У	4	93
ХНУгр.МТВАм-20-1				

<b>3</b>	<b>Комп'ютерне моделювання напружено-деформованого стану вал-шестерні головної передачі заднього мосту автомобіля МАЗ-5551.....</b>
<b>4</b>	<b>Дослідження міцності веденого конічного колеса за допомогою SolidWorks Simulation .....</b>
<b>5</b>	<b>Застосування SolidWorks Simulation для дослідження міцності фланця заднього мосту автомобіля МАЗ-5551 .....</b>
<b>6</b>	<b>Інформація про матеріали досліджуваних деталей. Цементация сталі 20 ..</b>
6.1	Сталь 20ХГНМ (вал-шестерня головної передачі).....
6.2	Сталь 15ХГН2ТА (ведена конічна шестірня головної передачі).....
6.3	Сталь 45Х (фланець головної передачі) .....
6.4	Сталь 20 – рекомендований замітник гартованих сталей 20ХГНМ, 15ХГН2ТА, 45Х.....
6.5	Цементация сталі 20.....
6.5.1	Способи цементации .....
6.5.2	Властивості металу після цементации.....
6.5.3	Термообробка цементованих виробів.....
6.6	Обладнання для цементации сталі 20 .....
6.7	Обладнання для зміцнення сталей 20ХГНМ, 15ХГН2ТА, 45Х .....
<b>7</b>	<b>Дослідження зносостійкості сталей.....</b>
7.1	Модель усталеного зносу .....
7.2	Схема та формули розрахунку.....
7.3	Методика проведення досліджень.....
7.4	Результати випробувань і визначення параметрів моделі зносу.....
7.5	Порівняння зразків за зношуванням .....
	<b>Висновки .....</b>
	<b>Список використаних джерел.....</b>
	<b>Додатки.....</b>

## Вступ

**Актуальність теми.** Основні деталі заднього мосту автомобіля МАЗ-5551 виготовлені з високолегованих (отже, достатньо дорогих) конструкційних сталей. Тому проведено дослідження можливості їх заміни на дешевшу сталь 20.

**Новизна роботи.** Для дослідження міцності вал-шестерні (сталь 20ХГНМ) та веденої конічної шестірні (сталь 15ХГН2ТА) головної передачі, фланця (сталь 45Х) заднього мосту застосовано SolidWorks Simulation: з точки зору забезпечення міцності для виготовлення цих деталей заміна їх матеріалу є можливою. Перевірними розрахунками за зношуванням встановлено, що у випадку заміни цих гартованих сталей на цементовану та гартовану сталь 20 інтенсивність зношування зменшується в 1,14 рази.

**Достовірність отриманих результатів та обґрунтованість висновків і рекомендацій** забезпечена застосуванням сучасних методів досліджень, достатнім об'ємом експериментально-розрахункової частини роботи, використанням комп'ютерної техніки для розв'язання задач.

Результати досліджень були представлені на:

– VI Міжнародній науково-практичній конференції, «PERSPECTIVES OF WORLD SCIENCE AND EDUCATION», 3-5 березня 2021 р., Кіото, Японія.

**Можливість використання висновків і рекомендацій у наукових дослідженнях та на практиці:** запропонована заміна загартованих сталей 20ХГНМ, 15ХГН2ТА, 45Х на цементовану та загартовану сталь 20.

# 1 Конструкція, ремонт і технічне обслуговування заднього мосту автомобіля МАЗ-5551

МАЗ-5551 — сов'єтський і білоруський великотоннажний вантажний автомобіль (рис. 1.1), який випускається на Мінському автомобільному заводі [1].

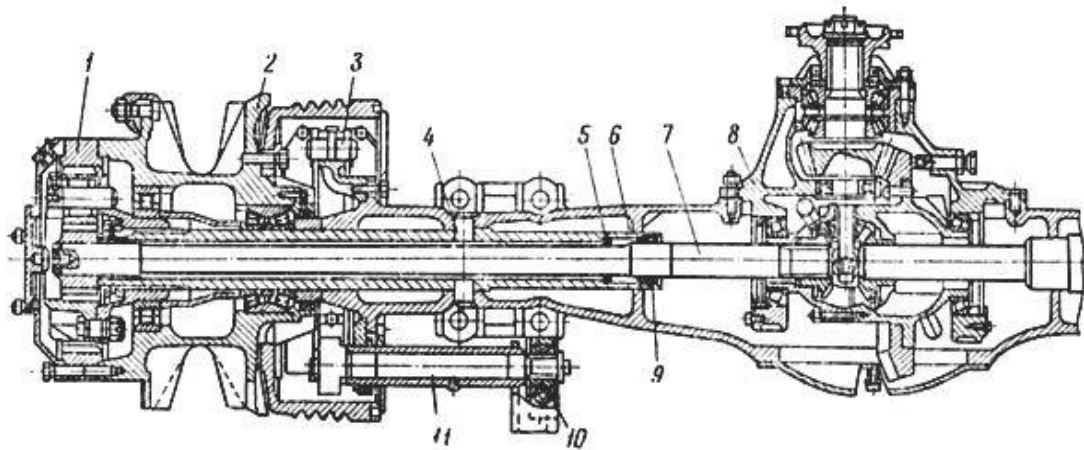
База автомобіля МАЗ-5551 – МАЗ-5337. Крім шасі для самоскидів, випускається шасі для монтажу різного спеціалізованого обладнання.



**Рисунок 1.1 – МАЗ-5551**

## 1.1 Будова і деталі заднього мосту автомобіля МАЗ-5551

Задній міст МАЗ-5551 (рис. 1.2) передає крутний момент від колінчатого вала двигуна через зчеплення, коробку передач і карданний вал до ведучих коліс автомобіля й за допомогою диференціала дозволяє ведучим колесам обертатися з різною кутовою швидкістю [2].



1 — колісна передача; 2 — маточина заднього колеса; 3 — гальма задніх коліс; 4 — стопорний штифт кожуха півосі; 5 — напрямне кільце півосі; 6 — кожух півосі; 7 — піввісь; 8 — центральний редуктор; 9 — спарений сальник півосі; 10 — регулювальний важіль; 11 — розтискний кулак гальм

**Рисунок 1.2 – Задній міст МАЗ-5551**

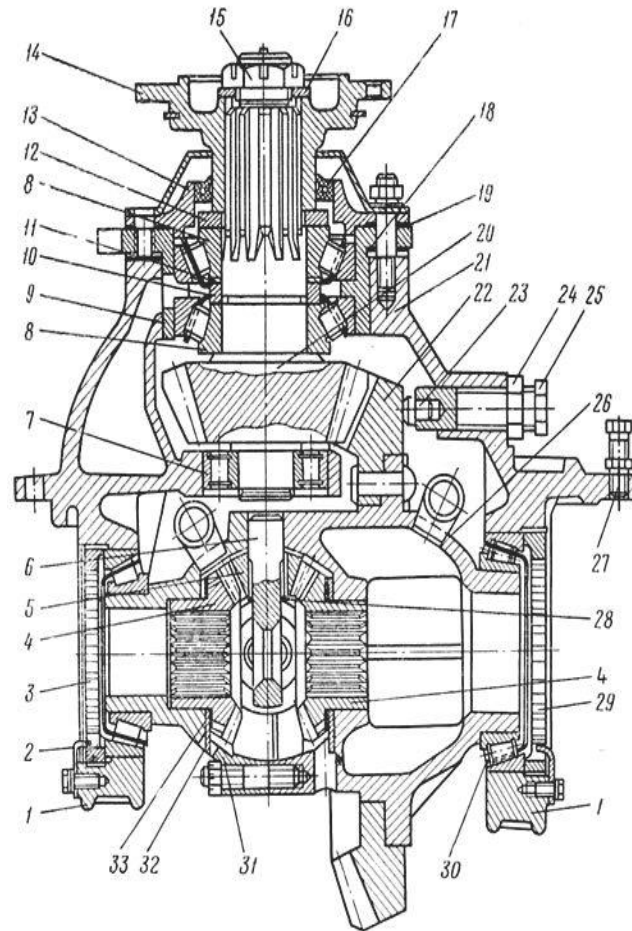
Прийняті конструктивна й кінематична схеми передачі крутного моменту дозволяють розділити його в центральному редукторі, направивши до колісних передач, і тим самим розвантажити диференціал і півосі від збільшеного моменту, який передається при двоступінчастій схемі головної передачі заднього мосту МАЗ-5551.

Застосування колісних передач дозволяє, крім того, шляхом зміни тільки числа зубів циліндричних шестірень колісного редуктора й збереження міжцентрової відстані в шестірнях колісних передач одержувати різні передаточні числа, що робить задній міст придатним для використання на різних модифікаціях автомобілів.

## **1.2 Редуктор заднього мосту автомобіля МАЗ-5551**

Редуктор заднього мосту МАЗ-5551 (рис. 1.3) — одноступінчастий, складається з пари конічних шестірень зі спіральними зубами й межколісного диференціала. Деталі редуктора монтуються в картері 21, виготовленому з ковкого чавуну. Положення картера щодо балки

визначається центруючим буртиком на привалочному фланці картера редуктора й, крім того, установочними штифтами [29].



1 — кришка підшипника; 2 — стопор гайки підшипника; 3 — ліва гайка підшипника-4 — шестірня півосі; 5 — сателіт диференціала; 6 — хрестовина диференціала; 7 — циліндричний підшипник ведучої шестірні; 8 — конічний підшипник ведучої шестірні; 9 — картер підшипника ведучої шестірні; 10 — розпірне кільце; 11 — регулювальна шайба; 12 — мастиловідбивач; 13 — кришка сальника; 14 — фланець; 15 — гайка фланця; 16 — шайба; 17 — сальник; 18 — регулювальні прокладки; 19 — прокладка; 20 — ведуча вал-шестірня; 21 — картер редуктора; 22 — ведене колесо; 23 — сухар; 24 — контргайка; 25 — обмежник веденої шестірні; 26 — права чашка диференціала; 27 — демонтажний болт картера редуктора; 28 — упорне кільце втулки; 29 — права гайка підшипника; 30 — конічний підшипник; 31 — ліва чашка диференціала; 32 — сталева шайба; 33 — бронзова шайба

**Рисунок 1.3 – Редуктор заднього мосту МАЗ-5551**

Ведуча конічна шестірня 20, виготовлена як одне ціле з валом, кріпиться не консольно, а має, крім двох передніх конічних роликів підшипників 8, ще додаткову задню опору, що представляє собою циліндричний роликівий підшипник 7.

Конструкція редуктора МАЗ-5551 з трьома підшипниками є більш компактною, при цьому значно знижується максимальне радіальне навантаження на підшипники порівняно з консольним кріпленням, підвищується навантажувальна здатність підшипників і стабільність регулювання зачеплення конічних шестірень, що значно збільшує їхню довговічність.

Можливість наближення в цьому випадку конічних роликівий підшипників до зубчастого вінця ведучої конічної шестірні зменшує довжину її хвостовика й дозволяє тим самим побільшати відстань між фланцем редуктора й фланцем коробки передач, що дуже важливо при невеликій базі автомобіля для кращого розташування карданного вала.

Зовнішні кільця конічних роликівий підшипників розташовані в картері 9 і запресовані до упору в буртик, зроблений у картері. Фланець картера підшипників шпильками прикріплений до картера редуктора заднього мосту.

Ці підшипники сприймають як радіальні, так й осьові навантаження, що виникають у зачепленні пари конічних шестірень при передачі крутного моменту.

Внутрішній підшипник має щільну посадку на валу, а зовнішній — ковзну, що дозволяє регулювати натяги в цих підшипниках.

Між внутрішніми кільцями конічних роликівий підшипників установлені розпірне кільце 10 і регулювальна шайба 11.

Добором товщини регулювальної шайби обумовлюється необхідний попередній натяг у конічних роликівий підшипниках.

Циліндричний роликівий підшипник 7 ведучої конічної шестірні встановлений у розточенні припливу картера редуктора заднього мосту МАЗ-5551 по ходовій посадці й зафіксований від осьового зсуву стопорним кільцем, що входять у канавку на циліндричній частині кінця ведучої шестірні.

Цей підшипник сприймає тільки радіальні зусилля, що з'являються при передачі крутного моменту конічними шестірнями, і зменшує деформацію ведучої шестірні, що виникає при цьому.

На передній частині вала ведучої конічної шестірні на поверхні меншого діаметра нарізана різьба, а на поверхні великого діаметра — шліци, на які встановлені мастиловідбивач 12 і фланець 14 карданного вала.

Усі деталі, розташовані на валу ведучої шестірні, затягнуті корончатою гайкою 15.

Для полегшення зняття картера підшипників у його фланці є два різьбові отвори, у які можуть бути вкручені демонтажні болти; при укрупчуванні болти впираються в тіло картера редуктора заднього мосту МАЗ-5551, внаслідок чого картер підшипників виходить із картера редуктора.

У якості демонтажних болтів можуть бути використані болти того ж призначення, укрупнені у фланець картера редуктора.

Ведена конічна шестірня 22 приклепана до правої чашки диференціала.

Через обмеженість місця між шестірнею й припливом у картері редуктора під додаткову опору ведучої шестірні заднього мосту заклепки, що з'єднують ведену шестірню із чашкою диференціала із внутрішньої сторони, мають плоску головку.

Ведена шестірня центрується по зовнішній поверхні фланця чашки диференціала.

При роботі ведена шестірня в результаті деформації може бути віджата від ведучої шестірні, внаслідок чого буде порушене зачеплення шестірень. Для обмеження такої деформації й збереження правильного контакту в зачепленні конічних шестірень у картері редуктора встановлений обмежник 25 веденої шестірні, виконаний у вигляді болта, в торець якого вставлений латунний сухар.

Обмежник ввертають у картер редуктора мосту МАЗ-5551 доти, поки його сухар не торкнеться торця веденої конічної шестірні, після чого обмежник відвертають для створення необхідного зазору й конtringють гайки.

Зачеплення конічних шестірень головної передачі можна регулювати зміною набору регулювальних прокладок 18 різної товщини, виготовлених з м'якої сталі й установлених між картером підшипників і картером редуктора заднього мосту.

Конічна пара шестірень при заводському складанні проходить попередній добір (спарювання) по контакту й шуму. Тому у випадку заміни однієї шестірні інша шестірня теж повинна бути замінена.

### 1.3 Ремонт і технічне обслуговування заднього мосту автомобіля МАЗ-5551

Ремонт заднього мосту автомобіля МАЗ-5551 полягає в заміні зношених або ушкоджених деталей. Конструкція заднього мосту дозволяє виконати більшість ремонтних робіт без зняття його з автомобіля [3].

Для заміни сальника ведучої шестірні редуктора заднього мосту необхідно:

- від'єднати карданний вал від фланця 14 (див. рис. 1.3) редуктора мосту;
- розшплінтувати і відкрутити гайку 15, зняти фланець 14 і шайбу 16;
- відкрутити гайки шпильок, що кріплять кришку 13 сальника, і, користуючись демонтажними болтами, зняти кришку із сальником;
- замінити сальник, заповнивши його внутрішні порожнини консистентним мащенням 1-13, і зібрати вузол у порядку, зворотному розбиранню (сальник запресовують заодно із зовнішнім торцем кришки).

При необхідності заміни сальника 9 (див. рис. 1.2) півосі заднього мосту МАЗ-5551 потрібно:

- злити масло з картера мосту, відкрутивши зливальну й заливну пробки;
- від'єднати карданний вал;
- зняти малі кришки колісних передач;
- відкрутити один болт 15 кріплення великої кришки й, закручуючи його в різьбові отвори в торцях півосей 22, обережно вийняти її разом із сонячними шестірнями 11 колісних передач;
- відкрутити гайки шпильок кріплення центрального редуктора до картера мосту (за винятком двох верхніх).

Після цього за допомогою візка з підйомником вийняти редуктор заднього мосту МАЗ-5551 закручуючи два демонтажні болти у фланці кріплення редуктора до картера мосту, і, знявши дві верхні гайки, що залишилися, замінити сальник півосі за допомогою знімача, заповнивши внутрішні порожнини сальника консистентним мастилом.

Збирають задній міст у зворотній послідовності, причому встановлювати півосі впливає обережно, повертаючи їх щоб уникнути вивертання робочої крайки сальника.

Ремонт мосту МАЗ-5551 зв'язаний зі зняттям і розбиранням центрального редуктора або колісної передачі.

Перш ніж зняти центральний редуктор, необхідно злити масло з картера мосту, від'єднати карданний вал і зняти стоянкове гальмо.

Потім зняти малі кришки колісних передач, відкрутити болт великої кришки колісної передачі й, закрутивши його по черзі в різьбове гніздо на торцях півосей, вивести півосі з диференціала.

Відкрутити гайки шпильок кріплення центрального редуктора до картера мосту й зняти редуктор за допомогою підкатного візка.

Центральний редуктор заднього мосту автомобілів МАЗ зручніше розбирати на поворотному стенді. При відсутності стенда можна використовувати низький столик-верстат висотою 500-600 мм.

Послідовність розбирання редуктора мосту МАЗ-5551 наступна:

- зняти ведучу шестірню 20 (див. рис. 1.3) з підшипниками в зборі;
- відкрутити гайки 29 і 3 кришок підшипників диференціала;
- зняти кришки 1 підшипників диференціала;
- відкрутити гайки шпильок кріплення чашок диференціала й розкрити диференціал (зняти сателіти, півосьові шестірні, упорні шайби).

Розбірні деталі редуктора заднього мосту МАЗ-5551 промити й ретельно оглянути.

Перевірити стан підшипників, на робочих поверхнях яких не повинне бути викришених місць, тріщин, вм'ятин, шелушення, а також руйнування або ушкодження роликів і сепараторів.

При огляді шестірень переконатися у відсутності відколів і обломів зубів, тріщин, викрашування цементацийного шару на поверхні зубів.

При підвищеному шумі шестірень редуктора заднього мосту МАЗ під час роботи величина бічного зазору 0,8 мм може служити підставою для заміни конічної пари шестірень.

Ведучу й ведену конічні шестірні при необхідності замінити комплектно, тому що на заводі їх підбирають попарно по контакту й бічному зазору й таврують однаковим номером.

При огляді деталей диференціала мосту МАЗ-5551 звернути увагу на стан поверхні шийок хрестовини, отворів і сферичних поверхонь сателітів, опорних поверхонь півосьових шестірень, опорних шайб і торцевих поверхонь чашок диференціала, які не повинні мати задирів.

При значному зношуванні або ослабленні посадки замінити втулку сателіта. Нову втулку обробляють після запресовування її в сателіт до діаметра  $26+0,045$  мм.

При значному зношуванні бронзових опорних шайб півосьових шестірень їх слід замінити. Товщина нових бронзових шайб — 1,5 мм.

Після складання диференціала заднього мосту МАЗ-5551 рекомендується замірити зазор між півосьовою шестірнею й опорною бронзовою шайбою, який повинен бути в межах 0,5-1,3 мм.

Зазор заміряють щупом через вікно в чашках диференціала, коли сателіти зрушені до опорних шайб до відмови, а півосьова шестірня притиснута до сателітів, тобто перебуває в зачепленні з ними. Чашки диференціалів замінюють комплектно.

Обслуговування заднього мосту автомобілів МАЗ-5551 полягає у перевірці й підтримці необхідних рівнів змащення в центральному редукторі й у колісних передачах, своєчасній зміні змащення, очищенню сапунів від забруднення, перевірці й підтяжці кріпильних деталей, перевірці шуму роботи й температури нагрівання заднього мосту.

Особливу увагу при технічному обслуговуванні заднього мосту треба приділяти регулюванню центрального редуктора. Його виконують при знятому редукторі; при цьому спочатку регулюють конічні підшипники ведучої конічної шестірні й підшипники диференціала, а потім зачеплення конічних шестірень по плямі контакту.

Для регулювання підшипників ведучої конічної шестірні редуктора заднього мосту МАЗ-5551 необхідно:

– розібрати стоянкове гальмо й зняти супорт із картера 9 (див. рис. 1.3);

– злити масло;

– відкрити гайки шпильок кріплення картера заднього мосту МАЗ підшипників ведучої шестірні й за допомогою демонтажних болтів 27 вийняти картер 9 з ведучою конічною шестірнею в зборі;

– закріпивши картер 9 у лещатах, визначити індикатором осьовий люфт підшипників;

– звільнивши картер 9, затиснути ведучу конічну шестірню в лещатах.

Розшпінтувати і відкрити гайку 15 фланця, зняти шайбу й фланець.

Зняти кришку за допомогою демонтажних болтів. Зняти мастиловідбивач 12, внутрішнє кільце переднього підшипника й регулювальну шайбу 11;

– замірити товщину регулювальної шайби й розрахувати, до якої величини необхідно зменшити її для усунення осьового люфту й одержання попереднього натягу (зменшення товщини шайби повинне бути рівне сумі заміряного індикатором осьового люфту вала й величини 0,03—0,05 мм попереднього натягу);

– прошліфувати регулювальну шайбу до необхідної величини, установити її й інші деталі, крім кришки 13 з сальником, яку ставити не слід, тому що тертя сальника по шийці фланця не дозволить точно виміряти момент опору провертання шестірні в підшипниках.

При затягуванні гайки фланця редуктора МАЗ-5551 слід провертати картер підшипників, щоб ролики правильно розмістилися в обоймах підшипників;

– перевірити попередній натяг підшипників по величині моменту, необхідного для провертання ведучої шестірні, який повинен бути рівний 0,1-0,3 кГм.

Визначити цей момент можна динамометричним ключем на гайці 15 або виміром зусилля, прикладеного до отвору на фланці під болти кріплення карданного вала.

Зусилля, прикладене перпендикулярно радіусу розташування отворів на фланці, повинне становити 1,3-3,9 кГ.

Слід пам'ятати, що занадто великий натяг у конічних підшипниках приводить до сильного їхнього нагрівання й швидкому зношуванню.

При нормальному попередньому натягу підшипників зняти з вала ведучої шестірні гайку, помітивши її положення, і фланець, потім установити на місце кришку 13 (див. рис. 1.3) із сальником і остаточно зібрати вузол.

Перед регулюванням підшипників диференціала й зачеплення конічних шестірень головної передачі МАЗ-5551 потрібно відкрутити обмежник 25 веденої шестірні.

Затягування підшипників диференціала регулюють за допомогою гайок 3 і 29, які слід навертати на однакову глибину, щоб не порушувати положення шестірні до одержання необхідного попереднього натягу в підшипниках.

Попередній натяг підшипників визначається величиною моменту, необхідного для повороту диференціала, який повинен бути в межах 0,2-0,3 кГм (при знятій ведучій конічній шестірні).

Цей момент визначається динамометричним ключем або виміром зусилля, прикладеного на радіусі чашок диференціала й рівного 2,3-3,5 кГ.

Порядок перевірки й регулювання зачеплення конічних шестірень редуктора МАЗ-5551 наступний:

– перед установкою картера 9 підшипників з ведучою шестірнею в картер редуктора насухо протирають зуби конічних шестірень і змащують три-чотири зуби ведучої шестірні тонким шаром фарби по всій їхній поверхні;

– установлюють у картер редуктора картер 9 із ведучою шестірнею; закручують гайки на чотири навхрест лежачі шпильки й повертають за фланець 14 ведучу шестірню (в одну й іншу сторони);

– по відбитках (плямам контакту), отриманим на зубах веденої шестірні, установлюють правильність зачеплення шестірень і характер регулювання зачеплення.

Регулюють зачеплення шестірень зміною кількості прокладок 18 під фланець картера підшипників ведучої шестірні й за допомогою гайок 3 і 29, не порушуючи регулювання підшипників диференціала.

Для того, щоб відсунути ведучу шестірню від веденої, необхідно під фланець картера підкласти додатково регульовальні прокладки, а при необхідності зближення шестірень — вийняти прокладки.

Для переміщення веденої шестірні редуктора заднього мосту користуються гайками 3 і 29. Щоб не порушувати регулювання підшипників 30 диференціала, необхідно закручувати (відкручувати) гайки 3 і 29 на той самий кут.

При регулюванні зачеплення (по плямі контакту) на зубах шестірень зберігати бічний зазор між зубами, величина якого в новій парі шестірень повинна бути в межах 0,2-0,5 мм.

Зменшення бічного зазору між зубами шестірень за рахунок зсуву плями контакту від рекомендованого положення не допускається, тому що це приводить до порушення правильності зачеплення шестірень і швидкому їхньому зношуванню.

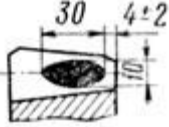

Після закінчення регулювання зачеплення шестірень редуктора заднього мосту МАЗ затягти всі гайки шпильок кріплення картера підшипників до картера редуктора, поставити стопори гайок підшипників, закрутити обмежник 25 так, щоб одержати мінімальний зазор 0,15-0,2 мм між сухарем і веденою шестірнею (мінімальний зазор установлюється при повороті веденої шестірні на один оберт). Після цього обмежник 25 веденої шестірні застопорити контргайкою.

При знятті центрального редуктора з автомобіля (для регулювання або ремонту) перевіряти зазор між торцевою площиною півосьової шестірні й опорною шайбою, який на заводі встановлюється в межах 0,5-1,3 мм.

Зазор перевіряють за допомогою щупа через вікна в чашках диференціала, коли сателіти зрушені до опорних шайб до відмови, а півосьова шестірня притиснута до сателітів, тобто перебуває в зачепленні з ними.

Можливі несправності заднього мосту і способи їх усунення наведені в табл. 1.1 [4].

Таблиця 1.1 – Можливі несправності заднього мосту і способи їх усунення

Положення контактної плями на веденій шестірні	Спосіб досягнення правильного зачеплення шестірень	
Рух вперед/Задній хід		
	Правильний контакт конічних шестірень	

	<p>Присунути ведену шестірню до ведучої. Якщо при цьому вийде занадто малий бічний зазор між зубами шестірень, відсунути ведучу шестірню від веденої</p>	
	<p>Відсунути ведену шестірню від ведучої. Якщо при цьому вийде занадто великий бічний зазор між зубами шестірень, присунути ведучу шестірню до веденої</p>	
	<p>Присунути ведену шестірню до ведучої. Якщо при цьому необхідно буде змінити бічний зазор у зачепленні, присунути ведучу шестірню до веденої</p>	
	<p>Відсунути ведену шестірню від ведучої. Якщо при цьому необхідно буде змінити бічний зазор у зачепленні, відсунути ведучу шестірню від веденої</p>	
	<p>Присунути ведучу шестірню до веденої. Якщо бічний зазор у зачепленні буде занадто малий, відсунути ведену шестірню від ведучої</p>	
	<p>Відсунути ведучу шестірню від веденої. Якщо бічний зазор буде занадто великий, присунути ведену шестірню до ведучої</p>	

**Причина несправності**

**Спосіб усунення**

### **Підвищений нагрів мосту**

Зайва або недостатня кількість масла в картері	Перевірити і довести до нормального рівень масла в картері
Неправильне регулювання зачеплення шестірень	Відрегулювати зачеплення шестірень
Збільшений натяг підшипників	Відрегулювати натяг підшипників

### **Підвищений шум мосту**

Порушення регулювання і зачеплення конічних шестірень	Відрегулювати зачеплення конічних шестірень
Знос конічних підшипників або порушення їх регулювання	Перевірити стан підшипників, якщо необхідно замінити і відрегулювати їх затягування
Великий знос шестірень	Замінити зношені шестірні і відрегулювати їх зачеплення

### **Підвищений шум мосту автомобіля на повороті**

Несправності диференціала	Розібрати диференціал та усунути несправність
---------------------------	---

### **Шум в колісному редукторі**

Неправильне зачеплення шестірень	Замінити шестірні або чашки водила
Застосування масла, непридатного для колісної передачі	Замінити мастило з промивкою картера редуктора
Недостатній рівень масла	Долити мастило в картер колісної передачі

### **Теча мастила через ущільнення**

Знос або пошкодження сальників	Замінити сальники
--------------------------------	-------------------



## 2 Розрахунки заднього мосту автомобіля МАЗ-5551

### 2.1 Підбір матеріалу для основних деталей

Ведуча конічна вал-шестірня виготовлюється зі сталі 20ХГНМ.

Ведена конічна шестірня виготовлюється зі сталі 15ХГН2ТА.

### 2.2 Визначення числа зубів шестірні головної передачі

У випадку застосування непланетарного редуктора:

$$U_{\text{нп}} = Z_{\text{к}}/Z_{\text{ц}} \quad (2.1)$$

$$U_0 = U_0' U_{\text{нп}} = \frac{Z_2}{Z_1} \frac{Z_{\text{к}}}{Z_{\text{ц}}}$$

де  $Z_{\text{к}}$  – число зубів коронної шестерні;

$Z_{\text{ц}}$  – число зубів сонячної шестерні,  $Z_{\text{ц}} = 22$ ;

$Z_1, Z_2$  – число зубів шестерні, колеса,  $Z_1 = 12$ ;  $Z_2 = 32$ ;

$U_0'$  – передавальне число конічної пари шестірень,  $U_0' = 2,6$ ;

$U_{\text{нп}}$  – передавальне число непланетарної передачі,  $U_{\text{нп}} = 2,596$ ;

$$Z_{\text{к}} = Z_{\text{ц}} U_{\text{нп}}$$

$$Z_{\text{к}} = 22 \cdot 2,596 = 57$$

$$U_0 = 2,6 \cdot 2,596 = 6,75$$

### 2.3 Розрахунковий момент

Розрахунковий момент на валу головної передачі  $M_p$  (Н·м):

– за двигуном:

$$M_p^D = M_{e \max} U_{K1} U_D^H \quad (2.2)$$

– за зчепленням:

$$M_p^\varphi = G_{\text{СЦ}} \varphi_{\max} r_K / U_0 \quad (2.3)$$

де  $M_{e \max}$  – крутний момент двигуна максимальний,  $M_{e \max} = 696,20$  Н·м;

$U_{K1}$  – передавальне число КПП на найнижчій передачі,  $U_{K1} = 7,98$

$U_D^H$  – передавальне число роздавальної коробки на найнижчій передачі,  $U_D^H = 1,56$ ;

$G_{\text{СЦ}}$  – зчїпна вага авто, що приходитьсья на мїст,  $G_{\text{СЦ}} = 98623,2$  Н;

$\varphi_{\max}$  – коефіцієнт зчеплення шини з дорогою максимальний;

$r_K$  – радіус кочення колеса,  $r_K = 0,507$ ;

– за двигуном:

$$M_p^D = 696,20 \cdot 7,98 \cdot 1,56 = 8666,85 \text{ (Н·м)}$$

– за зчепленням:

$$M_p^\varphi = 98623,2 \cdot 0,8 \cdot \frac{0,507}{6,75} = 5926,16 \text{ (Н·м)}$$

Розрахунки мїцності (за максимальним динамїчним моментом)  $M_{j \max}$  :

$$M_{j \max} = K_{jM} M_{e \max} U_{K1} U_D^H \quad (2.4)$$

де  $K_{jM}$  – коефіцієнт динамічного навантаження максимальний,  $K_{jM} = 1,6-3,2$ .

$$M_{j \max} = 2,5 \cdot 696,20 \cdot 7,98 \cdot 1,56 = 21667,14 \text{ (Н} \cdot \text{м)}$$

## 2.4 Вихідні дані для розрахунків

Конусна відстань зовнішня  $R_e$ , мм:

$$R_e \approx 10 \sqrt[3]{M_{e \max} U_0} \quad (2.5)$$

$$R_e \approx 10 \sqrt[3]{696,20 \cdot 6,75} = 167,5$$

Коловий модуль зовнішній, мм:

$$m_{te} = 2 R_e / \sqrt{Z_1^2 + Z_2^2} \quad (2.6)$$

$$m_{te} = 2 \cdot 167,5 / \sqrt{12^2 + 32^2} = 9,8 \text{ мм}$$

Ширина вінця зубчастого, мм:

$$b = 0,3 R_e \quad (2.7)$$

$$b = 0,3 \cdot 167,5 = 50,25 \text{ мм}$$

Приймаємо  $e = 55$  мм відповідно до ДЕСТ 12289-76.

Конусна відстань (середня), мм:

$$R_m = R_e - 0,5e \quad (2.8)$$

$$R_m = 167,5 - 0,5 \cdot 55,0 = 140,0 \text{ мм}$$

Кут нахилу лінії зуба (середній), градуси:

$$\beta_m = 25 + 5\sqrt{U_0} \quad (2.9)$$

$$\beta_m = 25 + 5\sqrt{6,75} = 38$$

Нормальний модуль (середній), мм:

$$m_n = m_{te} (R_m / R_e) \cos \beta_m \quad (2.10)$$

$$m_n = 9,8 \cdot (140,0/167,5) \cos 38 = 6,45 \text{ мм}$$

Параметрами вихідного контуру:

$$\alpha = 20; h_a^* = 1; \rho_f^* = 0,25; c^* = 0,25$$

$$x_2 = -x_1$$

$$x_{r2} = -x_{r1}$$

$$\sum = 90^\circ \quad \operatorname{tg} \delta_1 = \frac{Z_1}{Z_2} \quad \delta_2 = 90^\circ - \delta_1 \quad (2.11)$$

$$\operatorname{tg} \delta_1 = \frac{12}{32} = 0,375 \quad \delta_1 = 21^\circ \quad \delta_2 = 90^\circ - 21^\circ = 69^\circ$$

Середні початкові діаметри:

$$d_{w1} = d_1 = m_n \frac{Z_1}{\cos \beta_m} \quad (2.12)$$

$$d_{w2} = d_2 = m_n \frac{Z_2}{\cos \beta_m} \quad (2.13)$$

$$d_{w1} = d_1 = 6,45 \cdot \frac{12}{\cos 38^\circ} = 98,22 \text{ мм}$$

$$d_{w2} = d_2 = 6,45 \cdot \frac{32}{\cos 38^\circ} = 262 \text{ мм}$$

Відносна ширина контакту шестерні:

$$\varphi_{ed} = \frac{e}{d_{w1}} \quad (2.15)$$

$$\varphi_{ed} = \frac{55,0}{98,22} = 0,56$$

Число зубів еквівалентної шестерні (колеса):

$$Z_{v1} = \frac{Z_1}{(\cos \delta_1 \cos^3 \beta_m)} \quad (2.16)$$

$$Z_{v2} = \frac{Z_2}{(\cos \delta_2 \cos^3 \beta_m)} \quad (2.17)$$

$$Z_{v1} = \frac{12}{(\cos 21 \cdot \cos^3 38)} = 26,27$$

$$Z_{v1} = \frac{32}{(\cos 69 \cdot \cos^3 38)} = 182,5$$

Коефіцієнт осьового перекриття:

$$E_\beta = \epsilon \sin \beta_m / (\pi n_n) \quad (2.18)$$

$$E_\beta = 55,0 \cdot \sin 38 / (3,14 \cdot 6,56) = 1,64$$

Інші геометричні параметри шестерні й колеса конічної передачі розраховують за ДЕСТ 19326-73.

## 2.5 Контактна втома

### 2.5.1 Контактні напруження зубчастої пари:

$$\sigma_H = \sqrt{\frac{M_p k_H (1 + U_0^2)^{3/2}}{2 \cdot 0,85 R_e^3 (1 - 0,5 \psi_{R_e}) U_0 \psi_{R_e}}} \leq [\sigma_H] \quad (2.19)$$

де  $z_m$  – коефіцієнт, який враховує механічні властивості матеріалів колеса та шестерні;

$\mu$  – коефіцієнт Пуассона,  $\mu = 0,3$ ;

$k_H$  – коефіцієнт завантаження;

$\psi_{R_e} = \frac{\rho}{R_e}$  коефіцієнт,  $\psi_{R_e} = 0,25 \dots 0,33$ ;

$$\psi_{R_e} = \frac{50,25}{167,5} = 0,3$$

Коефіцієнт навантажень  $k_H$ :

$$k_H = k_{H\alpha} k_{H\beta} k_{Hv}$$

де  $k_{H\alpha}, k_{H\beta}, k_{Hv}$  – коефіцієнти, які враховують: розподіл навантаження між зубцями, нерівномірність розподілу навантажень за довжиною лінії контакту, динамічні навантаження, виникаючі у зачепленні.

$$k_{H\alpha} = 1,33, \quad k_{H\beta} = 1,05, \quad k_{Hv} = 1,15$$

$$k_H = 1,33 \cdot 1,05 \cdot 1,15 = 1,6$$

$$\sigma_H = \sqrt{\frac{5926,16 \cdot 1,6(1 + 6,75^2)^{3/2}}{2 \cdot 0,85 \cdot 167,5^3 (1 - 0,5 \cdot 0,3) \cdot 6,75 \cdot 0,3}} = 0,468 \leq [\sigma_H]$$

### 2.5.2 Момент на валу шестерні, Нм:

$$M_P = \sqrt{M_I^{m_r} \left(\frac{N_I}{N_0}\right) + M_{II}^{m_r} \left(\frac{N_{II}}{N_0}\right) + M_{III}^{m_r} \left(\frac{N_{III}}{N_0}\right) + \dots} \quad (2.20)$$

де  $M_I, M_{II}, M_{III} \dots$  – крутний момент на карданному валу при включенні I, II, III передач при максимальній потужності двигуна;

$$M_i = M_{e \max} \cdot U_d \cdot U_k^i \cdot \eta;$$

$m_r$  – показник ступеня кривої контактної витривалості, для сталевих коліс приймають

$$m_r = 6,0;$$

$N_I, N_{II}, N_{III}$  – число циклів при роботі автомобіля на кожній передачі,

$$N_i = 60T_S n_p k_{III};$$

$T_S$  – час роботи на відповідній передачі, год.:

$$T_S = S_0 / V_{CPi} \gamma;$$

$S_0$  – нормативний пробіг автомобіля до капітального ремонту, км;

$V_{CPi}$  – середня швидкість на  $i$ -й передачі, км/год.;

$$V_{CPi} = V_{CP} / U_i;$$

$V_{CP}$  – середня швидкість автомобіля на прямій передачі, км/год.:

$$V_{CP} = 60 \text{ км};$$

$U_i$  – передавальне число трансмісії до головної передачі на  $i$ -ї передачі;

$\gamma$  – відносний час роботи автомобіля на передачі;

$n_p$  – розрахункова чистота обертання, рівна половині частоти обертання при максимальній потужності двигуна,  $\text{хв}^{-1}$ ;

$k_{III}$  – коефіцієнт пробігу, який характеризує відношення довговічності деталі при розрахунковому моменті й дійсному навантажувальному режимі

$$k_{\text{ПН}} = 4;$$

$N_0$  – базове число циклів, для зубчастих коліс із твердістю  $H > \text{HRC } 56$

$$N_0 = 12 \cdot 10^7$$

Отримані дані зведемо у табл. 2.1.

Таблиця 2.1

Номер передачі	$U_{\delta}^e = 1,30$				$U_{\delta}^n = 1,56$				$\gamma$
	$M_i,$ Нм	$V_{\text{срі}},$ км/год.	$T_s,$ год.	$N_i$	$M_i,$ Нм	$V_{\text{срі}},$ км/год.	$T_s,$ год.	$N_i$	
I	5778	4,21	1425,18	2821856	6934	3,51	1709,4	3384612	0,03
II	2889	8,41	2853,75	5650425	3467	7,01	3423,68	6778886	0,12
III	1448	16,81	3569,3	7067214	1738	14,01	4282,66	8479667	0,30
IV	724	33,60	2381	4714380	869	28,00	2857,14	565714	0,40
V	579	42,00	714,29	1414294	695	35,00	857,14	1697137	0,15

При  $U_{\delta}^e = 1,30$

$$M_p = \sqrt[6]{5778^6 \left( \frac{2821856}{12 \cdot 10^7} \right) + 2889^6 \left( \frac{5650425}{12 \cdot 10^7} \right) + 1448^6 \left( \frac{7067214}{12 \cdot 10^7} \right) + 724^6 \left( \frac{4714380}{12 \cdot 10^7} \right) + 579^6 \left( \frac{1697137}{12 \cdot 10^7} \right)} = 2895 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

При  $U_{\delta}^n = 1,56$

$$M_p = \sqrt[6]{6934^6 \left( \frac{3384612}{12 \cdot 10^7} \right) + 3467^6 \left( \frac{6778886}{12 \cdot 10^7} \right) + 1738^6 \left( \frac{8479667}{12 \cdot 10^7} \right) + 869^6 \left( \frac{565714}{12 \cdot 10^7} \right) + 695^6 \left( \frac{1697137}{12 \cdot 10^7} \right)} = 3647 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (2.20a)$$

### 2.5.3 Допустиме напруження за тривалої межі контактної витривалості:

$$[\sigma_H] = (\sigma_{H0} / S_M) z_R z_V k_{\alpha n}, \quad (2.21)$$

де  $\sigma_{H0}$  – межа контактної витривалості,  $\sigma_{H0} = 23 \cdot H_{HRC}$ ;

– твердість зубів HRC=55-63;

$S_M$  – коефіцієнт безпеки (для коліс з поверхневим зміцненням  $S_M = 1,2$ );

$z_R, z_V, k_{\alpha n}$  – коефіцієнти, які враховують вплив параметрів шершавості, швидкості та розмірів ( $z_R z_V k_{\alpha n} = 1$ ),

$$[\sigma_i] = (23 \cdot 60 / 1,2) \cdot 1 = 1150 \text{ МПа.}$$

## 2.6 Розрахунок зубів на втому при вигині

Розрахункове напруження згинання, МПа:

$$\sigma_F = \frac{F_t}{m_n b} k_F Y_F Y_\beta \leq [\sigma]_F, \quad (2.22)$$

де  $F_t$  – колова сила розрахункова, Н;

$$F_t = 2M_p / d_{w1}; \quad (2.22a)$$

$k_F$  – коефіцієнт навантажень ( $k_F = k_H = 0,1$ );

$Y_F$  – коефіцієнт напружень згинання;  $Y_F = Y_F^0 k_n k_a k_\rho k_\tau$ ;

$Y_F^0$  – коефіцієнт, залежний від еквівалентного числа зубів  $Z_V$ ;  $Y_F^0 = 2,1$ ;

$k_n, k_\alpha, k_\rho, k_\tau$  – коефіцієнти, які враховують параметри парних зубчастих коліс, кут профілю, радіус кривизни перехідній кривій профілю зуба.

Для конічної передачі:

$$k_n = k_\alpha = k_\rho = k_\tau = 1.$$

$$\sigma_F = \frac{2 \cdot 3271 \cdot 10^3}{6,45 \cdot 55 \cdot 98,22} \cdot 1 \cdot 2,1 = 394 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (2.226)$$

Допустиме напруження, МПа:

$$[\sigma]_F = \sigma_0 / S_F, \quad (2.23)$$

де  $\sigma_0$  – границя витривалості за вигином ( $\sigma_0 = 820 \dots 920$  МПа);

$S_F$  – коефіцієнт безпеки,  $S_F = 1,55$ .

$$[\sigma]_F = 850 / 1,55 = 548 \text{ МПа.}$$

## 2.7 Розрахунки міцності зубчастих коліс

Коефіцієнт динамічного навантаження (максимального):

$$k_{jM} = M_{jM} / M_p, \quad (2.24)$$

де  $M_{jM}$  – динамічний момент (максимальний);

$M_p$  – розрахунковий момент;  $M_p = 5926,16 \text{ Н} \cdot \text{м}$ .

$$k_{jM} = 21667,14 / 5926,16 = 3,66.$$

Приймаємо  $k_{jM} = 3,0$ .

Максимальна контактне напруження на активних поверхнях зубів, МПа:

$$\sigma_{H\max} = 275 \sqrt{k_{jM} \cdot \sigma_H}, \quad (2.25)$$

$$\sigma_{H\max} = 275 \sqrt{3,0 \cdot 468} = 10267 \text{ МПа.}$$

Максимальне напруження згинання, МПа:

$$\sigma_{F\max} = k_{jM} \cdot \sigma_F, \quad (2.26)$$

$$\sigma_{F\max} = 3,0 \cdot 394 = 1182 \text{ МПа.}$$

Умова остаточної контактної міцності поверхні зубів (активної):

$$\sigma_{H\max} = 0,95 \cdot \sigma_{H\lim M}, \quad (2.27)$$

де  $\sigma_{H\lim M}$  – граничне контактне напруження, при якому можливе пошкодження поверхні зуба (активної) від динамічних навантажень.

## 2.8 Розрахунки ведучого вала головної передачі на статичну міцність

Попередній діаметр ведучого вала в небезпечному перерізі, мм:

$$d = 0,8 \dots 1,2 \cdot \sqrt{M_{e\max} \cdot U_I}, \quad (2.28)$$

$$d = 1,0 \cdot \sqrt{696,20 \cdot 7,98 \cdot 1,56} = 93 \text{ мм.}$$

Зусилля в конічній передачі, Н:

– колове:

$$F_t = M_{j \max} / r_K \text{ Н}; \quad (2.29)$$

– радіальне:

$$F_r = F_t \operatorname{tg} \alpha / \cos \beta_w; \quad (2.30)$$

– осьове:

$$F_a = F_t \operatorname{tg} \beta_w, \quad (2.31)$$

де  $\delta_1$  – половина кута при вершині початкового конуса шестерні.

$$F_t = 21667,14 / 0,507 = 42736 \text{ Н},$$

$$F_r = 42736 \operatorname{tg} 20^\circ / \cos 25^\circ = 17163 \text{ Н},$$

$$F_a = 42736 \operatorname{tg} 25^\circ = 19928 \text{ Н}.$$

Радіальна сила, перпендикулярна осі шестерні, Н;

$$F_{r1} = (F_t / \cos \beta_w) (\operatorname{tg} \alpha \cos \delta_1 \mp \sin \beta_w \sin \delta_1), \quad (2.32)$$

$$F_{r1} = (42736 / \cos 25^\circ) (\operatorname{tg} 20^\circ \cos 27^\circ + \sin 25^\circ \sin 27^\circ) = 25547 \text{ Н}.$$

Осьова сила, паралельна осі шестерні, Н;

$$F_{a1} = (F_t / \cos \beta_w) (\operatorname{tg} \alpha \sin \delta_1 \mp \sin \beta_w \cos \delta_1), \quad (2.33)$$

$$F_{a1} = (42736 / \cos 25^\circ) (\operatorname{tg} 20^\circ \sin 27^\circ + \sin 25^\circ \cos 27^\circ) = 25549 \text{ Н}.$$

Радіальна й осьова сили, які діють на ведене колесо, Н:

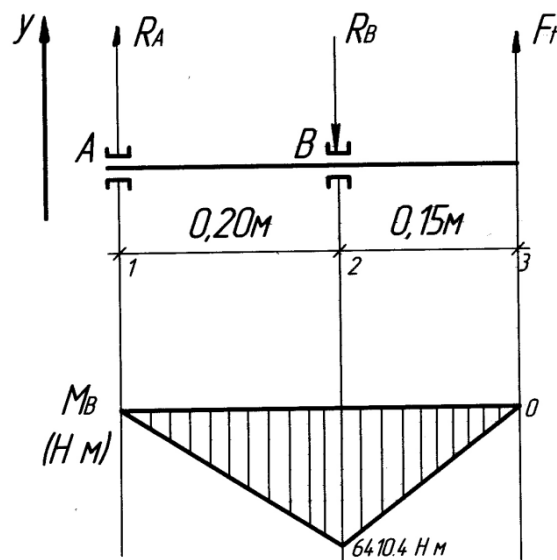
$$F_{a1} = F_{r2} = 25549\text{H}; F_{a2} = F_{r1} = 25547\text{H}.$$

Для визначення радіальних та осьових реакцій в опорах вала викреслюють в аксонометрії схеми валів із шестірнями й позначенням сил  $F_t, F_r, F_a$ , координати точок їх прикладення, а також вертикальні, горизонтальні й сумарні реакції.

*Розрахунки ведучого вала головної передачі*

Вертикальна площина (рис. 2.2):

$$\begin{aligned} \sum M_A = 0: \quad -R_B \cdot 0,2 + F_t \cdot 0,35 &= 0 \\ R_B &= \frac{0,35}{0,2} F_t = \frac{0,35}{0,2} 42736 = 74788 \text{ Н}, \end{aligned}$$



**Рисунок 2.2 – Діючі сили й епюра згинальних моментів від сил, діючих у вертикальній площині**

$$\sum M_B = 0: -R_A \cdot 0,2 + F_t \cdot 0,15 = 0$$

$$R_A = \frac{0,15}{0,2} F_t = \frac{0,15}{0,2} 42736 = 32052 \text{ Н},$$

Перевірка:

$$R_A - R_B + F_t = 0$$

$$32052 - 74788 + 42736 = 0. \quad (\text{вірно})$$

Будуємо епюру згинальних моментів від сил, діючих у вертикальній площині:

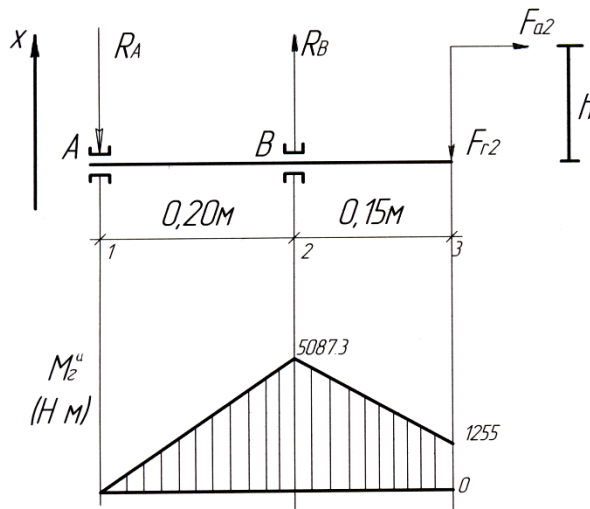
$$M_{1B}^H = 0$$

$$M_{3B}^H = 0$$

$$M_{\rightarrow 2B}^H = R_A \cdot 0,20 = 32052 \cdot 0,20 = 6410,4 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

$$M_{\leftarrow 2B}^H = F_t \cdot 0,15 = 42736 \cdot 0,15 = 6410,4 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Горизонтальна площина (рис. 2.3):



**Рисунок 2.3 – Діючі сили й епюра згинальних моментів від сил, діючих у горизонтальній площині**

$$h = \frac{d_{w1}}{2} = \frac{98,25}{2} = 0,049125 \text{ м}$$

$$\sum M_A = 0: R_B \cdot 0,2 - F_{r2} \cdot 0,35 - F_{a2} \cdot 0,049125 = 0$$

$$R_B = \frac{F_{r2} \cdot 0,35 + F_{a2} \cdot 0,049125}{0,2} = 50985,7 \text{ Н},$$

$$\sum M_B = 0: R_A \cdot 0,2 - F_{r2} \cdot 0,15 - F_{a2} \cdot 0,06432 = 0$$

$$R_A = \frac{F_{r2} \cdot 0,15 + F_{a2} \cdot 0,049125}{0,2} = 25436,7 \text{ Н},$$

Перевірка:

$$-R_A + R_B - F_{r2} = 0$$

$$-25436,7 + 50985,7 - 25549 = 0. \quad (\text{вірно})$$

Будуємо епюру згинальних моментів від сил, діючих у горизонтальній площині:

$$M_{\Gamma}^n = 0$$

$$M_{\leftarrow 3\Gamma}^n = F_{a2} \cdot 0,049125 = 1255 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

$$M_{\rightarrow 2\Gamma}^n = R_A \cdot 0,20 = 25436,7 \cdot 0,20 = 5087,3 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

$$M_{\leftarrow 2\Gamma}^n = M_{\leftarrow 3\Gamma}^n + F_{r2} \cdot 0,15 = 5087,35 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Згинальний момент у небезпечному перерізі вала, Н·мм:

$$M_{\text{н}} = \sqrt{M_B^2 + M_{\Gamma}^2}, \quad (2.34)$$

де  $M_B, M_{\Gamma}$  – згинальні моменти відповідно у вертикальних і горизонтальних площинах, Н·мм;

$$M_{\text{н}} = \sqrt{6410400^2 + 5087350^2} = 8183786 \text{ Н} \cdot \text{мм}.$$

Крутний момент:

$$M_{\text{кр}} = F_i \cdot h , \quad (2.35)$$

$$M_{\text{кр}} = 42736 \cdot 0,049125 = 2099,41 \text{ Нм.}$$

Діаметр ведучого вала, мм:

$$d_1 = \sqrt[3]{M_{\text{кр}} / 0,1 \cdot [\sigma]_H} , \quad (2.36)$$

де  $\sigma_i$  – допустиме напруження вигину  $\sigma_i = \frac{\sigma_{-1}}{[n] \cdot k_\sigma}$ ;

$n$  – необхідний коефіцієнт запасу міцності,  $[n]=2,0$ ;

$k_\sigma$  – коефіцієнт концентрації напружень,  $k_\sigma = 2,0$ ;

$\sigma_{-1}$  – границя витривалості матеріалу,  $\sigma_{-1} = 500 \text{ МПа}$ ;

$$\sigma_H = \frac{500}{2,0 \cdot 2,0} = 125 \text{ МПа} ,$$

$$d_1 = \sqrt[3]{2099410 / 0,1 \cdot 125} = 55 \text{ мм} ,$$

Остаточню приймаємо діаметр ведучого вала головної передачі за ДЕСТ 6636-69, рівним 55 мм.

Напруження крутіння, МПа:

$$\tau = \frac{M_{\text{emax}}}{W_K} , \quad (2.37)$$

де  $W_K$  – момент опору при крутінні,  $\text{мм}^3$ ;

$$W_K = 0,2 \cdot d^3;$$

$$\tau = \frac{696200}{0,2 \cdot 55^3} = 20,92 \text{ МПа}$$

Коефіцієнт запасу міцності по границі текучості:

– за напруженнями вигину:

$$n_{\sigma T} = K_{\varepsilon T} \cdot \sigma_T / \sigma,$$

де  $K_{\varepsilon T}$  – коефіцієнт, який залежить від абсолютних розмірів;

$$K_{\varepsilon T} = 0,78 [5-7];$$

$$n_{\sigma T} = 0,78 \cdot 950 / 125 = 5,9$$

– за напруженнями крутіння:

$$n_{\tau T} = K_{\varepsilon T} \cdot \tau_T / \tau$$

$$n_{\tau T} = 0,78 \cdot 660 / 20,92 = 24,6$$

Коефіцієнт запасу міцності по межі міцності:

– за напруженнями вигину:

$$n_{\sigma \hat{A}} = K_{\varepsilon \hat{A}} \cdot \sigma_{\hat{A}} / \sigma,$$

де  $K_{\varepsilon \hat{A}}$  – коефіцієнт, який залежить від абсолютних розмірів;

$$K_{\varepsilon \hat{A}} = 0,92 [5-7];$$

$$n_{\sigma T} = 0,92 \cdot 1150 / 125 = 8,5 \quad (2.37a)$$

– за напруженнями крутіння:

$$n_{\tau} = K_{\varepsilon T} \cdot \tau_T / \tau$$

$$n_{\tau T} = 0,92 \cdot 115 / 20,92 = 5,06$$

Загальний коефіцієнт запасу міцності:

– за границею текучості:

$$n_T = n_{\sigma T} \cdot n_{\tau T} / \sqrt{n_{\sigma T}^2 + n_{\tau T}^2}, \quad (2.38)$$

$$n_T = 5,9 \cdot 24,6 / \sqrt{5,9^2 + 24,6^2} = 5,7,$$

– за межею міцності:

$$n_B = n_{\sigma B} \cdot n_{\tau B} / \sqrt{n_{\sigma B}^2 + n_{\tau B}^2}, \quad (2.39)$$

$$n_B = 8,5 \cdot 5,06 / \sqrt{8,5^2 + 5,06^2} = 4,3.$$

Умови достатньої міцності вала:

$$n_T \geq 1,2 \dots 1,5, \text{ у нашому випадку } n_T = 5,7, \quad (2.40)$$

$$n_B \geq 1,5 \dots 1,8, \text{ у нашому випадку } n_T = 4,3,$$

тобто. задовольняють умовам достатньої міцності.

## 2.9 Вибір підшипників

Необхідна динамічна вантажопідйомність підшипника, Н:

$$C = P_3 \cdot L^{\frac{1}{P}}, \quad (2.41)$$

де  $P_3$  – еквівалентна динамічна вантажопідйомність підшипника, Н;

$L$  – фактичне число циклів навантаження підшипника;

$P$  – степеневий показник (для шарикових підшипників  $P = 3$ , для роликових  $P = 3,3$ ).

Еквівалентне динамічне навантаження на підшипник з урахуванням долі роботи головної передачі на всіх передачах у коробці передач:

$$P_3 = \sqrt[p]{\frac{\sum_1^n P_i^p N_i'}{\sum_1^n N_i}}, \quad (2.42)$$

де  $\sum_1^n P_i$  – сумарне еквівалентне динамічне навантаження на  $i$ -х передачах;

$$P_i = (xvF_r + yF_a)k_\delta k_T ;$$

$x, y$  – коефіцієнти радіального й осьового навантажень;

$$x=0,75; y=0,8;$$

$v$  – коефіцієнт обертання; при обертанні внутрішнього кільця  $v=1,0$ , зовнішнього –  $v=1,2$ ;

$k_\delta$  – коефіцієнт безпеки, який враховує вплив динамічних навантажень, приймають

$$k_\delta = 1,3 \dots 1,5;$$

$\sum_i^n N_i'$  – еквівалентне число циклів навантаження підшипника на  $i$ -х передачах;

$k_\delta$  – температурний коефіцієнт,  $k_\delta = 1,0$  [5-7];

$$P = (0,75 \cdot 1,0 \cdot 118867,44 + 0,8 \cdot 41368)1,3 \cdot 1,0 = 158918,47 \text{ Н},$$

Еквівалентне число циклів навантаження підшипника:

$$N_i = \frac{60L_h\gamma_i k_{\text{пн}}}{10^6}; \quad (2.43)$$

де  $L_h$  – довговічність підшипника, год.;  $L_h = S/V_{\text{ср.а}}$ ;

$S$  – міжремонтний пробіг автомобіля, км;

$V_{\text{ср.а}}$  – середня швидкість автомобіля, км/год.;  $V_{\text{ср.а}} = 0,6V_{\text{а max}}$ ;

$\gamma_i$  – відносний час роботи автомобіля на  $i$ -й передачі;

$$N_1 = \frac{60 \cdot 6061 \cdot 0,005 \cdot 0,1}{10^6} = 0,00018,$$

$$N_2 = \frac{60 \cdot 6061 \cdot 0,01 \cdot 0,1}{10^6} = 0,00036,$$

$$N_3 = \frac{60 \cdot 6061 \cdot 0,03 \cdot 0,1}{10^6} = 0,00109,$$

$$N_4 = \frac{60 \cdot 6061 \cdot 0,055 \cdot 0,1}{10^6} = 0,00200,$$

$$N_5 = \frac{60 \cdot 6061 \cdot 0,1 \cdot 0,1}{10^6} = 0,00364,$$

$$N_6 = \frac{60 \cdot 6061 \cdot 0,15 \cdot 0,1}{10^6} = 0,00545,$$

$$N_7 = \frac{60 \cdot 6061 \cdot 0,45 \cdot 0,1}{10^6} = 0,01636,$$

$$N_8 = \frac{60 \cdot 6061 \cdot 0,20 \cdot 0,1}{10^6} = 0,00727,$$

$$P_{\dot{\gamma}} = \sqrt[3,3]{\frac{158918,47^{3,3} \cdot 0,03635}{0,03635}} = 158918,47 \text{ Н}.$$

Фактичне число циклів навантаження:

$$L_i = \frac{60L_n\gamma_i n_i}{10^6}; \quad (2.44)$$

де  $n_i$  – частота обертання кільця підшипника на  $i$ –передачі;

$$n_i = n_M / U_i;$$

$n_M$  – частота обертання первинного вала, відповідна до середньої швидкості руху,  $\text{хв}^{-1}$ ;

$$n_M = \frac{1}{0,377};$$

$U_i$  – передавальне число трансмісії від первинного вала до розглянутого вала.

$$L_1 = \frac{60 \cdot 6061 \cdot 0,005 \cdot 287}{10^6} = 0,522,$$

$$L_2 = \frac{60 \cdot 6061 \cdot 0,01 \cdot 287}{10^6} = 1,044,$$

$$L_3 = \frac{60 \cdot 6061 \cdot 0,03 \cdot 287}{10^6} = 3,131,$$

$$L_4 = \frac{60 \cdot 6061 \cdot 0,055 \cdot 287}{10^6} = 5,740,$$

$$L_5 = \frac{60 \cdot 6061 \cdot 0,1 \cdot 287}{10^6} = 10,437,$$

$$L_6 = \frac{60 \cdot 6061 \cdot 0,15 \cdot 287}{10^6} = 15,655,$$

$$L_7 = \frac{60 \cdot 6061 \cdot 0,45 \cdot 287}{10^6} = 46,966,$$

$$L_8 = \frac{60 \cdot 6061 \cdot 0,20 \cdot 287}{10^6} = 20,874,$$

$$\Sigma L_i = 104,4,$$

$$C = 158918,47 \cdot 104,4^{\frac{1}{3,3}} = 746916,8 \text{ Н.}$$

Фактичне число циклів навантаження підшипника за весь термін служби:

$$N = \Sigma N_i,$$

$$N = 0,03635.$$

Визначивши по формулі (2.45) необхідну динамічну вантажопідйомність, по каталогу підбираємо підшипник. У головних передачах автомобілів, як правило, застосовують роликові підшипники.

Для підшипникового вузла, що складається з двох однакових підшипників, динамічну вантажопідйомність розраховують по формулах:

– для кулькових  $C = 1,62C_1$ ;

– для роликових  $C = 1,72C_1$

( $C_1$  – динамічна вантажопідйомність одного підшипника).

$$C = 1,72 \cdot 746916,8 = 1284697.$$

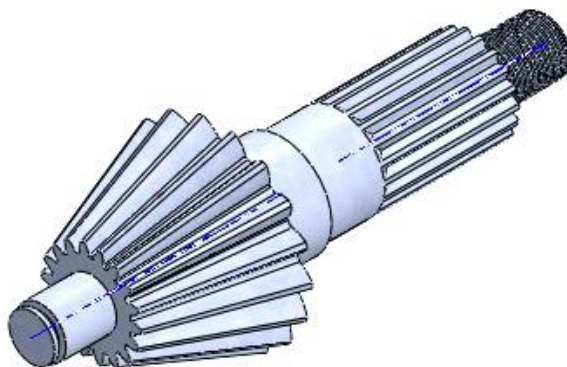
Виберемо для ведучого вала головної передачі роликовий підшипник типу 7218НМ за ДЕСТ 831-75,

Для веденого вала головної передачі шариковий радіально-упорний підшипник типу 36216К6 за ДЕСТ 831-75.

### **3 Комп'ютерне моделювання напружено-деформованого стану вал-шестерні головної передачі заднього мосту автомобіля МАЗ-5551**

Упровадження в навчальний процес інформаційно-комунікаційних технологій (ІКТ) дозволяє перейти від традиційних методів навчання проектуванню до моделювання за сприянням САД-систем з наступним вживанням САЕ/САД автоматизованих комплексів, один з яких – 3D система гібридного проектування, інженерного аналізу й підготовки виробництва робіт будь-якої складності й призначення SolidWorks. Вона – ядро інтегрованого комплексу автоматизації виробництва. За допомогою нього здійснюють підтримку життєвого циклу витвору у відповідності з концепцією CALS-технологій, включаючи двонаправлений обмін даними з іншими Windows-додатками та створення інтерактивної документації [8]. Додаток цієї програми – SolidWorks Simulation – використовує геометричну модель деталі SolidWorks для формування розрахункової моделі [9].

Мета роботи – дослідження вал-шестерні (рис. 3.1) головної передачі заднього мосту автомобіля МАЗ-5551 (сталь 20ХГНМ) з можливістю заміни даної сталі на дешевшу – сталь 20.



**Рисунок 3.1 – Модель вал-шестерні**

У додатку SolidWorks Simulation проведено аналізи моделі вал-шестерні для отримання картини її напружено-деформованого стану.

Процес дослідження починається зі створення геометричної моделі у SolidWorks (рис. 3.1). Наступний етап – вибір сталей 20ХГНМ (рис. 3.2 – DIN 1,6523) і 20 (рис. 3.3 – AISI-1020) з бібліотеки SolidWorks.

Свойства Таблицы и кривые Внешний вид Штриховка Настройка Данные программно

Свойства материала  
Материалы в библиотеке по умолчанию не могут редактироваться.  
Необходимо скопировать материал в настроенную пользователем библиотеку и затем его отредактировать.

Тип модели:   Сохранить тип в библиотеке

Единицы измерения:

Категория:

Имя:

Критерий разрушения по умолчанию:

Описание:

Источник:

Sustainability:

Свойство	Значение	Единицы измерения
Модуль упругости	2.050000031e+11	Н/м^2
Коэффициент Пуассона	0.29	Не применимо
Модуль сдвига	8e+10	Н/м^2
Массовая плотность	7850	кг/м^3
Предел прочности при растяжении	820000000	Н/м^2
Предел прочности при сжатии		Н/м^2
Предел текучести	590593984	Н/м^2
Коэффициент теплового расширения	1.1e-05	/К

**Рисунок 3.2 – Інформація про аналог сталі 20ХГНМ (початковий матеріал вал-шестерні)**

Свойства Таблицы и кривые Внешний вид Штриховка Настройка Данные программно

Свойства материала  
Материалы в библиотеке по умолчанию не могут редактироваться.  
Необходимо скопировать материал в настроенную пользователем библиотеку и затем его отредактировать.

Тип модели:   Сохранить тип в библиотеке

Единицы измерения:

Категория:

Имя:

Критерий разрушения по умолчанию:

Описание:

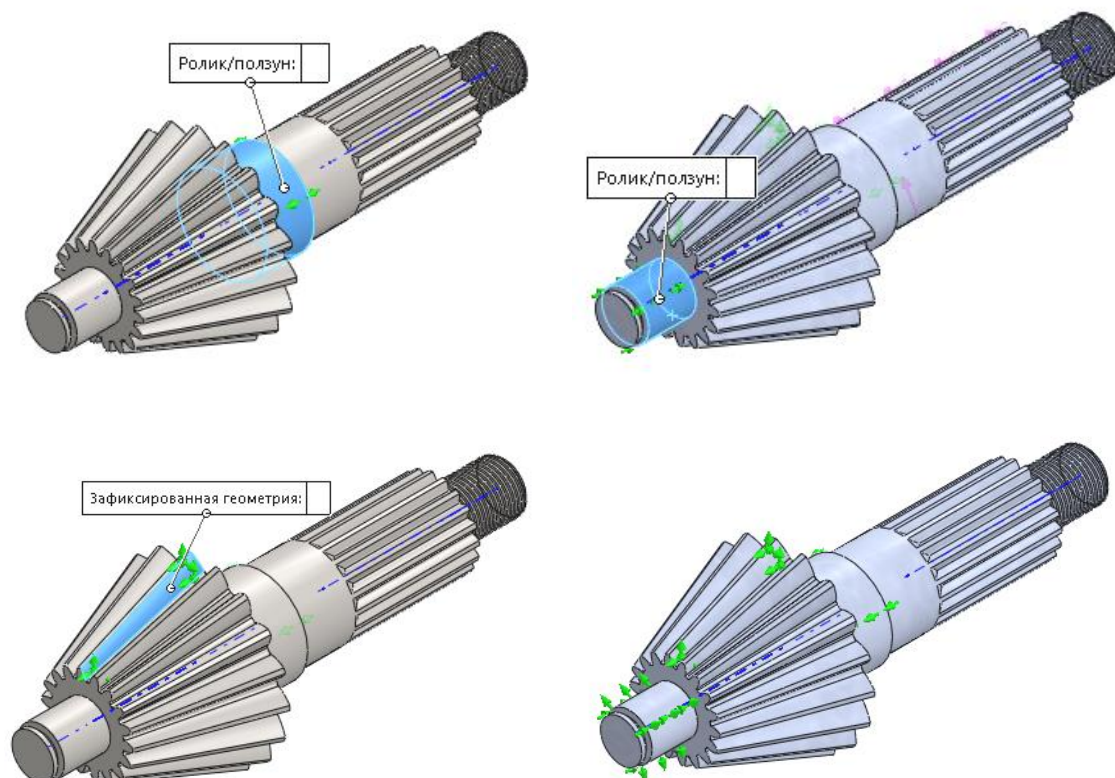
Источник:

Sustainability:

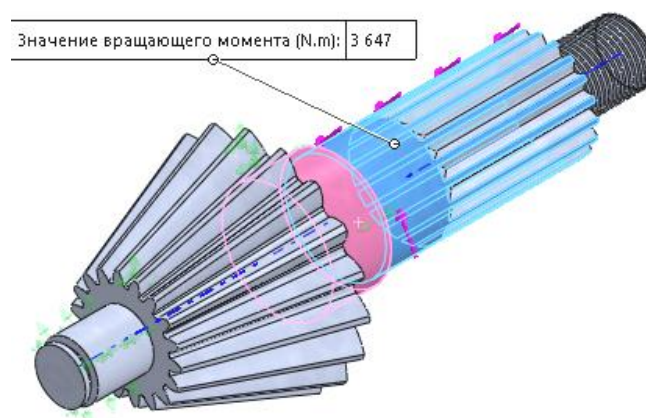
Свойство	Значение	Единицы измерения
Модуль упругости	2e+11	Н/м^2
Коэффициент Пуассона	0.29	Не применимо
Модуль сдвига	7.7e+10	Н/м^2
Массовая плотность	7900	кг/м^3
Предел прочности при растяжении	420507000	Н/м^2
Предел прочности при сжатии		Н/м^2
Предел текучести	351571000	Н/м^2
Коэффициент теплового расширения	1.5e-05	/К

**Рисунок 3.3 – Замінник початкового матеріалу вал-шестерні**

Для проведення статичного аналізу проведено закріплення моделі (рис. 3.4) та прикладено навантаження – крутний момент  $M=3647$  Нм (п. 2.6.2, ф. 2.20а – рис. 3.5).



**Рисунок 3.4 – Закріплення моделі вал-шестерні**

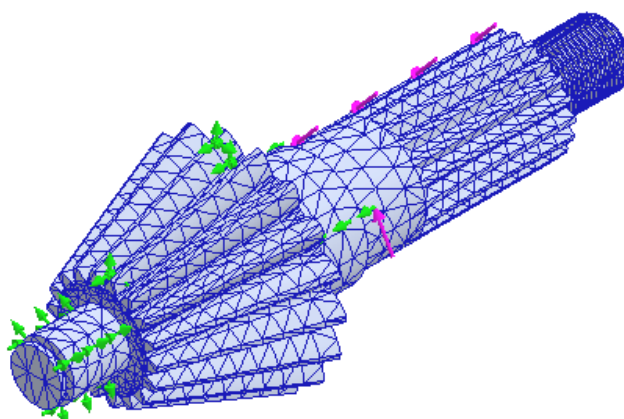


**Рисунок 3.5 – Прикладення навантаження до вал-шестерні**

Потім відбувається поділ моделі на елементи, з'єднані у вузлах: програма аналізу скінченних елементів розглядає модель як сітку. Метод скінченних елементів (МСЕ) прогнозує поведінку моделі за допомогою зіставлення інформації, одержаної від усіх елементів.

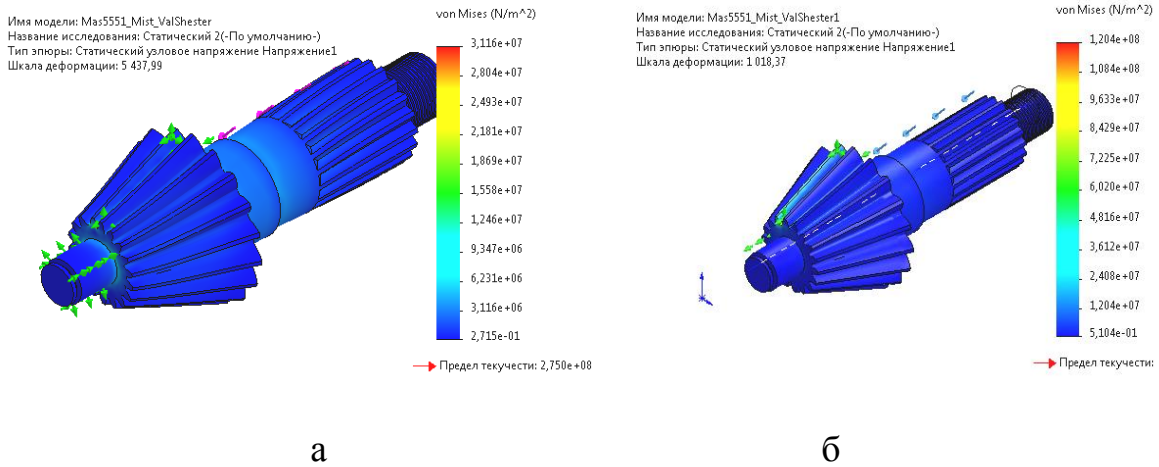
Створення сітки – важливий етап в аналізі моделі. Сітка створюється на основі глобального розміру елемента, допуску та характеристик локального управління нею. Вона задає різні розміри елемента для граней, компонентів, вершин і кромки. Програма визначає розмір елемента для моделі на основі її об'єму, площу поверхні та інші геометричні характеристики. Розмір створюваної сітки (кількість вузлів та елементів) залежить від допуску сітки, параметрів її управління та характеристик контакту, геометрії та розмірів моделі (рис. 3.6).

Сетка Детализация	
Имя исследования	Статический 2 (-По умол
Тип сетки	Сетка на твердом теле
Используемое разбиение	Стандартная сетка
Автоматическое уплотнение сетки	Выкл
Включить автоциклы сетки	Выкл
Точки Якобиана для сетки высокого качества	4 точек
Размер элемента	6,79149 mm
Допуск	0,339574 mm
Качество сетки	Высокая
Всего узлов	33468
Всего элементов	20654
Максимальное соотношение сторон	1 299
Процент элементов с соотношением сторон < 3	72,4
Процент элементов с соотношением сторон > 10	0,46
Процент искаженных элементов	0
Число искаженных элементов	0
Время для завершения сетки (hh:mm:ss)	00:00:39

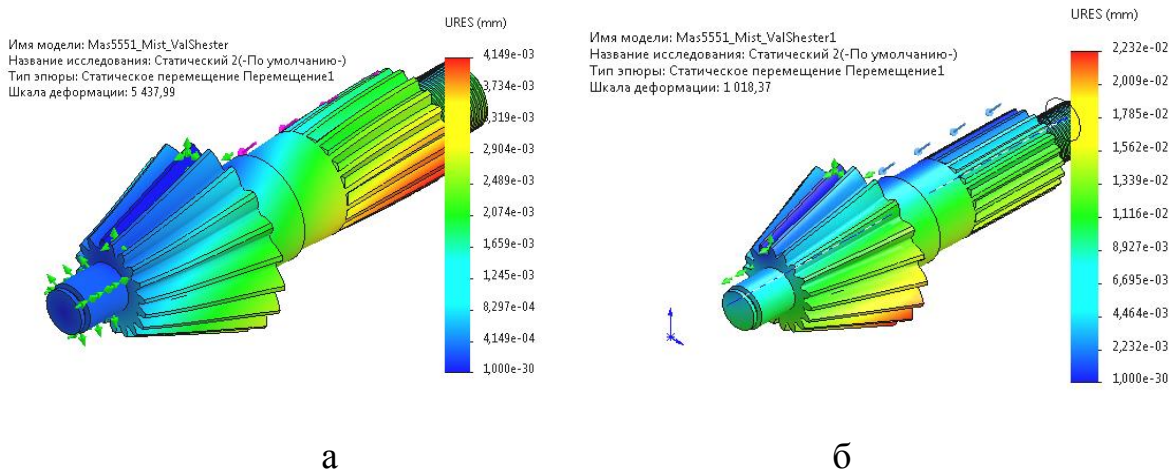


**Рисунок 3.6 – Параметри й скінченно-елементна сітка вал-шестерні**

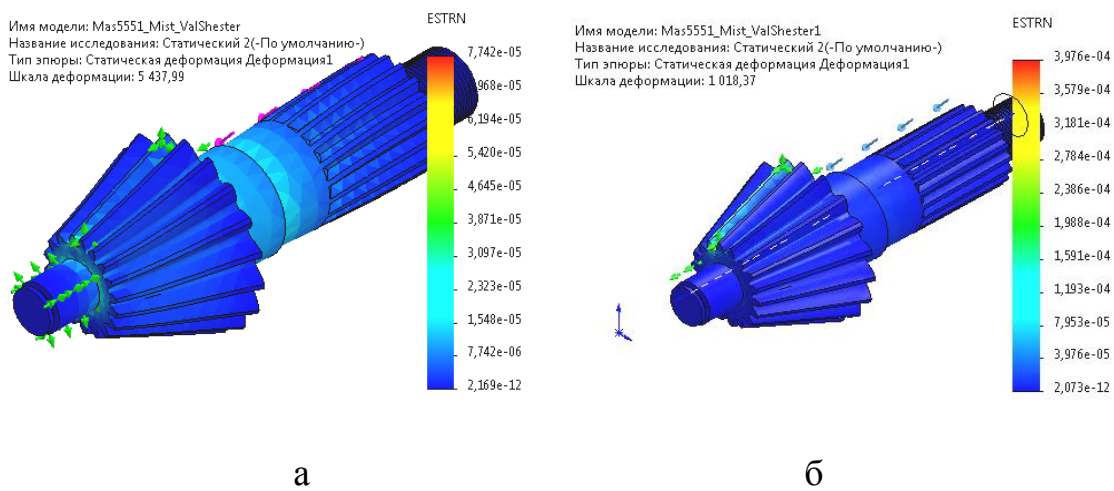
Результатом статичного аналізу є епюри напружень (рис. 3.7), переміщень (рис. 3.8), деформації (рис. 3.9) запасу міцності (рис. 3.10).



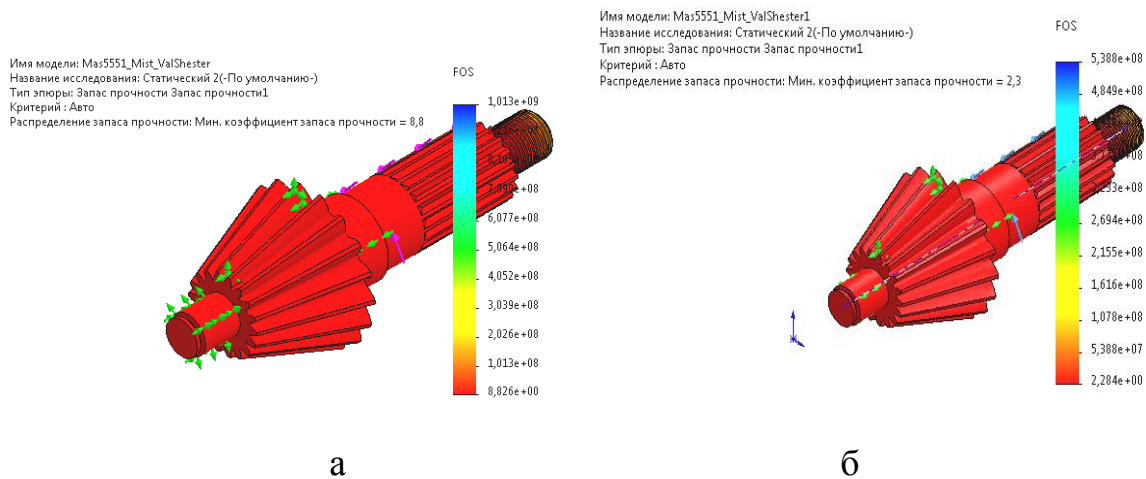
**Рисунок 3.7 – Напряжения: вал зі сталі 20XГНМ (а) та сталі 20 (б)**



**Рисунок 3.8 – Переміщення: вал зі сталі 20XГНМ (а) та сталі 20 (б)**



**Рисунок 3.9 – Деформації: вал зі сталі 20XГНМ (а) та сталі 20 (б)**



**Рисунок 3.10 – Епюри запасу міцності для вала зі сталі 20ХГНМ (а) та сталі 20 (б)**

Мінімальний коефіцієнт запасу міцності для вал-шестерні зі сталі 20ХГНМ становить 8,8, а зі сталі 20 – 2,3 (рис. 3.10). Таким чином, у випадку заміни сталі для виготовлення вал-шестерні запас міцності достатній (згідно п. 2.9.1 коефіцієнт запасу міцності становить 8,5 – ф. 2.37а).

Таким чином, проведене дослідження напружено-деформованого стану вал-шестерні головної передачі заднього мосту автомобіля МАЗ-5551 за допомогою МСЕ забезпечує новий підхід відносно визначення його основних параметрів.

Для подальших досліджень можна скористатись наступними додатками SolidWorks:

- SolidWorks Motion (комплексний кінематичний та динамічний аналізи механізмів; урахування тертя; демпфери; пружини; гравітація);
- SolidWorks Flow Simulation (моделювання потоку рідин і газів; комплексні теплові розрахунки; гідро/газодинамічні та теплові моделі технічних пристроїв; стаціонарний та нестаціонарний аналізи);
- SolidWorks Flow Simulation Electronic Cooling Module (тепловий розрахунок електронних пристроїв);
- SolidWorks Flow Simulation HVAC Module (розрахунки систем вентиляції, опалення та кондиціонування);

- SolidWorks Plastics (аналіз пролиття прес-форм з урахуванням фізичних властивостей полімерів);
- eDrawings (узгодження документів SolidWorks, робота з DWG/DXF – вимірювання, динамічний переріз, авторознесення складань);
- SolidWorks Sustainability (екологічна експертиза проекту).

Упровадження CAE/CAD систем у навчальний процес сприятиме як розвитку творчої спрямованості, так і повнішому та якіснішому оволодінню системами знань та вмінь.

## 4 Дослідження міцності веденого конічного колеса за допомогою SolidWorks Simulation

Екстремальні умови роботи елементів сучасних конструкцій, складність їх форми та великі габарити роблять виключно важким і дорогим здійснення натурного або напівнатурного експерименту, особливо, якщо йдеться про встановлення граничних (руйнуючих) навантажень. Створення конструкцій такого типу неможливе без удосконалення й автоматизації процесу проектування, застосування нових матеріалів і технологій [10].

Необхідність упровадження у виробництво складної техніки в короткі терміни призводить до створення систем автоматизованого проектування. Важливу роль в цих системах виконує розрахунок на міцність.

У наш час у навчальному процесі інженерних вузів усе ширше використовуються CAD/CAE-системи. Вони забезпечують одержання швидкого й точного розв'язку на комп'ютері технічних задач у тривимірному просторі: реалізовані сучасними CAD/CAE-системами методи тривимірного моделювання (твердотільного, поверхневого, гібридного) суттєво змінюють методологію проектування й підготовки виробництва. При цьому головним й первісним носієм інформації про спроектований об'єкт стає його 3D модель, а створювані по цій моделі креслення є вторинною формою відображення об'єкту.

Однією з таких CAD/CAE-системи є SolidWorks – програмний комплекс для автоматизації робіт промислового підприємства на етапах конструкторської й технологічної підготовки виробництва [8]. У SolidWorks однаково працювати як з твердими тілами, так і з поверхнями (деталь є твердим тілом, поверхнею або поєднанням твердого тіла і набору поверхонь).

SolidWorks Simulation – додаток SolidWorks, призначений для розв'язку задач механіки деформованого твердого тіла методом скінченних елементів (МСЕ). Це програмне забезпечення для розрахунків на статичну міцність і стійкість у лінійній і нелінійній постановці, виділення власних частот, оптимізації форми деталей і складань у лінійній постановці, аналізу втоми й поведінки конструкції при падінні [9].

Програма використовує геометричну модель деталі або складання SolidWorks для створення розрахункової моделі. Інтеграція з SolidWorks дає можливість мінімізувати операції, пов'язані зі специфічними особливостями скінченно-елементної апроксимації

(SEA). Призначення граничних умов проводиться у прив'язці до геометричної моделі. Такими самими особливостями володіють процедури оголошення результатів.

SolidWorks Simulation побудований на базі MCE. Ось рад особливостей його реалізації у даній програмі.

В SolidWorks Simulation використовуються три базові типи скінченних елементів (SE): об'ємні ізопараметричні тетраедри, трикутні елементи оболонки та елементи балок. Два перші типи SE можуть мати лінійне або параболічне поле переміщень (постійну деформацію або лінійне поле деформацій). Тетраедри містять, відповідно, 4 або 10 вузлів, оболонки 3 або 6, а балки/стрижні – 2.

Програма допускає співіснування в одній моделі твердотільних й оболонкових SE. Причому гібридні сітки працездатні як у лінійних, так і в нелінійних розрахункових моделях. Однак, елементи балок/стрижнів не сполучаються з якими-небудь іншими типами SE.

Контактні SE, принаймні, у явному вигляді, у програмі відсутні. На основі непрямих спостережень можна визнавати, що врахування додатних граничних умов здійснюється зміною глобальної матриці жорсткості системи. Віртуальні об'єкти типу болтів, стрижнів/шпильок, пружин реалізовані на базі елементів балок/стрижнів.

Деякі інші типи кінематичних граничних умов реалізують безпосередньою зміною матриці жорсткості системи (у ранніх версіях програми для цього використовували штрафні функції – фактично «дуже» жорсткі допоміжні елементи, що призводило до помилок програми).

У межах одного складання допускають співіснування довільних комбінацій контактних граничних умов типу входу в контакт і виходу з нього.

Для розрахунків складань у програмі реалізовані граничні умови, об'єднані в групу «З'єднання» (Connectors). Реалізація цих умов (або деяких їх різновидів) припускає такі зміни матриці жорсткості системи, які призводять до появи у моделі абсолютно жорсткого віртуального об'єкту. Як наслідок, у місці, де цей об'єкт взаємодіє з «реальними» деталями складання (фактично, у зоні прикладення описаних граничних умов), можлива поява теоретично нескінченних деформацій (напружень). На практиці це виражається у відсутності збіжності розв'язку при ущільненні сітки й некоректним результатам.

В SolidWorks Simulation присутній р-адаптивний метод побудови сітки СЕ. Це значить, що в зонах з високим градієнтом енергії деформації програма збільшує порядок поліному, що апроксимує поле переміщень у СЕ. При некоректній постановці кінематичних граничних умов можлива поява особливостей (теоретично нескінченних деформацій і напружень). Застосування даної опції для таких моделей призводить до невірних результатів.

В SolidWorks Simulation присутній також h-адаптивний метод побудови сітки СЕ. Він полягає в ущільненні сітки в зонах, де величина щільності енергії деформації відносно велика порівняно із середнім її значенням.

Для пружного аналізу можна використати ортотропні матеріали, а також ортогонально- й трансверсально-ізотропні матеріали. Можна призначити циліндричну ортотропію (криволінійна ортотропія відсутня). Ці властивості призначають як для твердих тіл, так і для оболонок.

При оцінці міцності складань за допомогою функції SolidWorks Simulation «Перевірка міцності» (Design Check Wizard) для всіх матеріалів використовують однаковий тип критерію міцності. Отже, застосування цієї функції для аналізу складань, які містять деталі з крихких і в'язких матеріалів, є проблематичним (якщо потрібно відобразити результати відразу для всіх деталей).

SolidWorks Simulation дозволяє виконувати наступні види моделювання:

- статичний аналіз у пружній постановці з розрахунками деяких деталей за просторовою або оболонковою моделлю, а також складань у тривимірній постановці з урахуванням взаємодії їх деталей;
- розрахунки власних частот, величин критичних навантажень втрати стійкості й відповідних їм форм для твердотільних або оболонкових деталей, а також складань з нерухомими деталями;
- теплові розрахунки з урахуванням явищ теплопровідності, конвекції, випромінювання (але без урахування руху середовищ);
- термопружний аналіз на базі теплових обчислень;
- параметрична оптимізація за критерієм мінімізації/максимізації маси, об'єму, власних частот і критичної сили;

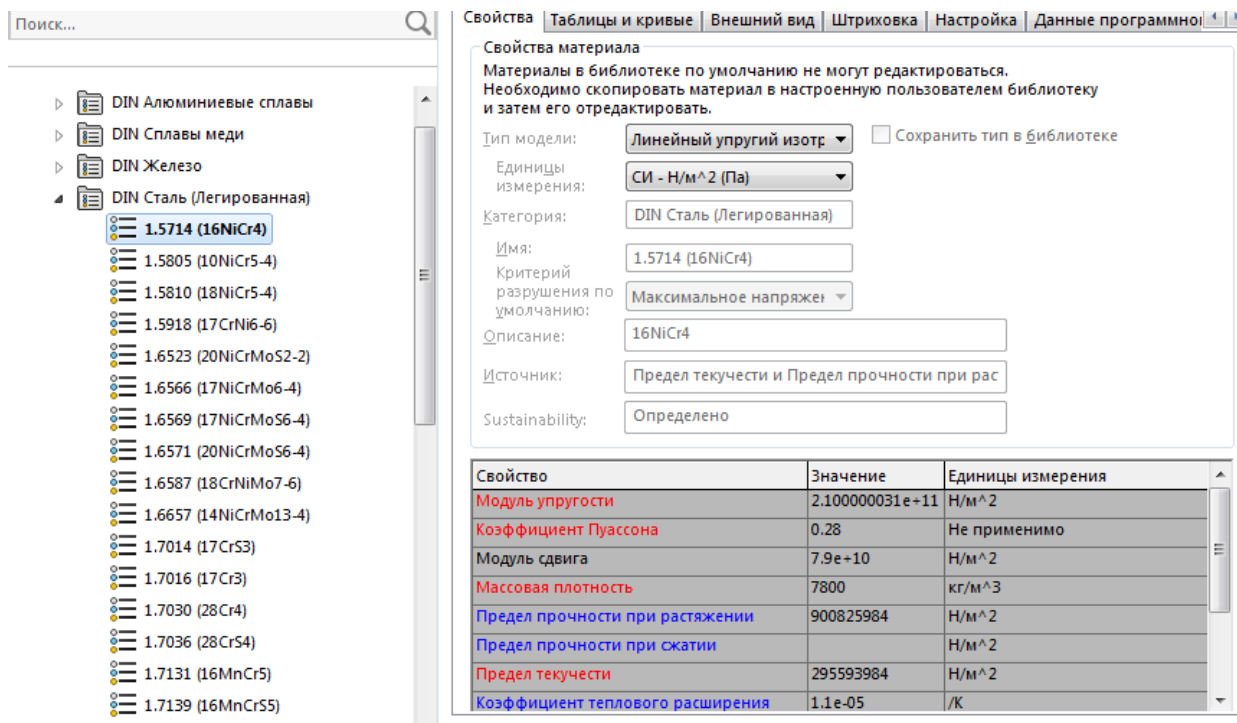
- імітація деформування конструкції з урахуванням фізичної й геометричної нелінійності, а також через зміну навантаження і температур у часі;
- моделювання ефекту падіння деталі на тверду або пружну поверхню;
- втомні розрахунки з урахуванням кривих втоми, форми кривого навантаження.

Усі ці типи аналізу можуть бути пов'язані з тим самим об'єктом SolidWorks. SolidWorks Simulation вимагає дотримання базового алгоритму MCE, надаючи усередині кожного етапу послідовності кроків підготовки моделі й розгляду отриманих результатів. Для розрахунків у пружній постановці для моделей у твердотільному представленні передбачено наступний алгоритм:

1. Створення аналізу дечкого типу та формулювання його настройки (можна змінити в будь-який момент часу перед розрахунками).
2. Заповнення (при необхідності) таблиці параметрів, яка визначає набір змінюваних величин (тобто, для яких призначаються списки значень) у процесі розрахунків.
3. Підготовка вихідних даних (усередині заданого аналізу):
  - вибір матеріалу деталі (або деталей);
  - призначення кінематичних, статичних і контактних граничних граничних умов (якщо розраховується складання або деталей з декількох тіл);
  - створення сітки.
4. Зв'язування, при потребі, параметрів з таблиці з відповідними аналізами.
5. Розрахунки.
6. Обробка результатів:
  - створення потрібних діаграм з їх аналізом;
  - експорт результатів.

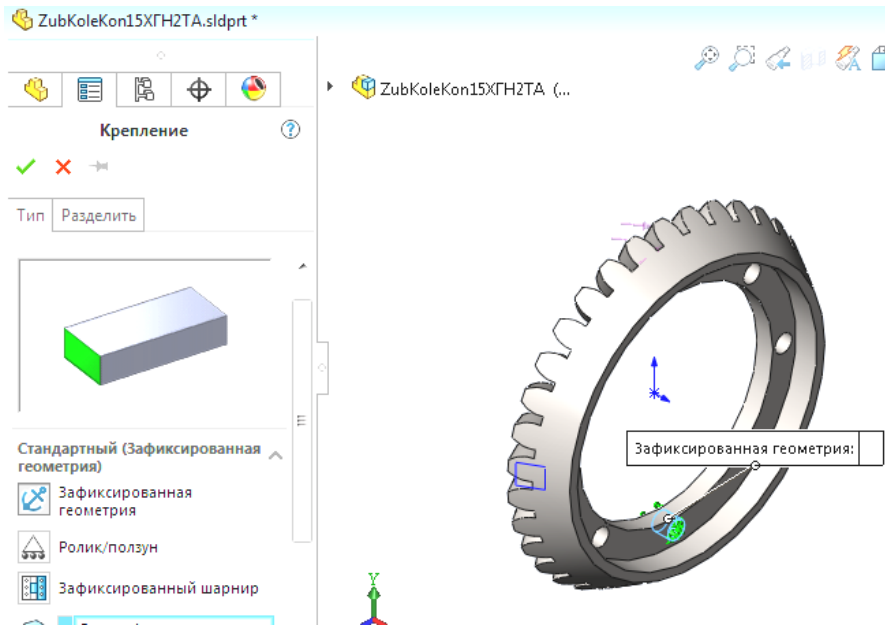
Процедура оптимізації базується на результатах розрахунків у лінійній постановці (статичного аналізу, розрахунків на власні частоти, стійкість). Втомний аналіз вимагає виконання як мінімум 1-го статичного розрахунку.

У даному дослідженні за допомогою SolidWorks Simulation визначали працездатність веденого конічного колеса заднього мосту автомобіля МАЗ-5551. Матеріалом для його виготовлення є сталь 15ХГН2ТА (з бібліотеки SolidWorks вибраний аналог – сталь DIN 1.5714 – рис. 4.1).



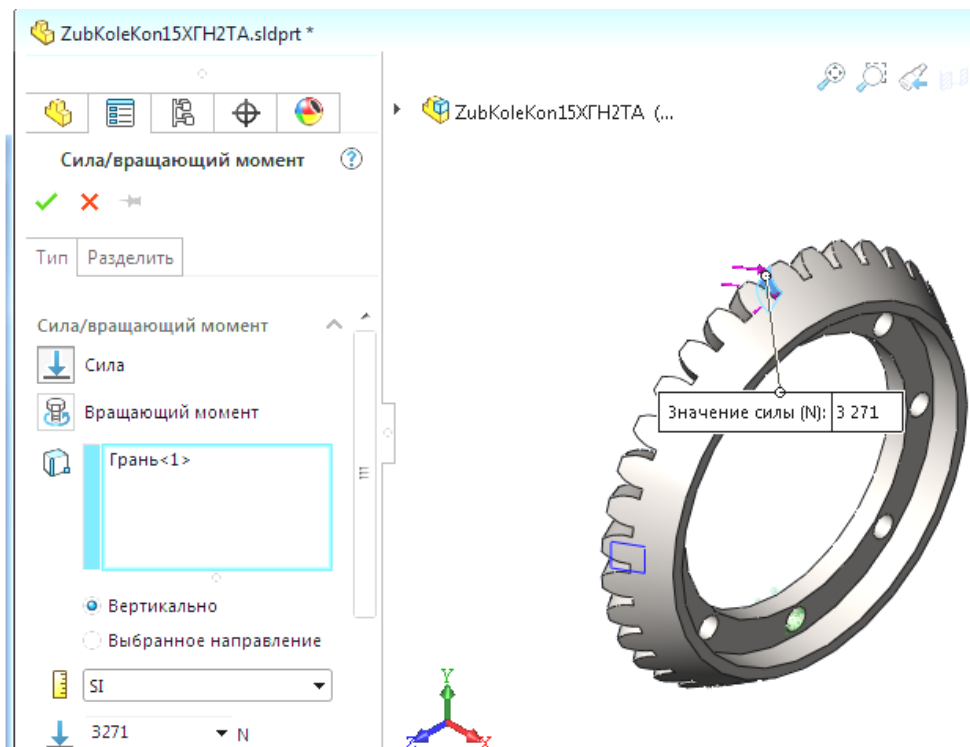
**Рисунок 4.1 – Призначення матеріалу веденого конічного колеса**

Дефініція опор веденого конічного колеса наведена на рис. 4.2 (моделюється надійне закріплення тільки одного отвору колеса):



**Рисунок 4.2 – Дефініція опор веденого конічного колеса**

Прикладення навантажень (вихідна розрахункова колова сила  $F_t = 3271 \text{ N}$  – ф. 2.22а, 2.22б) – рис. 4.3.



**Рисунок 4.3 – Прикладення навантаження до конічної шестірни**

Створення сітки твердотільної моделі веденого конічного колеса – рис. 4.4.

**Сетка**

Определение: Качество сетки

Параметры сетки

- Стандартная сетка
- Сетка на основе кривизны
- Сетка на основе смешанной кривизны

mm

9.00044802мм

0.4500224мм

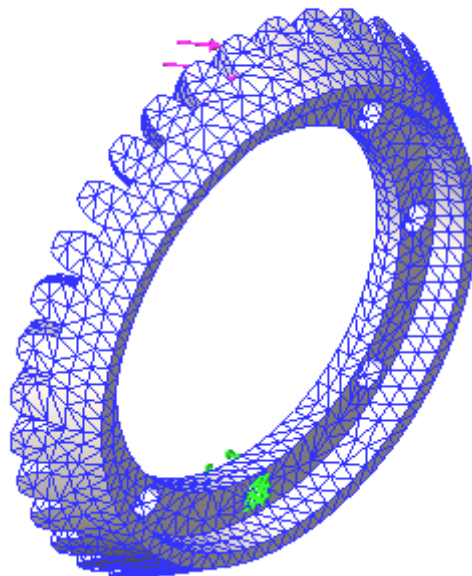
Автоматический переход

Дополнительно

Точки Якобиана: 4 точки

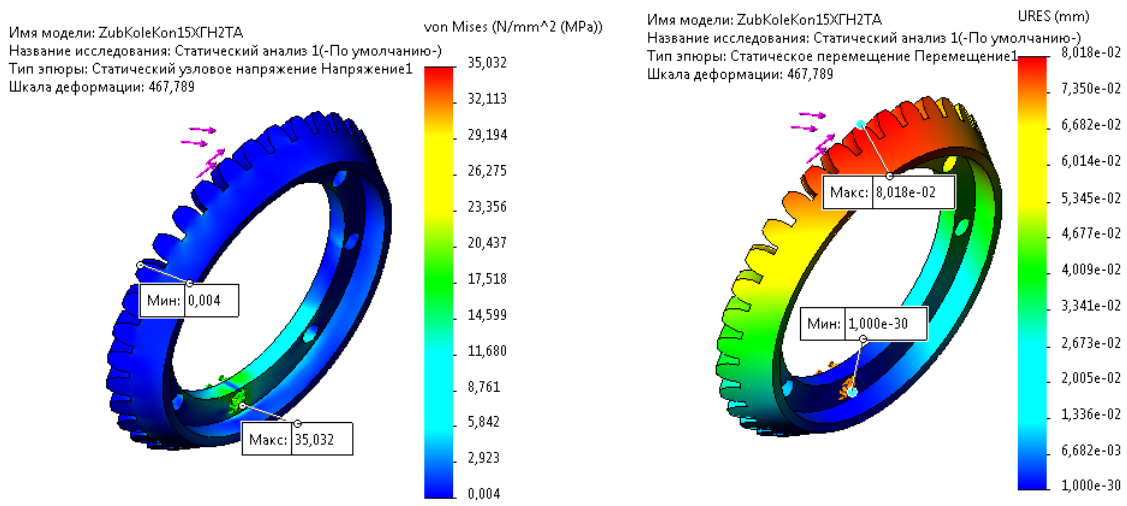
Сетка Детализация	
Имя исследования	Статический анализ 1 (-П
Тип сетки	Сетка на твердом теле
Используемое разбиение	Стандартная сетка
Автоматическое уплотнение сетки	Выкл
Включить автоциклы сетки	Выкл
Точки Якобиана для сетки высокого качества	4 точек
Размер элемента	9,00045 mm
Допуск	0,450022 mm
Качество сетки	Высокая
Всего узлов	17160
Всего элементов	9377
Максимальное соотношение сторон	5,6195
Процент элементов с соотношением сторон < 3	97,7
Процент элементов с соотношением сторон > 10	0
Процент искаженных элементов	0
Число искаженных элементов	0
Время для завершения сетки (hh:mm:ss)	00:00:11

Имя модели: ZubKoleKon15XГН2ТА  
 Название исследования: Статический анализ 1  
 Тип сетки: Сетка на твердом теле

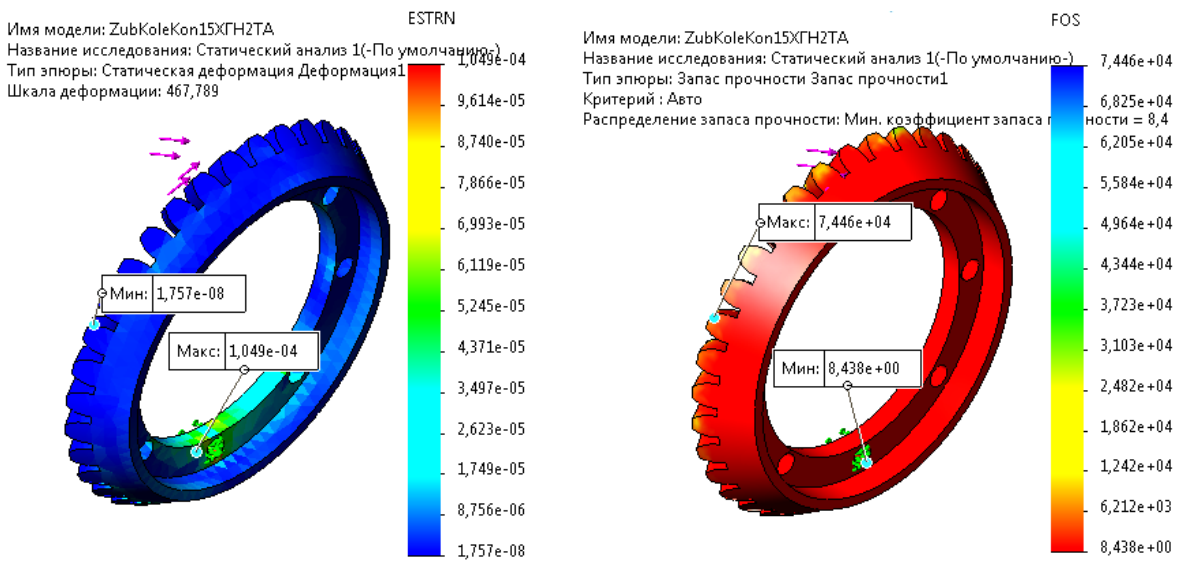


**Рисунок 4.4 – Параметры сітки моделі веденого конічного колеса та її відображення на твердому тілі**

Результаты розрахунків – рис. 4.5.



а – вузлові напруження Von Mises    б – розподіл переміщень URES




в – деформація ESTRN    д – запас міцності

**Рисунок 4.5 – Результати розрахунків веденого конічного колеса (епюри), виготовленого зі сталі 15XГН2ТА**

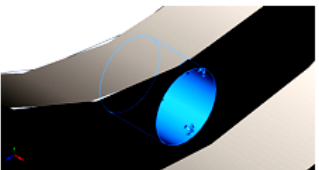
Встановлено, що мінімальний коефіцієнт запасу міцності  $k = 8.438$ , що більше допустимого  $[k] = 1,5$ .

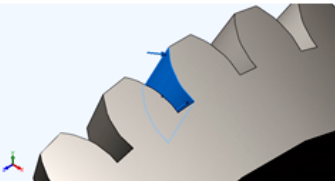
Але у ремонтних майстернях сталь 15XГН2ТА не завжди присутня. Тому метою роботи ставилась можливість заміни даного матеріалу на доступніший – сталь 20 (AISI 1020). Для цього у симуляції напружень, переміщень, деформацій, коефіцієнту запасу міцності веденого конічного колеса, виготовленої зі сталі 15XГН2ТА, проводилась відповідна заміна матеріалу з наступними повторними розрахунками. Отримані при цьому результати відображені на рис. 4.6.

## Свойства материала

Ссылка на модель	Свойства
	Имя: AISI 1020
	Тип модели: Линейный Упругий Изотропный
	Критерий прочности по умолчанию: Максимальное напряжение von Mises
	Предел текучести: 3,51571e+08 N/m <sup>2</sup>
	Предел прочности при растяжении: 4,20507e+08 N/m <sup>2</sup>
	Модуль упругости: 2e+11 N/m <sup>2</sup>
	Коэффициент Пуассона: 0,29
	Массовая плотность: 7 900 kg/m <sup>3</sup>
	Модуль сдвига: 7,7e+10 N/m <sup>2</sup>
	Коэффициент теплового расширения: 1,5e-05 /Kelvin

## Нагрузки и крепления

Имя крепления	Изображение крепления	Данные крепления															
Зафиксированный-1		<table border="1"> <tr> <td>Объекты:</td> <td>1 грани</td> </tr> <tr> <td>Тип:</td> <td>Зафиксированная геометрия</td> </tr> </table>	Объекты:	1 грани	Тип:	Зафиксированная геометрия											
Объекты:	1 грани																
Тип:	Зафиксированная геометрия																
<b>Результирующие силы</b> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Компоненты</th> <th>X</th> <th>Y</th> <th>Z</th> <th>Результирующая</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Сила реакции(N)</td> <td>-358,128</td> <td>85,8653</td> <td>1 309,44</td> <td>1 360,25</td> </tr> <tr> <td>Реактивный момент(N.m)</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> </tr> </tbody> </table>			Компоненты	X	Y	Z	Результирующая	Сила реакции(N)	-358,128	85,8653	1 309,44	1 360,25	Реактивный момент(N.m)	0	0	0	0
Компоненты	X	Y	Z	Результирующая													
Сила реакции(N)	-358,128	85,8653	1 309,44	1 360,25													
Реактивный момент(N.m)	0	0	0	0													

Имя нагрузки	Загрузить изображение	Загрузить данные						
Сила-1		<table border="1"> <tr> <td>Объекты:</td> <td>1 грани</td> </tr> <tr> <td>Тип:</td> <td>Приложить нормальную силу</td> </tr> <tr> <td>Значение:</td> <td>3271 N</td> </tr> </table>	Объекты:	1 грани	Тип:	Приложить нормальную силу	Значение:	3271 N
Объекты:	1 грани							
Тип:	Приложить нормальную силу							
Значение:	3271 N							

## Информация о сетке

Тип сетки	Сетка на твердом теле
Используемое разбиение:	Стандартная сетка
Автоматическое уплотнение сетки:	Выкл
Включить автоциклы сетки:	Выкл
Точки Якобиана для сетки высокого качества	4 Точки
Размер элемента	9,00045 mm
Допуск	0,450022 mm
Качество сетки	Высокая

## Информация о сетке - Детализация

Всего узлов	17160
Всего элементов	9377
Максимальное соотношение сторон	5,6195
% элементов с соотношением сторон < 3	97,7
Процент элементов с соотношением сторон > 10	0
Процент искаженных элементов	0
Время для завершения сетки (hh:mm:ss):	00:00:08

## Результирующие силы

### Силы реакции

Выбранный набор	Единицы	Сумма X	Сумма Y	Сумма Z	Результирующая
всей модели	N	-358,128	85,8653	1 309,44	1 360,25

### Моменты реакции

Выбранный набор	Единицы	Сумма X	Сумма Y	Сумма Z	Результирующая
всей модели	N.m	0	0	0	0

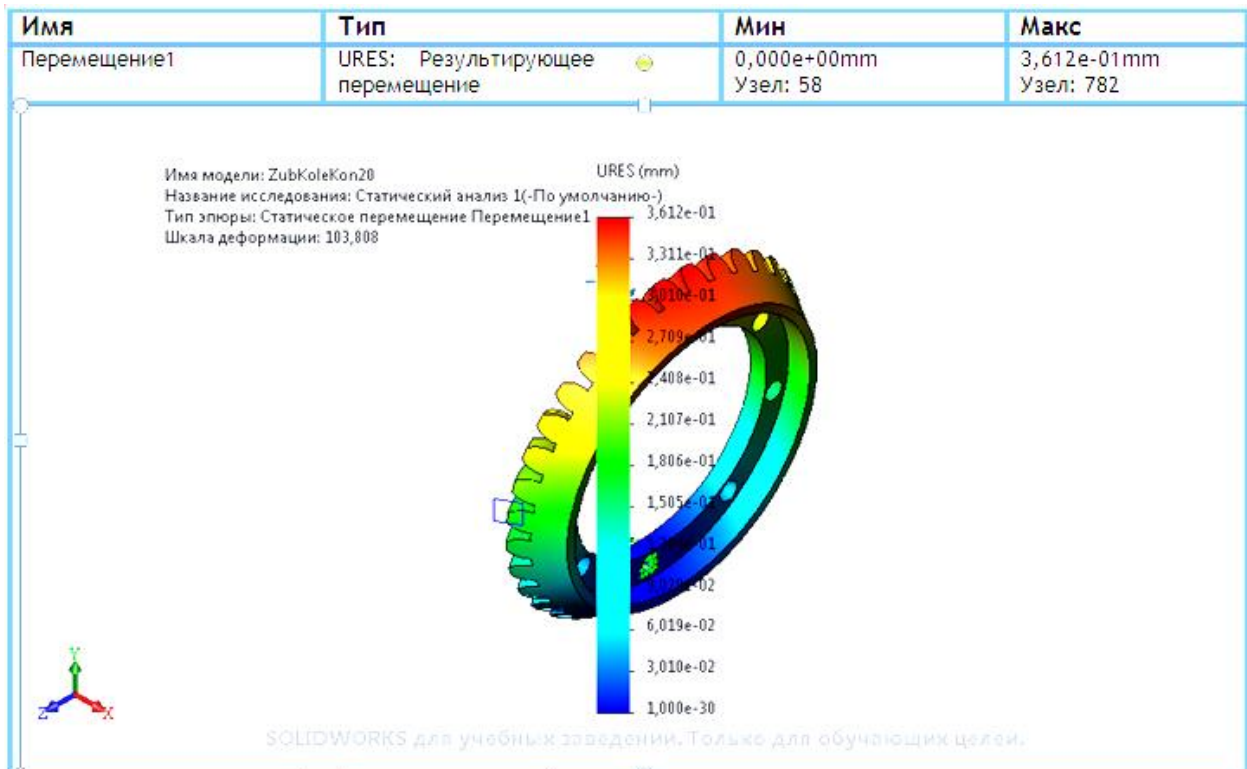
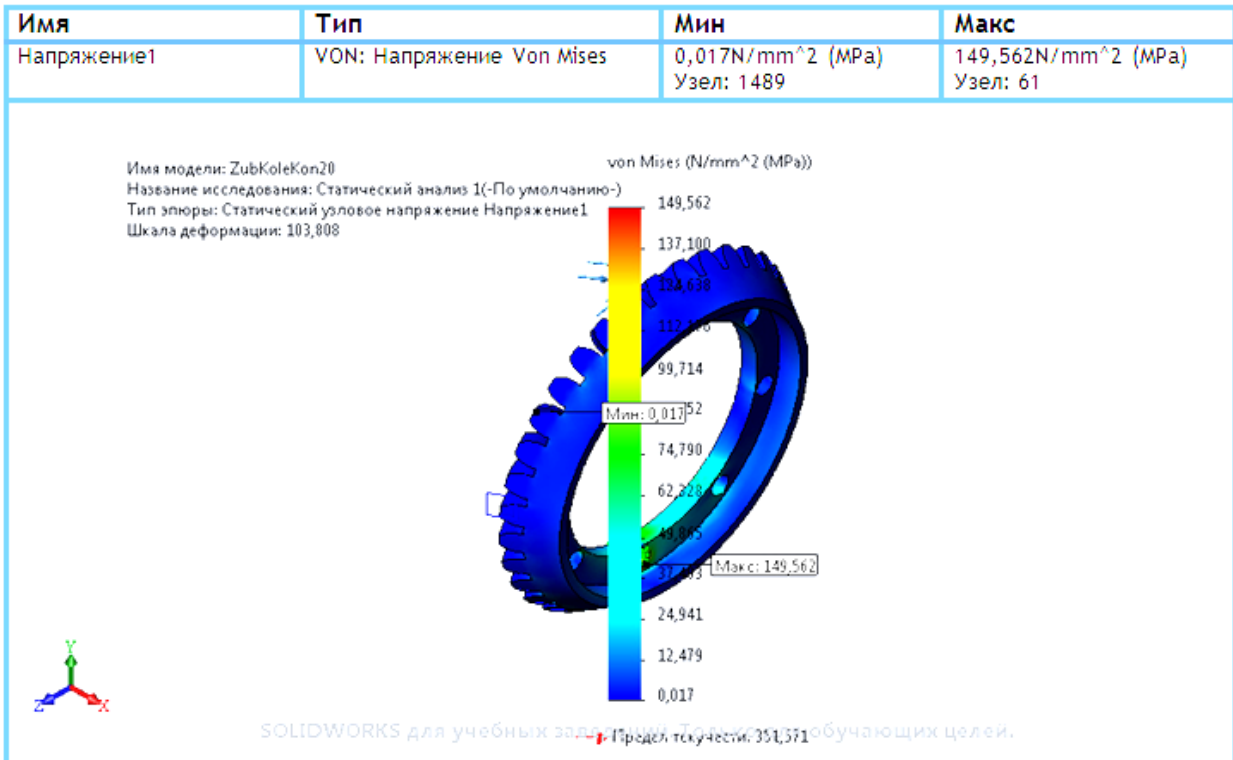
### Силы свободных тел

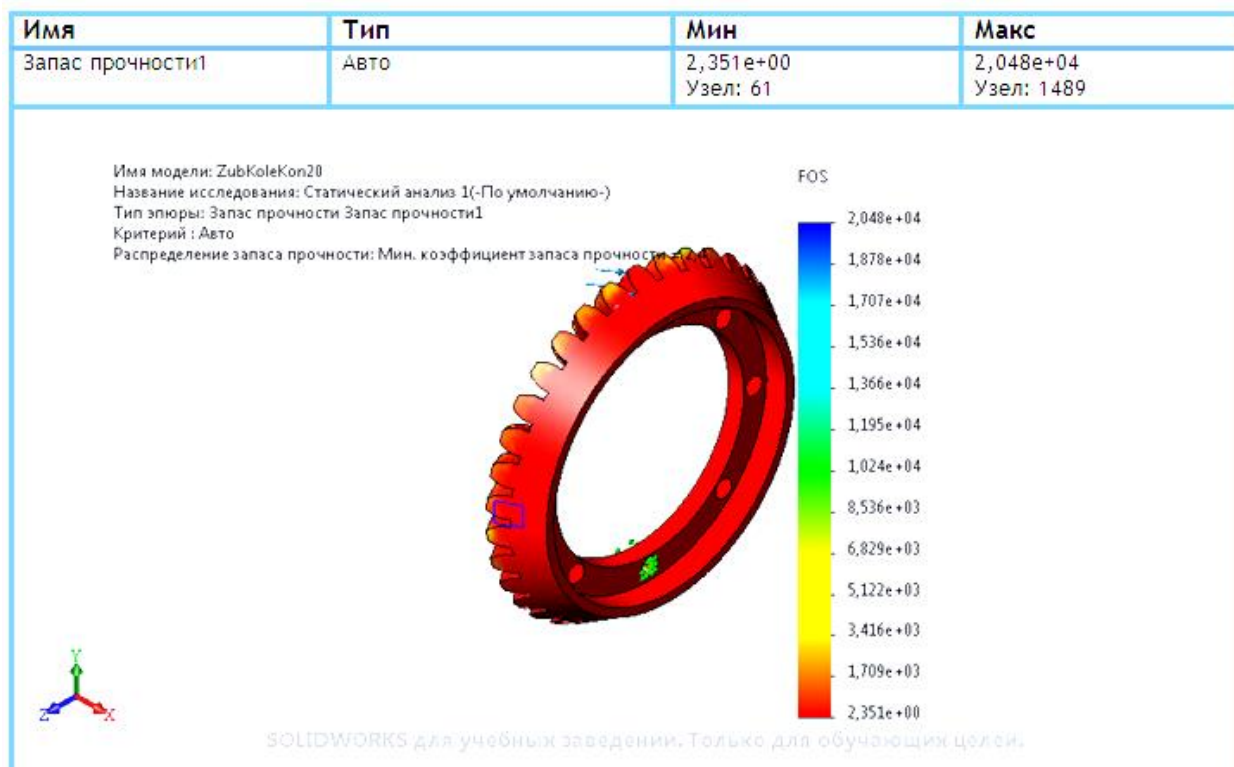
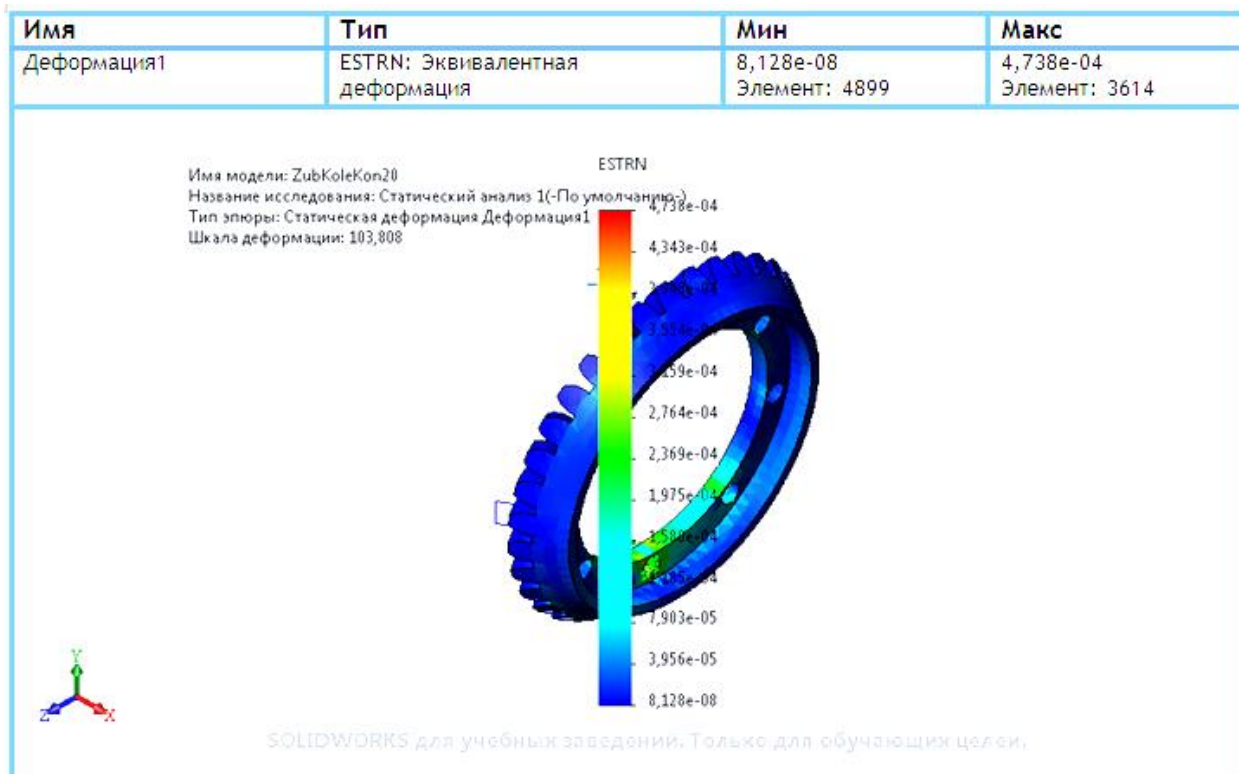
Выбранный набор	Единицы	Сумма X	Сумма Y	Сумма Z	Результирующая
всей модели	N	-0,858207	-0,594173	-0,356615	1,10306

### Моменты свободных тел

Выбранный набор	Единицы	Сумма X	Сумма Y	Сумма Z	Результирующая
всей модели	N.m	0	0	0	1e-33

## Результаты исследования





**Рисунок 4.6 – Результаты розрахунків веденого конічного колеса (епюри), виготовленого зі сталі 20**

Висновок: у випадку заміни сталі 15ХГН2ГА на сталь 20 для виготовлення веденого конічного колеса запас міцності достатній (допустимий коефіцієнт запасу міцності більше допустимого).

Таким чином, отримані результати підтверджують актуальність проведеного дослідження з використанням SolidWorks Simulation: з точки зору забезпечення міцності для виготовлення веденого конічного колеса заміна його матеріалу є можливою. Але, враховуючи умови роботи цієї деталі, для підвищення її зносостійкості рекомендується хіміко-термічна (чи інша) обробка.

## 5 Застосування SolidWorks Simulation для дослідження міцності фланця заднього мосту автомобіля МАЗ-5551

Одним із засобів інформаційних технологій є комп'ютерне моделювання (КМ), яке викликає підвищений інтерес можливістю розглядати фізичні процеси, які характеризують напружено-деформований стан твердих тіл, з використанням 3D системи твердотільного параметричного моделювання SolidWorks. Завдяки застосуванню сучасних методів тривимірного твердотільного проектування стає можливим побудувати точну модель деталі й методом СЕ визначити експлуатаційні параметри (додаток SolidWorks Simulation), які виникають у ній за конкретних умов експлуатації.

МСЕ у даний час є стандартом при розв'язуванні задач механіки твердого тіла за допомогою чисельних алгоритмів, який із звичайної процедури перетворився на загальний метод чисельного розв'язування диференціальних або системи диференціальних рівнянь.

Перший етап КМ включає створення графічної моделі обстежуваної деталі в програмному комплексі SolidWorks. На другому етапі до моделі застосовують програмний модуль SolidWorks Simulation.

При використанні МСЕ модель ділиться на малі частини (створення сітки) з простими формами (елементи), які ефективно спрощують складну задачу. При цьому програмне забезпечення SolidWorks Simulation, враховуючи з'єднання між елементами, створює рівняння, які пов'язують реакцію з властивістю матеріалу, обмеженнями і навантаженнями. Після цього, упорядкувавши рівняння у систему спільних алгебраїчних рівнянь, знаходяться невідомі.

При проведенні статичного аналізу для моделізначається матеріал; вводяться обмеження, позначаються контактні поверхні й характеристики контакту; прикладаються навантаження; створюється сітка в моделі та виконуються підрахунки. Результатом статичного аналізу є: напруження (еквівалентні, головні, нормальні й дотичні), переміщення вузлів деталі; деформації; реакції; запаси міцності.

У даному дослідженні за допомогою SolidWorks Simulation визначали працездатність фланця заднього мосту автомобіля МАЗ-5551. Матеріалом для його виготовлення є сталь 45Х (з бібліотеки SolidWorks вибраний аналог – сталь DIN 1.7006 – рис. 5.1).

Свойства Таблицы и кривые Внешний вид Штриховка Настройка Данные программно

**Свойства материала**  
 Материалы в библиотеке по умолчанию не могут редактироваться.  
 Необходимо скопировать материал в настроенную библиотеку и затем его отредактировать.

Тип модели:   Сохранить тип в библиотеке

Единицы измерения:

Категория:

Имя:

Критерий разрушения по умолчанию:

Описание:

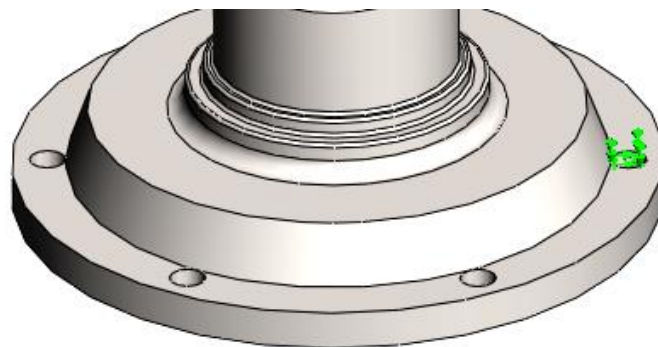
Источник:

Sustainability:

Свойство	Значение	Единицы измерения
Модуль упругости	2.100000031e+11	Н/м <sup>2</sup>
Коэффициент Пуассона	0.28	Не применимо
Модуль сдвига	7.9e+10	Н/м <sup>2</sup>
Массовая плотность	7800	кг/м <sup>3</sup>
Предел прочности при растяжении	900000000	Н/м <sup>2</sup>
Предел прочности при сжатии		Н/м <sup>2</sup>
Предел текучести	650000000	Н/м <sup>2</sup>
Коэффициент теплового расширения	11e-05	/К

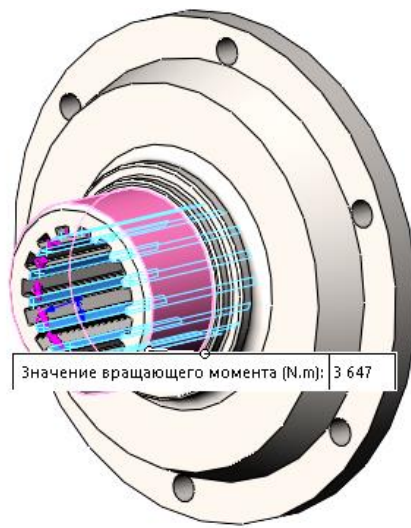
**Рисунок 5.1 – Призначення матеріалу фланця**

Дефініція опор фланця наведена на рис. 5.2 (моделюється надійне закріплення тільки одного отвору фланця):



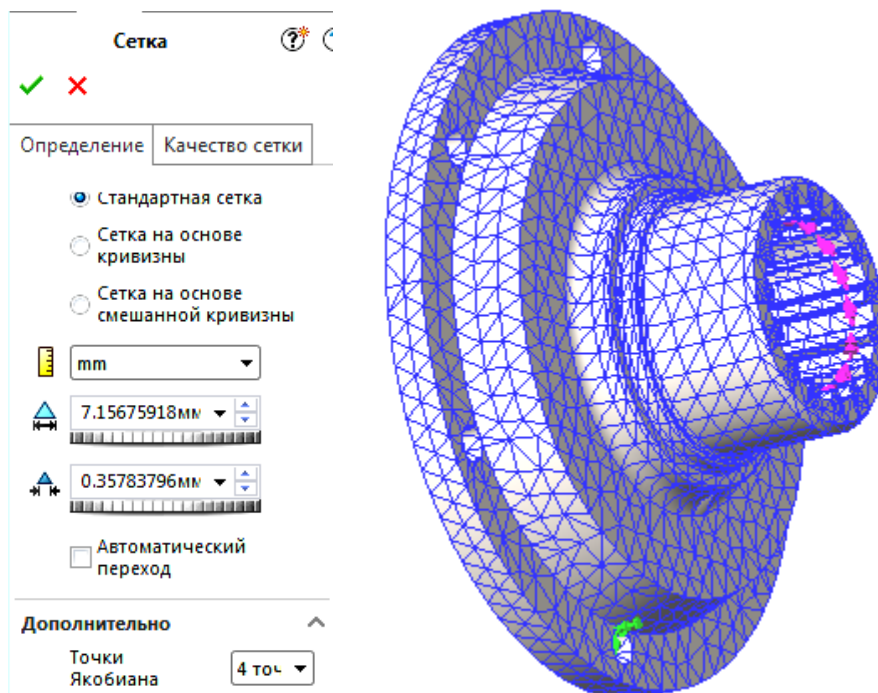
**Рисунок 5.2 – Дефініція опор фланця**

Прикладення навантажень (крутний момент  $M=3647$  Нм – п. 2.6.2, ф. 2.20а) – рис. 5.3.



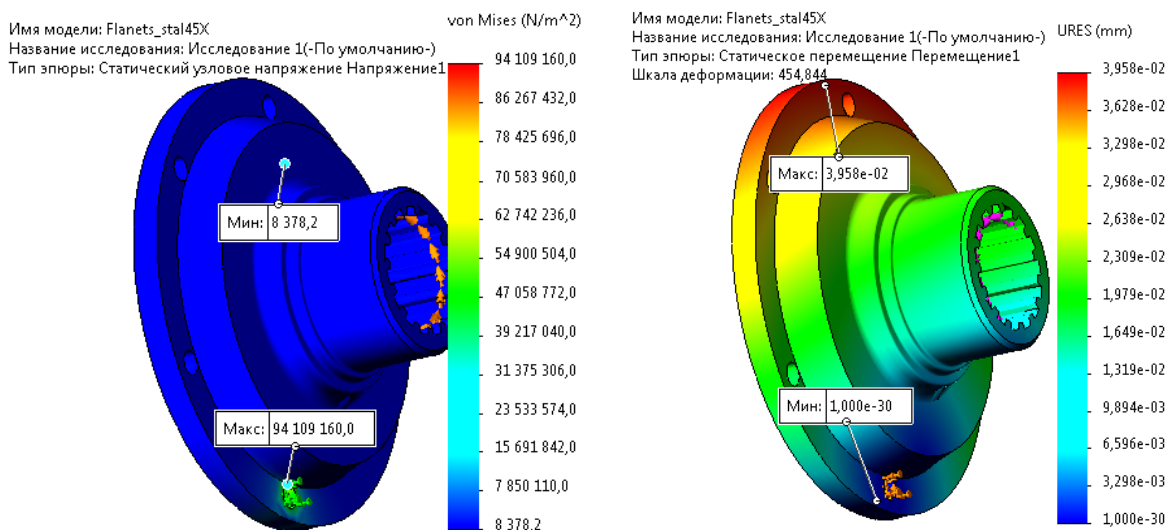
**Рисунок 5.3 – Прикладення навантаження до фланця**

Створення сітки твердотільної моделі фланця – рис. 5.4.

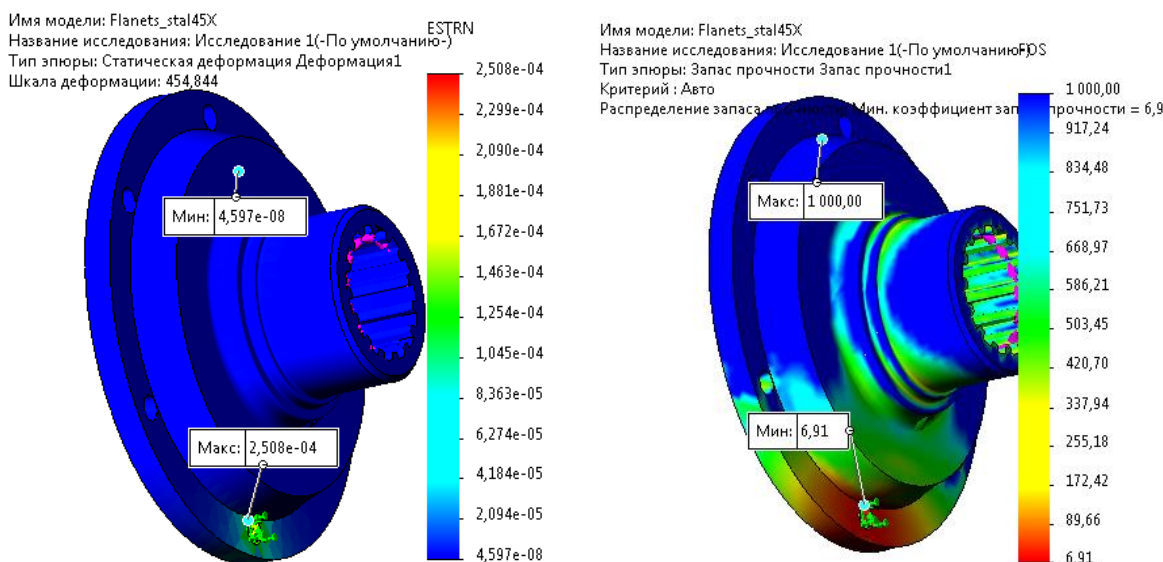


**Рисунок 5.4 – Параметри сітки моделі фланця та її відображення на твердому тілі**

Результати розрахунків – рис. 5.5.



а – вузлові напруження Von Mises    б – розподіл переміщень URES



в – деформація ESTRN    д – запас міцності

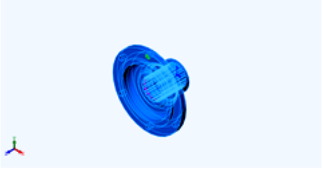
**Рисунок 5.5 – Результати розрахунків фланця (епюри), виготовленого зі сталі 45X**

Встановлено, що мінімальний коефіцієнт запасу міцності  $k = 6.91$ , що більше допустимого  $[k] = 1,5$ .

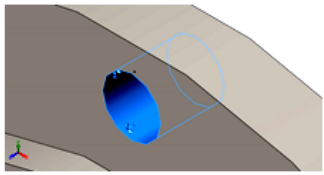
Метою роботи ставилась можливість заміни даного матеріалу на доступніший – сталь 20 (AISI 1020). Для цього у симуляції напружень, переміщень, деформацій, коефіцієнту запасу міцності фланця, виготовленого зі сталі 45X, проводилась відповідна заміна

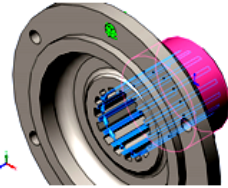
матеріалу з наступними повторними розрахунками. Отримані при цьому результати відображені на рис. 5.6.

### Свойства материала

Ссылка на модель	Свойства	Компоненты	
	Имя:	AISI 1020	Твердое тело 1(Круговой массив2)(лавренюк 1)
	Тип модели:	Линейный Упругий Изотропный	
	Критерий прочности по умолчанию:	Максимальное напряжение von Mises	
	Предел текучести:	3,51571e+08 N/m <sup>2</sup>	
	Предел прочности при растяжении:	4,20507e+08 N/m <sup>2</sup>	
	Модуль упругости:	2e+11 N/m <sup>2</sup>	
	Коэффициент Пуассона:	0,29	
	Массовая плотность:	7 900 kg/m <sup>3</sup>	
	Модуль сдвига:	7,7e+10 N/m <sup>2</sup>	
	Коэффициент теплового расширения:	1,5e-05 /Kelvin	
	Данные кривой: N/A		

### Нагрузки и крепления

Имя крепления	Изображение крепления	Данные крепления				
Зафиксированный-1		<table border="1"> <tr> <td>Объекты:</td> <td>1 грани</td> </tr> <tr> <td>Тип:</td> <td>Зафиксированная геометрия</td> </tr> </table>	Объекты:	1 грани	Тип:	Зафиксированная геометрия
Объекты:	1 грани					
Тип:	Зафиксированная геометрия					
<b>Результирующие силы</b>						
Компоненты	X	Y	Z	Результирующая		
Сила реакции(N)	-0,0289459	-0,111134	-0,00203133	0,114859		
Реактивный момент(N.m)	0	0	0	0		

Имя нагрузки	Загрузить изображение	Загрузить данные								
Сила-1		<table border="1"> <tr> <td>Объекты:</td> <td>15 грани</td> </tr> <tr> <td>Справочный:</td> <td>Грань&lt; 1 &gt;</td> </tr> <tr> <td>Тип:</td> <td>Приложить вращающий момент</td> </tr> <tr> <td>Значение:</td> <td>3647 N.m</td> </tr> </table>	Объекты:	15 грани	Справочный:	Грань< 1 >	Тип:	Приложить вращающий момент	Значение:	3647 N.m
Объекты:	15 грани									
Справочный:	Грань< 1 >									
Тип:	Приложить вращающий момент									
Значение:	3647 N.m									

## Информация о сетке

Тип сетки	Сетка на твердом теле
Используемое разбиение:	Стандартная сетка
Автоматическое уплотнение сетки:	Выкл
Включить автоциклы сетки:	Выкл
Точки Якобиана для сетки высокого качества	4 Точки
Размер элемента	7,15676 mm
Допуск	0,357838 mm
Качество сетки	Высокая

## Информация о сетке - Детализация

Всего узлов	35682
Всего элементов	21473
Максимальное соотношение сторон	16,952
% элементов с соотношением сторон < 3	79,8
Процент элементов с соотношением сторон > 10	1,29
Процент искаженных элементов	0
Время для завершения сетки (hh:mm:ss):	00:00:09

## Результирующие силы

### Силы реакции

Выбранный набор	Единицы	Сумма X	Сумма Y	Сумма Z	Результирующая
всей модели	N	-0,0289459	-0,111134	-0,00203133	0,114859

### Моменты реакции

Выбранный набор	Единицы	Сумма X	Сумма Y	Сумма Z	Результирующая
всей модели	N.m	0	0	0	0

### Силы свободных тел

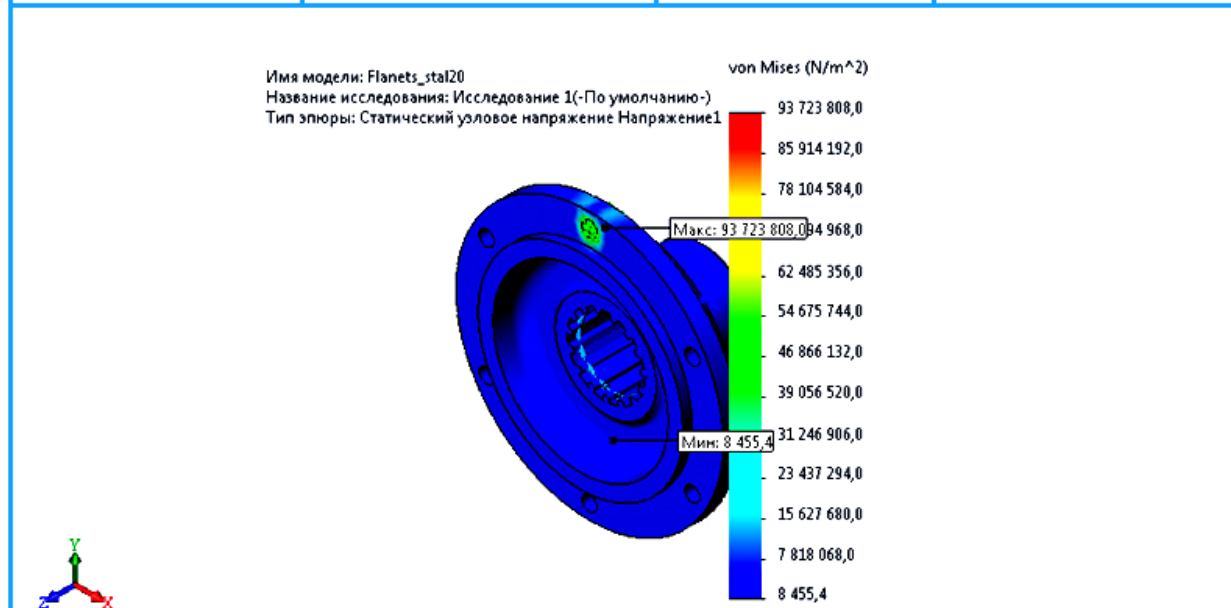
Выбранный набор	Единицы	Сумма X	Сумма Y	Сумма Z	Результирующая
всей модели	N	0	0	0	0

### Моменты свободных тел

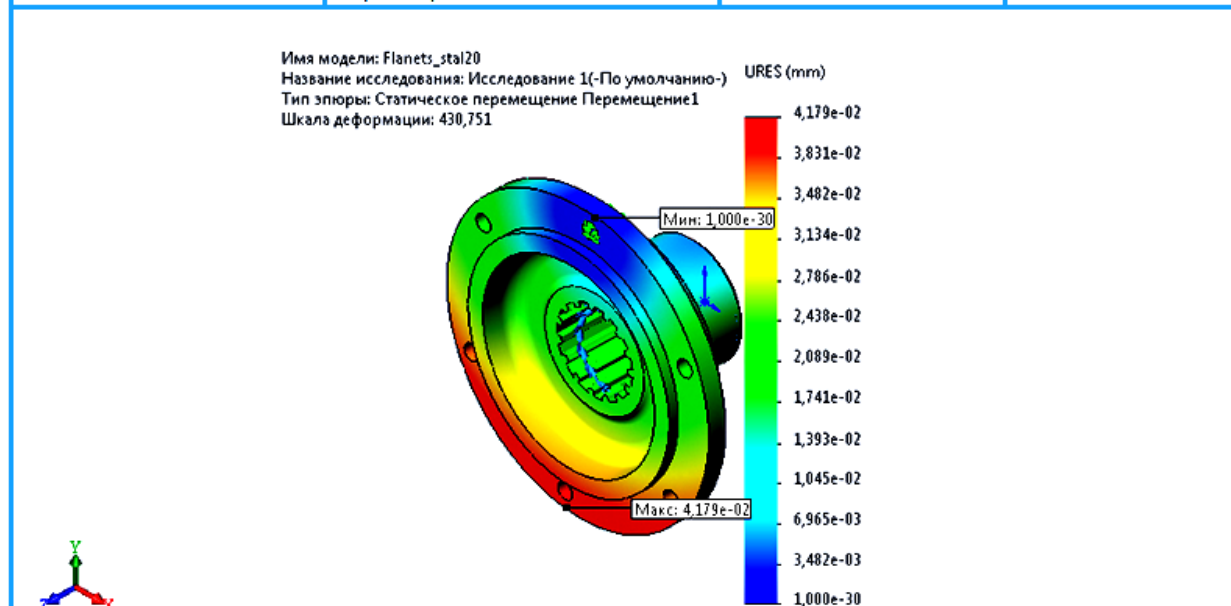
Выбранный набор	Единицы	Сумма X	Сумма Y	Сумма Z	Результирующая
всей модели	N.m	0	0	0	0

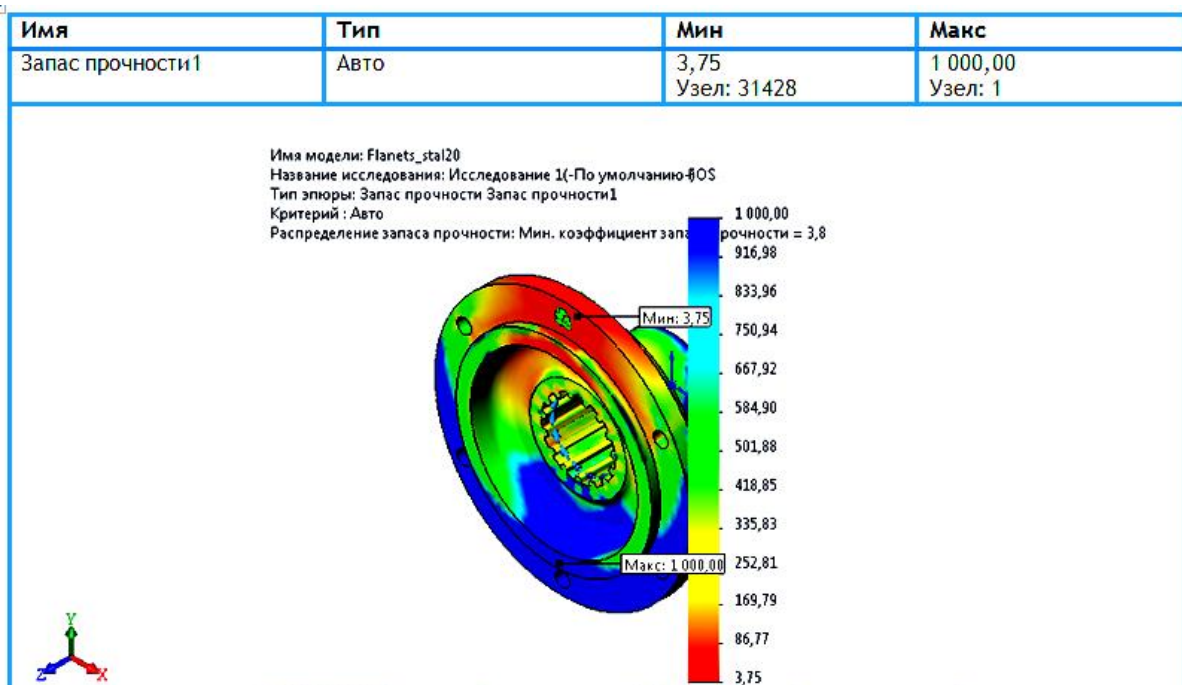
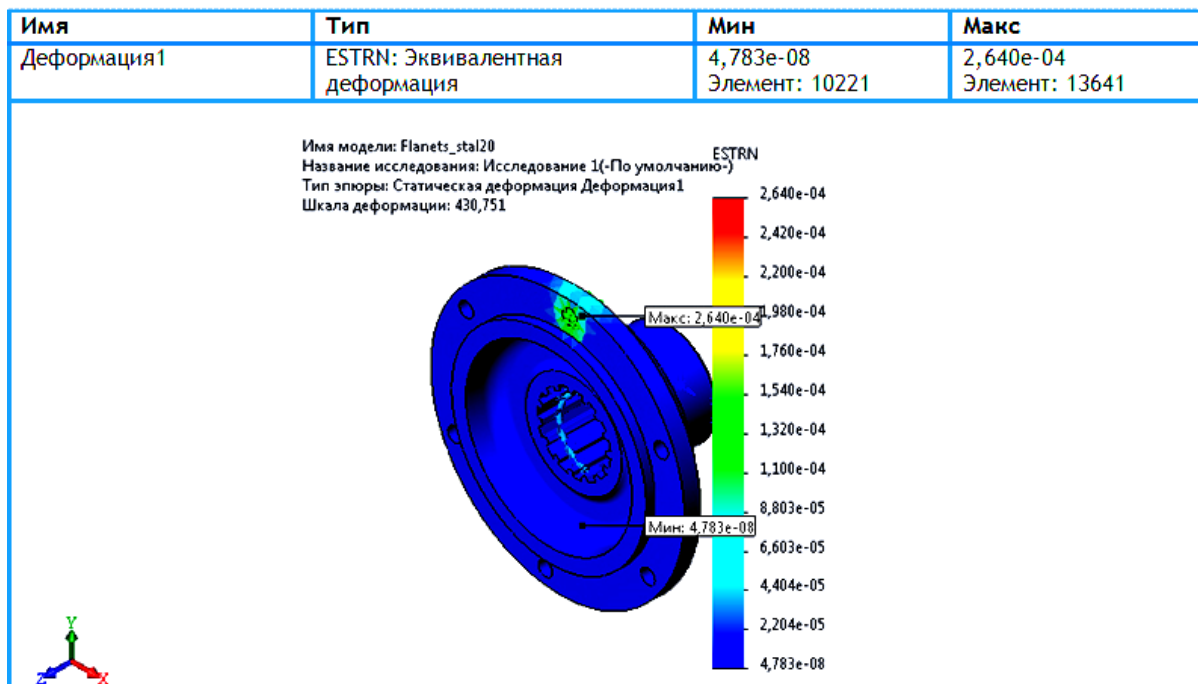
## Результаты исследования

Имя	Тип	Мин	Макс
Напряжение1	VON: Напряжение Von Mises	8 455,4N/m <sup>2</sup> Узел: 9693	93 723 808,0N/m <sup>2</sup> Узел: 31428



Имя	Тип	Мин	Макс
Перемещение1	URES: Результирующее перемещение	0,000e+00mm Узел: 546	4,179e-02mm Узел: 21426





**Рисунок 5.6 – Результати розрахунків фланця, виготовленого зі сталі 20**

Висновок: у випадку заміни сталі 45Х на сталь 20 для виготовлення фланця запас міцності достатній (допустимий коефіцієнт запасу міцності більше допустимого).

## 6 Інформація про матеріали досліджуваних деталей. Цементация сталі 20

### 6.1 Сталь 20ХГНМ (вал-шестерня головної передачі)

Характеристики, розшифрування, хімічний склад сталі 20ХГНМ наведено на рис. 6.1 [11-14].

#### Химический состав 20ХГНМ

Массовая доля элементов стали 20ХГНМ по [ГОСТ 4543-2016](#)

C (Углерод)	Si (Кремний)	Mn (Марганец)	P (Фосфор)	S (Сера)	Cr (Хром)	Mo (Молибден)	Ni (Никель)	V (Ванадий)	Ti (Титан)	Cu (Медь)	N (Азот)	W (Вольфрам)	Fe (Железо)
0,18 - 0,23	0,17 - 0,37	0,7 - 1,1	< 0,04	< 0,04	0,4 - 0,7	0,15 - 0,25	0,4 - 0,7	< 0,05	< 0,03	< 0,3	< 0,012	< 0,2	остальное

Химический состав может быть изменён по договорённости с поставщиком: содержание кальция не должно превышать 0,003, также, как и содержание алюминия для цементируемых сталей не должно быть ниже 0,02. Эм = 0,3Cr + 0,5Ni + 0,7Cu.

#### Механические свойства стали 20ХГНМ

Свойства по стандарту ГОСТ 4543-2016

Предел текучести, $\sigma_T$ , МПа	Временное сопротивление разрыву, $\sigma_B$ , МПа	Относительное удлинение $\delta_5$ , %	Ударная вязкость КСУ, Дж/см <sup>2</sup>
>930	1180-1570	>7	>59
<b>Твердость по Бринеллю, НВ</b>			
Диаметр/толщина >5мм			
<207			

#### Характеристика материала 20ХГНМ

Марка :	20ХГНМ
Классификация :	Сталь конструкционная легированная
Дополнение:	Сталь хромомарганцовоникелевая с молибденом.
Применение:	Для изготовления деталей, подвергающихся высоким вибрационным и динамическим нагрузкам.
Зарубежные аналоги:	<a href="#">Известны</a>

**Химический состав в % материала 20ХГНМ**  
ГОСТ 4543 - 71

C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Mo	Cu
0.18 - 0.23	0.17 - 0.37	0.7 - 1.1	0.4 - 0.7	до 0.035	до 0.035	0.4 - 0.7	0.15 - 0.25	до 0.3

**Механические свойства при T=20°C материала 20ХГНМ .**

Сортамент	Размер	Напр.	$\sigma_B$	$\sigma_T$	$\delta_5$	$\psi$	KCU	Термообр.
-	мм	-	МПа	МПа	%	%	кДж / м <sup>2</sup>	-
, ГОСТ 4543-71			1180-1570	930	7		590	Закалка 860°C, масло, Отпуск 150 - 180°C, воздух,

**Зарубежные аналоги материала 20ХГНМ**

Внимание! Указаны как точные, так и ближайшие аналоги.

США	Германия	Япония	Франция	Англия	Евросоюз	Италия	Испания	Китай	Швеция	Польша	Финляндия	Австралия	Юж.Корея
-	DIN,WNr	JIS	AFNOR	BS	EN	UNI	UNE	GB	SS	PN	SFS	AS	KS
8617 8620 8620H 8620RH G86170 G86200 H86170 H86200 J11442 K12147	1.6523 21NiCrMo2 21NiCrMo2- 2	SNCM220 SNCM220H	20NCD2 20NiCrMo2 22NCD2	20NiCrMo2- 2 805H20 805M20 806M20	1.6523 20MoCr2-2 20NiCrMo2 20NiCrMo2-2 20NiCrMo2KD	20NiCrMo2	20NiCrMo2 20NiCrMo2- 2 20NiCrMo3- 1	20CrNiMo 20CrNiMoH G20CrNiMo	2506	20HNM 20HNMA	21NiCrMo2	8617 8617H 8620 8620H	SNCM220 SNCM220H

**Рисунок 6.1 – Інформація про сталь 20ХГНМ**

## 6.2 Сталь 15ХГН2ТА (ведена конічна шестірня головної передачі)

Сталь 15ХГН2ТА хромо-марганцево-нікелева з титаном. Така марка сортового металопрокату відноситься до легованої категорії. Наявність у хімічному складі певних добавок обумовлює визначені фізичні властивості даного виду сталі. У першу чергу – це високі показники міцності, що робить її незамінною в тих галузях виробництва й промисловості, де необхідне застосування деталей з підвищеною стійкістю до зношування. Ця сталь використовується як заготовки для різних вінців, шатунів і зубчастих коліс, які працюють в умовах підвищених і інтенсивних навантажень [15].

Характеристика сталі 15ХГН2ТА наведена на рис. 6.2 [16-18].

### Механические свойства

Сечение, мм	$\sigma_T   \sigma_{0,2}$ , МПа	$\sigma_B$ , МПа	$\delta_5$ , %	$\gamma$ , %	KCU, кДж/м <sup>2</sup>
Сортовой прокат. Закалка в масле с 960-840 °C + Отпуск при 180 °C, охлаждение на воздухе					
15	≥735	≥930	≥11	≥55	≥961

**Рисунок 6.2 – Інформація про сталь 15ХГН2ТА**

### 6.3 Сталь 45X (фланець головної передачі)

Конструкційна легована хромиста сталь 45X використовується для виготовлення деталей з підвищеною міцністю, твердістю, зносостійкістю, які працюють при невеликих ударних навантаженнях – шатуни, болти, осі, шестірні, вали, інші вироби [19].

Характеристика сталі 45X наведена на рис. 6.3 [19].

#### Матеріал 45X – механіческие свойства

Сортамент	ГОСТ	Размеры – толщина, диаметр	Режим термообработки	t	KCU	y	d5	sT	sv
		мм		°C	кДж/м <sup>2</sup>	%	%	МПа	МПа
Пруток	4543-71	25	Закалка (масло)	840	490	45	9	835	1030
			Отпуск (вода)	520					

Рисунок 6.3 – Інформація про сталь 45X

### 6.4 Сталь 20 – рекомендований замітник гартованих сталей 20ХГНМ, 15ХГН2ТА, 45Х

Характеристика сталі 20 наведена на рис. 6.4 [20].

Механические свойства стали 20 после ХТО							
Сечение, мм	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\sigma_B$ , МПа	$\delta_5$ , %	y, %	KCU, Дж/м <sup>2</sup>	НВ	HRC
Цементация 920-950 °C, воздух. Закалка 800-820 °C, вода. Отпуск 180-200 °C, воздух.							
50	290-340	490-590	18	45	54	156	55-63

Рисунок 6.4 – Інформація про сталь 20

## 6.5 Цементация сталі 20

Сама по собі цементация сталі є процесом, в основі якого лежить хіміко-термічна обробка. Суть її полягає у здійсненні дифузійного насичення поверхні матеріалу достатньою кількістю вуглецю при нагріванні у певному середовищі [21-24].

Основною задачею зазначеного процесу є проведення збагачення верхнього шару деталей та елементів необхідною кількістю вуглецю, процентний вміст якого у цьому випадку може складати 0,8-1,1%. У результаті такої операції після здійснення загартування одержують високий рівень твердості матеріалу, при цьому його пластична серцевина зберігається. Це немаловажні властивості даного процесу.

В основному цементация сталі використовується для утворення високого процентного співвідношення твердості поверхні деталі, а також для досягнення високої зносостійкості, яка створюється завдяки застосуванню термічної обробки після проведення указанного процесу.

Цементация сталі застосовується для наступних виробів: зубчастих коліс; пальців; валів; осей; важелів; черв'яків; деталей підшипників (великогабаритних кілець і роликів) та ін.

### 6.5.1 Способи цементации

Якщо існує кілька видів указанного матеріалу, то для кожного з них буде застосовуватися своя власна методика даного процесу. Як правило, цементована сталь може створюватися в різних умовах і середовищах, а також при обов'язковій температурі від 850 до 950 градусів по Цельсію. Тому розділяють кілька методів цієї дії:

#### *1. Процес цементации, що відбувається у твердому карбюризаторі.*

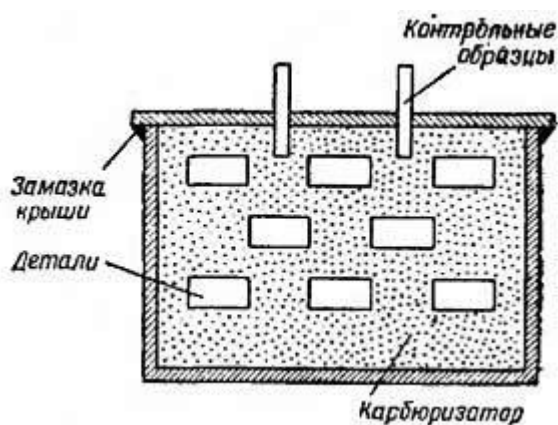
У цьому випадку можливе використання органічних речовин (костей тварин, деревини і т.д.) і неорганічних (коксу) у комбінації з різними активаторами. Збагачення вуглецем буде відбуватися при проведенні хімічної реакції його окиснення. Застосування активаторів

у цьому випадку сприяє кращому й швидкому її протіканню. Такий метод особливо доцільний для досягнення великих глибин науглецювання. Він є ефективним при штучному виготовленні сталевих виробів. Однак даний процес дуже трудомісткий, він спричиняє більші витрати сил, часу й енергії.

Для одержання готової суміші карбюризатора користуються двома способами. Перший – сіль із вугіллям у сухому стані ретельно перемішується. Другий спосіб – із солі одержують розчин. Для цього її розводять у воді, а після чого цим розчином рясно змочують деревне вугілля. Перед приміщенням у піч вугілля сушать. Його вологість не повинна перевищувати 7%. Одержання карбюризатора останнім способом більш якісно.

Суміш насипається в ящики. Після чого в них поміщають деталі. Для виключення відтоку газу, одержуваного під час нагрівання, ящики піддаються герметизації. Щільно закриваючи кришку додатково замазують шамотною глиною.

Ящики підбираються залежно від форми деталі, їх кількості й обсягу засипаної суміші. Звичайно вони бувають прямокутними й круглими. Матеріалом для виготовлення ящиків може служити сталь як жаростійка, так і низьковуглецева (рис. 6.5).



**Рисунок 6.5 – Схема цементацийного ящика з деталями**

Технологічний процес цементації сталі можна представити у наступному порядку:

- деталі, призначені під цементацію, закладаються в металеві ящики, при цьому рівномірно пересипаються вугільним складом.
- ящики герметизуються й подаються в заздалегідь нагріту піч.

- спочатку проводиться прогрів до температурних показів порядку 700-800°C.
- контроль прогриваємості проводиться візуально; ящики й подова плита мають рівномірний колір без затемнених плям;
- далі температуру в печі збільшують до 850-950°C; у даному діапазоні відбувається дифузія впровадження атомів вуглецю;
- тривалість витримування деталей у печі прямо залежить від необхідної товщини шару.

## *2. Процес цементації, що відбувається під впливом газів.*

У даному методі прийнято використовувати збагачені гази (природний, магістральний та ін.) або категорію інертних (азот). Усе залежить від індивідуального підходу. До того ж цементована сталь на основі газів створюється з малим відсотком аліфатичних граничних вуглеводнів, пропану або алканів. Найчастіше цей метод застосовується у масштабному виробництві, але є дуже витратним у плані коштів. Схожий спосіб застосовується при термічному виробництві. При цьому в гарячу роторну піч вводять суміші органічних високомолекулярних з'єднань (наприклад, скипидару, етилового спирту і т.д.), які, у свою чергу, мають здатність розпаду під впливом каталізаторів (нікелевих).

Цементацію сталі й технологічний процес можна представити в наступному порядку:

- деталі для цементації поміщаються у піч;
- температура піднімається до 910-950°C;
- проводиться подача газу в піч і витримка в газовому середовищі певний час.
- тривалість термічного впливу становить 15 год. при температурі в 920°C с одержуванім шаром 1,2 мм.

Для прискорення виробничого процесу температуру піднімають. Уже при 1000°C одержати такий самий зміцнений шар можливо за 8 годин.

Останнім часом широке застосування знайшов спосіб проведення процесу в ендотермічному середовищі. Під час активного науглецювання в газовому середовищі підтримується значний потенціал вуглецю за рахунок введення природного газу (пропану, бутану або метану). На цей період концентрація газу із нафтопродуктів установлюється на рівні 1%.

### *3. Процес рідинної цементації.*

Його застосовують у ціанідних і безціанідних ваннах. Кожне з цих середовищ характеризується своїми особливостями, перевагами й недоліками. Приміром, ціанідні ванни не належать до категорії нешкідливих. Їх прийнято класифікувати як небезпечні носії не тільки для навколишнього середовища, але й для людини. Тому при роботі з таким матеріалом необхідно намагатися дотримувати усіх запропонованих заходів безпеки, щоб уникнути неблагополучних наслідків. А от метод, заснований на безціанідній ванні, не рекомендовано застосовувати в силу того, що він веде до необоротного забруднення навколишнього середовища й наносить їй величезну втрату. Зазначені способи якщо й застосовують на практиці, те тільки лише для одержання невеликих глибин науглецювання.

Цементация в рідкому середовищі відрізняється невеликим насиченим шаром, який не перевищує 0,5 мм. Відповідно часу займає до 3 годин. Серед достоїнств слід зазначити: оброблені деталі мають незначну деформацію, а також можливе загартування без проміжного етапу.

### *4. Процес цементації у вакуумі.*

Недостатній тиск, створюваний у печі, значно скорочує час проведення обробки. Цементацию сталі й технологічний процес можна представити в наступному порядку:

- при даному методі деталі містяться в холодну піч;
- після герметизації камери нагрівання в ній створюється вакуум;
- потім роблять нагрівання до необхідної температури;
- проводиться витримка, яка займає до години за часом. За цей час вирівнюється температура й з поверхні нагрітих деталей осипаються забруднення, що заважають процесу;
- потім подається в камеру вуглецевий газ під тиском. За рахунок чого відбувається активна фаза збагачення поверхневого шару;
- на наступному етапі відбувається дифузійне впровадження вуглецю. На цьому етапі в камері знову створюють вакуумний тиск;

– за короткий проміжок часу не утворюється необхідний шар, тому процес повторюють процес доти, поки не вийде необхідна глибина (результат утворюється за три стадії);

– охолодження до температури навколишнього середовища відбувається в печі під дією інертних газів під різним тиском.

Процес повністю комп'ютеризований. За подачею газу, температурою, тиском стежить програма, відповідальна за весь технологічний процес. Серед достоїнств слід зазначити:

- регулювання кількості вуглецю;
- відсутність кисню запобігає утворенню окислів;
- газ проникає навіть в отвори мінімального діаметру;
- чергування процесів відбувається при рівних умовах;
- повна автоматизація; скорочені терміни.

#### 5. Процес проведення цементації пастами.

При проведенні разових робіт раціональніше користуватися пастами для цементації. У складі пасти знаходяться: сажа з пилом деревного вугілля. Товщина шару пасти повинна бути восьмиразово збільшена для одержання необхідного насиченого шару.

Після нанесення склад просушується. Для процесу цементації використовуються індукційні високочастотні печі. Температура проведення процесу досягає 1050°C.

#### *6. Цементації в електролітичному розчині.*

Процес багато в чому схожий з гальванічним покриттям. У нагрітий розчин електроліту міститься заготовка. Підведений струм викликає одержання активного вуглецю й сприяє його проникненню в поверхню сталеві заготовки.

Таким способом піддають обробці деталі, що мають невеликий розмір. Параметри для проходження цементації: напруга струму – 150-300 В, температура 450-1050°C.

### **6.5.2 Властивості металу після цементації**

Після проведення цементації твердість науглецьованого шару досягає: 58-61 HRC на легованих сталях і 60-64 HRC на низьковуглецевих сталях. Тривале знаходження сталі при високих значеннях температури викликає зміну структури металу.

У результаті цементації досягається тільки вигідний розподіл вуглецю по перетину. Остаточні властивості цементованої деталі наступна термообробка. Усі вироби піддають загартуванню з низьким відпуском. Після загартування цементований виріб здобуває високу твердість (50-58 HRC) і зносостійкість, підвищується межа контактної витривалості й границя витривалості при вигині при збереженні в'язкої серцевини.

### 6.5.3 Термообробка цементованих виробів

Даний процес є також досить важливим етапом обробки деталей. Адже навіть після цементації виріб не має високий відсоток зносостійкості й надійності. Тому завершальним кроком у цьому випадку служить робота із загартовування й відпуску. Процес загартування характеризується рядом особливостей і властивостей. Увесь процес цементації проходить під впливом росту зерна, а його віддача по перетину є неоднаковою й витрачається нерівномірно. Тому в роботі виділяють кілька етапів загартування, кожний з яких відбувається в певних температурних умовах.

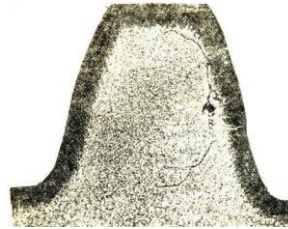
Цементация деталей досить тривалий процес. Швидкість впровадження вуглецю становить 0,1 мм в годину. Не важко підрахувати, що необхідний для тривалої експлуатації 1 мм можна одержати за 10 годин (рис. 6.6). На графіку наочно показано наскільки залежить тривалість від глибини науглецьованого шару й температури нагрівання.



Рисунок 6.6 – Вплив на глибину шару тривалості цементації

Поверхневий шар, одержуваний цементациєю, наведено на рис. 6.7.

Для виправлення крупного зерна металу деталі після цементациї зазнають повторному нагріванню й загартуванню з наступною відпусткою або нормалізацією.

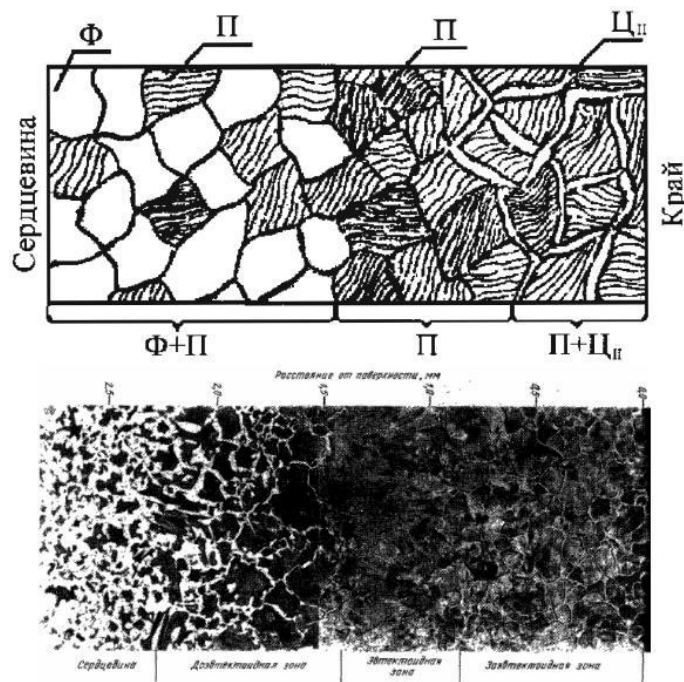


**Рисунок 6.7 – Поверхневий шар, одержуваний цементациєю**

Загартування проводиться при температурі, що не перевищує 900°C. У металі відбувається здрібнювання зерна за рахунок одержання перліту й фериту.

Замість загартування для легованих сталей провадять нормалізацію. Після наскрізного прогріву в середині деталі утворюється мартенсит. Нагрівання деталі залежить від марки сталі, з якої вона була виготовлена.

Структура сталі після цементациї наведена на рис. 6.8.



**Рисунок 6.8 – Структура сталі після цементациї**

Режими термічної обробки сталі після цементації представлено на рис. 6.9.

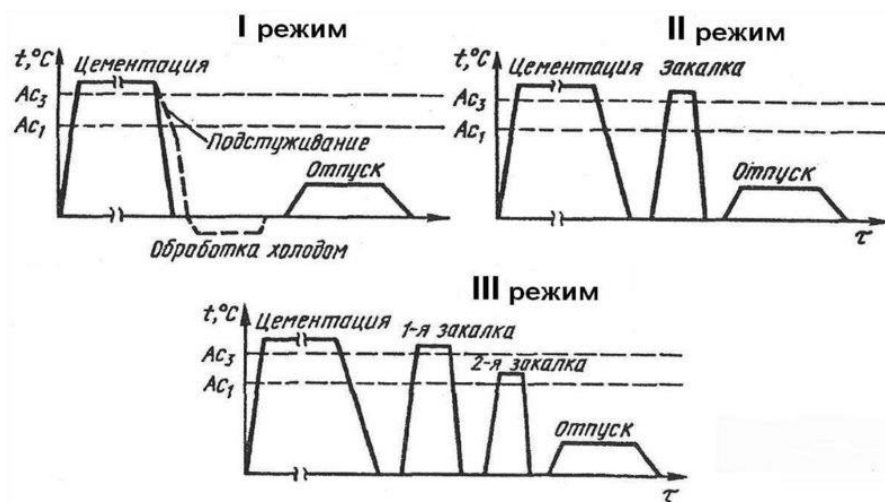
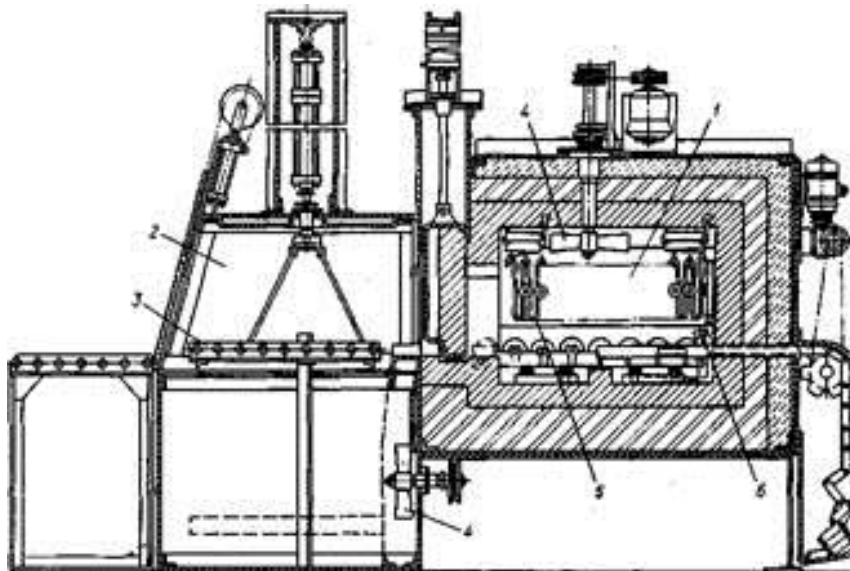


Рисунок 6.9 – Режимы термічної обробки сталі після цементації

### 6.6 Обладнання для цементації сталі 20

Для цементації, загартування й низького відпуску невеликих партій шестірень, валів, кілець і т.п. у середовищі захисного газу застосовують камерні універсальні печі, об'єднані в єдину конструкцію [25-27].

Камерна універсальна електропіч СНЦ 5.10. 3,2/10 зображена на рис. 6.10.



1 – нагрівальна камера; 2 – гартівна камера; 3 – піднімальний столик; 4 – вентилятор; 5 – нагрівачі; 6 – ланцюговий механізм для пересування піддона з деталями

Рисунок 6.10 – Камерна універсальна електропіч СНЦ 5.10. 3,2/10

Технічні характеристики печі:

Потужність печі – 80 кВт;

Маса одноразового завантаження – 400 кг;

Маса садки нетто – 300 кг;

Витрата газу – 12-15 м/год.;

Розміри садки – 500x1000x320 мм;

Маса агрегату – 13 т;

Завантаження печі й ведення процесу цементації

Електропіч складається з камери нагрівання, тамбура з гартівним масляним баком у єдиному каркасі, щитів керування й механізму завантаження й розвантаження. У тамбурі печі й у камері нагрівання встановлені вентилятори для забезпечення циркуляції атмосфери печі.

Нагрівальну й гартівну камеру можна заповнювати захисною атмосферою, яка охороняє гартовані деталі від окиснення й обезвуглецювання. За допомогою ланцюгового механізму 6 кошик з деталями по напрямних роликах переміщують у нагрівальну камеру 1. Після нагрівання й витримки тим самим ланцюговим механізмом кошик переміщують у гартівну камеру 2 і разом зі столиком 3 занурюють у гартівну рідину (масло). Після охолодження столик піднімається пневмомеханізмом і кошик вивантажується з печі. Деталі нагріваються в результаті випромінювання електронагрівників 5 і конвективного теплообміну. Вентилятори 4, установлені в нагрівальній камері й у гартівному баку, призначені для інтенсифікації теплообміну й рівномірного нагрівання й охолодження деталей.

У даній механізованій електропечі проводять увесь цикл термічної обробки деталей – цементацію, загартування й відпустку.

Заключною операцією термічної обробки цементованих виробів зі сталі 20 є низька відпустка при 160-180°C, яка переводить мартенсит загартування в поверхневому шарі у відпущений мартенсит, що знімає напруження.

Таким чином, зміцнення сталі 20 проводили при наступних параметрах:

– газова цементація  $t = 930^{\circ}\text{C}$  (у якості карбюризатора використали природний газ);

- гартування  $t = 810^{\circ}\text{C}$  (вода);
- відпустка  $t = 180^{\circ}\text{C}$  (повітря).
- тривалість цементації 12 год.;
- товщина науглецьованого шару 1,2 мм;
- концентрація вуглецю у поверхневому шарі 1,0 %;
- твердість поверхні 63 HRC.

### 6.7 Обладнання для зміцнення сталей 20ХГНМ, 15ХГН2ТА, 45Х

Для гартування та відпустки зазначених сталей використовували механізовану електропіч СНЦ\_5.10. 3,2/10 (рис. 6.10). Отримані результати зведено у табл. 6.1.

**Таблиця 6.1 – Отримані результати зміцнення**

Марка сталі	t, °C	Середовище гартування	t, °C	Середовище відпустки	HRC
20ХГНМ	860	масло	160	повітря	60
15ХГН2ТА	900	масло	180	повітря	59
45Х	840	масло	520	вода	58

## 7 Дослідження зносостійкості сталей

### 7.1 Модель усталеного зносу

Порівняння досліджуваних сталей за зношуванням може бути виконано при наявності параметрів  $k_w$ ,  $m$  моделі усталеного зносу [28]:

$$\frac{du_w}{dS} = k_w \sigma^m \quad .. \quad (7.1)$$

Порівняння проводяться при фіксованому тиску  $\sigma_c$ . Знос, що відповідає цьому тиску:

$$u_w = k_w \sigma_c^m S_c \quad (7.2)$$

Порівняння проводять за фіксованого шляху тертя  $S = S_c$ .

Щоб порівняти матеріали з параметрами моделей  $k_{w1}$ ,  $m_1$ ,  $k_{w2}$ ,  $m_2$ ,  $k_{w3}$ ,  $m_3$ ,  $k_{w4}$ ,  $m_4$ .

Знос кожного матеріалу:

$$\begin{aligned} u_{w1} &= k_{w1} \sigma_c^{m1} S_c, \\ u_{w2} &= k_{w2} \sigma_c^{m2} S_c, \end{aligned}$$

Якщо взяти відношення цих величин, отримаємо порівняльний критерій зносу:

$$\frac{u_{w1}}{u_{w2}} = \frac{\sigma_c^{m1}}{\sigma_c^{m2}} \quad (7.3)$$

За ним судять про зносостійкість матеріалу.

### 7.2 Схема та формули розрахунку

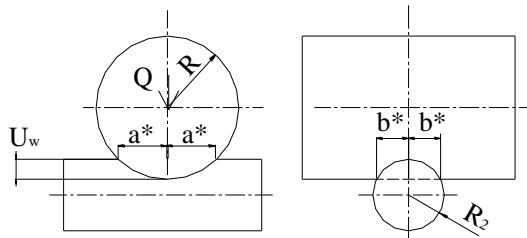


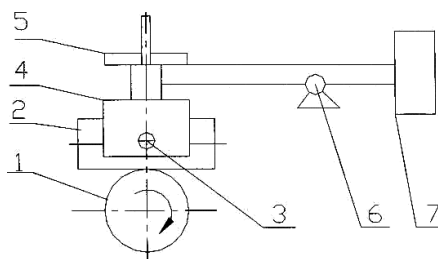
Рисунок 7.1 – Схема розрахунку (випробування по схемі «перехресні циліндри»)

Таблиця 7.1 – Формули розрахунку параметрів  $k_w$ ,  $m$  (випробування по схемі «перехресні циліндри»)

Параметри апроксимації, $\beta, C$	Параметр моделі, $m$	Параметр моделі, $k_w$
$a = (a^* b^*)^{\frac{1}{2}}; R = \frac{r_1 R_2}{R_1 + R_2}$ $a = CS^\beta$ $\beta = \frac{\lg a_1 / a_2}{\lg S_1 / S_2};$ $C = \frac{a_1}{S_1^\beta}$	$m = \frac{1 - 2\beta}{2\beta}$	$k_w = \frac{C^{2m+2}}{(2m+2)(Q/\pi)^m R}$
$\Delta a = C \Delta S^\beta;$ $C = \frac{\Delta a_1}{\Delta S_1^\beta}$ $\beta = \frac{\lg \Delta a_1 / \Delta a_2}{\lg \Delta S_1 / \Delta S_2}$	$m = (\beta - 1) \frac{\lg \Delta S_2 / \Delta S_1}{2 \lg a_1 / a_2} - \frac{1}{2}$	$k_w = \frac{a_1^{2m+1} C \beta (\Delta S_1)^{\beta-1}}{(2m+1)(Q/2\pi)^m R}$

### 7.3 Методика проведення досліджень

Щоб одержати залежності розміру площадки контакту  $a$  від шляху тертя  $S$ , проведено випробування на знос 4-х пар тертя на токарному станку зі спеціальним пристосуванням (рис. 7.2).



1 – вал; 2 – циліндричний зразок; 3 – гвинт; 4 – оправка; 5 – вантаж; 6 – опора; 7 – противага

Рисунок 7.2— Пристосування випробування на знос по схемі «перехресні циліндри»

У шпинделі станка вмонтовано вал 1 (сталь 45, HRC 54, контртіло). На ньому встановлено циліндричний зразок 2, який та притискається силою  $Q$  (вантажем 5). Зразок закріплюють до оправки 4 гвинтом 3. Щоб компенсувати масу пристосування, на іншому кінці тримача накручують противагу 7.

Щоб провести випробовування зі змащенням, на станок встановлюється ємність з мастилом (тобто обидва циліндри занурені у мастило синтетичне трансмісійне класу API GL-5).

Випробування проводять у наступній послідовності: – встановлюємо зразок у затискач 4; – піджимаємо зразок 2 гвинтом 3; – противагою 7 компенсуємо масу зразка; – на вісь затиску встановлюється вантаж; – вмикається верстат і засікається час; – через певний час виймаємо зразок і вимірюємо розміри площадки контакту; – встановлюємо зразок у затиск так, щоб пляма контакту розмістилась на попереднє місце. – повторюються попередні пункти до кінця проведення досліду.

#### 7.4 Результати випробувань і визначення параметрів моделі зносу

Випробування проводили за наступними умовами:

- частота обертання робочого вала (контртіла – зразка зі сталі 45)  $n = 600$  об/хв.;
- діаметр робочого вала  $d_g = 30$  мм;
- швидкість ковзання вала по втулці  $V = 0,8$  м/с;
- діаметр випробовуваного зразка (гартовані сталі 20ХГНМ, 15ХГН2ТА, 45Х, цементована та гартована сталь 20)  $d = 28$  мм;
- загальне навантаження на контакт  $Q = 0,8$  кг;
- мастило синтетичне трансмісійне класу API GL-5

Під час випробовувань через кожну 1 год. виміряли розміри осей еліптичної плями контакту  $2a^*$  і  $2b^*$  (рис. 7.1). Еквівалентний радіус кола:

$$a = (a^*b^*)^{1/2}. \quad (7.4)$$

Результати випробувань на знос зразків – у табл. 7.2.

Таблиця 7.2 – Результати випробувань на знос зразків (еквівалентні радіуси кіл, мкм)

Час t, год.	Сталь 20, цементация, гартування	Сталь 20ХГНМ, гартування	Сталь 15ХГН2ТА, гартування	Сталь 45Х, гартування
0	0	0	0	0
1	0,6	1	2,5	5,5
2	1,3	1,5	3,1	7
3	1,7	2,2	3,6	8,3
4	2,3	2,8	4,5	9,5
5	3	3,4	5	11
6	3,3	3,8	5,7	12,5
7	3,6	4,2	6,5	14,5
8	3,8	4,6	7,5	16,5

Залежності еквівалентних радіусів кіл від часу тертя зразків наведена на рис. 7.3.

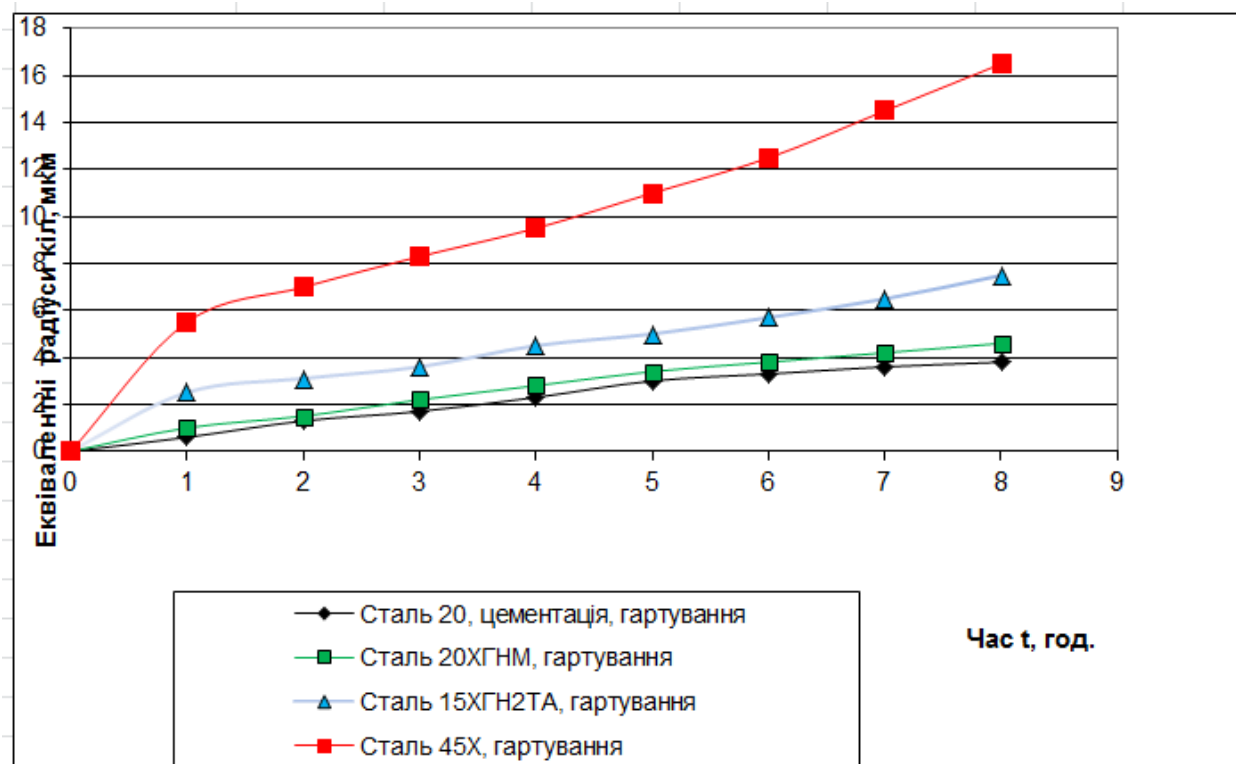


Рисунок 7.3 – Порівняння залежностей розмірів еквівалентних радіусів кіл від часу тертя

## 7.5 Порівняння зразків за зношенням

Для зразків сталей 20ХГНМ, 15ХГН2ТА, 45Х, інтенсивність зношення:

$$\begin{aligned} I_{20\text{ХГНМ}} &= (a_8 - a_3)/(t_8 - t_3) = \\ &= (4,6 - 2,2)/(8 - 3) = \\ &= 0,48 \text{ мм/год.} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_{15\text{ХГН2ТА}} &= (a_8 - a_3)/(t_8 - t_3) = \\ &= (7,5 - 3,6)/(8 - 3) = \\ &= 0,78 \text{ мм/год.} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_{45\text{Х}} &= (a_8 - a_3)/(t_8 - t_3) = \\ &= (16,5 - 8,3)/(8 - 3) = \\ &= 1,64 \text{ мм/год.} \end{aligned}$$

Для зразка цементованої та гартованої сталі 20 інтенсивність зношення:

$$\begin{aligned} I_{20} &= (a_8 - a_3)/(t_8 - t_3) = \\ &= (3,8 - 1,7)/(8 - 3) = \\ &= 0,42 \text{ мм/год.} \end{aligned}$$

Таким чином, підвищення зносостійкості становить:

$$I_{20\text{ХГНМ}} / I_{20} = 0,48 / 0,42 = 1,14 \text{ р.}$$

$$I_{15\text{ХГН2ТА}} / I_{20} = 0,78 / 0,24 = 3,25 \text{ р.}$$

$$I_{45X} / I_{20} = 1,64 / 0,24 = 6,83 \text{ p.}$$

## Висновки

Розглянута конструкція, ремонт і технічне обслуговування заднього мосту автомобіля МАЗ-5551. Проведені наступні розрахунки: підбір матеріалу для основних деталей; визначення числа зубів шестірні головної передачі, розрахунковий момент; розрахунок зубів на втому при вигині, міцності зубчастих коліс і валів головної передачі.

Для дослідження міцності вал-шестерні (сталь 20ХГНМ) та веденої конічної шестірні (сталь 15ХГН2ТА) головної передачі, фланця (сталь 45Х) заднього мосту застосовано SolidWorks Simulation (відображені контурні графіки сумарних напружень von Mises, переміщень URES, деформацій ESTRN і запасу міцності FOS).

Встановлено, що у випадку заміни цих сталей на сталь 20 запас міцності достатній (допустимий коефіцієнт запасу міцності більше допустимого): з точки зору забезпечення міцності для виготовлення цих деталей заміна їх матеріалу є можливою. Але, враховуючи умови роботи цих деталей, для підвищення їх зносостійкості рекомендується хіміко-термічна обробка.

Порівняння досліджуваних сталей за зношуванням виконано при наявності параметрів  $k_w$ ,  $m$  моделі усталеного зносу: наведені схема («перехресні циліндри») та формули для розрахунку, методика проведення досліджень, результати випробувань і визначені параметри моделі зносу. У випадку заміни гартованих сталей 20ХГНМ, 15ХГН2ТА, 45Х на цементовану та гартовану сталь 20 інтенсивність зношування зменшується в 1,14 рази.

## Список використаних джерел

1. МАЗ-5551 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://ru.wikipedia.org/wiki/МАЗ-5551>
2. Конструкція заднього мосту МАЗ-5551, 5335 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [http://spezz.ru/maz\\_5335\\_5551\\_zadnii\\_most.html](http://spezz.ru/maz_5335_5551_zadnii_most.html)
3. Ремонт деталей заднього мосту МАЗ-5551, 5549, МАЗ-5335, 5336, 5337 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [http://spezz.ru/maz\\_5335\\_5551\\_remont\\_zadnego\\_mosta.html](http://spezz.ru/maz_5335_5551_remont_zadnego_mosta.html)
4. Задній міст МАЗ — ремонт і складання [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://everest-autokam.ru/news/zadniy-most-maz/>
5. Колосюк Д.С., Зеркалов Д.В. Експлуатаційні матеріали: підручник. 2-ге видання, доповнене. – К.: Арістей, 2005. – 241 с.
6. Кисликов В. Ф. Будова й експлуатація автомобілів: підручн. / В. Ф. Кисликов, В. В. Луцик. — К.: Либідь, 2006. – 400 с.
7. Коваленко В. М. Діагностика технологія ремонту автомобілів : підручн. / В. М. Коваленко, В. К. Щуріхін. — Київ: Літера ЛТД, 2017. — 224 с. – [Електронний ресурс].
8. SolidWorks. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://solidworks.com.ua>
9. Алямовский А. А. SolidWorks Simulation. Как решать практические задачи / А. А. Алямовский – БХВ-Петербург, 2012. – 448 с.
10. Rudyk O. Yu. Computer simulation of driven cog-wheel of back bridge MAZ car / O. Yu. Rudyk, O. Yu. Olianskyi, A. O. Mosyondz // Topical issues of the development of modern science. Abstracts of the 7th International scientific and practical conference. Publishing House “ACCENT”. – Sofia, Bulgaria, 2020. –Pp. 77-84.
11. Сталь 20ХГНМ: характеристики, расшифровка, химический состав [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://metal.place/ru/wiki/20khgnm/>
12. Характеристика материала 20ХГНМ [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [http://www.splav-kharkov.com/mat\\_start.php?name\\_id=548](http://www.splav-kharkov.com/mat_start.php?name_id=548)

13. Сталь конструкционная 20ХГНМ [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://metallichekiy-portal.ru/marki\\_metallov/stk/20XGHM](https://metallichekiy-portal.ru/marki_metallov/stk/20XGHM)
14. Характеристика материала 20ХГНМ [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.m-invest.ru/spravochniki/marochnik-staley/stal-konstrukcionnaya-legirovannaya/20hgnm/>
15. Сталь 15ХГН2ТА [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://www.mzstal.ru/auxpage\\_15hgn2ta/](https://www.mzstal.ru/auxpage_15hgn2ta/)
16. Сталь конструкционная 15ХГН2ТА [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://hotsteel.by/material/stal-konstruktsionnaya-15hgn2ta/>
17. Характеристика материала 15ХГН2ТА [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.splav-kharkov.com/mat\\_start.php?name\\_id=543](http://www.splav-kharkov.com/mat_start.php?name_id=543)
18. Сталь 15ХГН2ТА (15ХГНТА) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://evek.org/materials/stal-15hgn2ta-15hgnta.html>
19. Конструкционная легированная сталь 45Х [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.lsst.ru/spravochnik-metalloprokata/konstruktsionnaya-stal/konstruktsionnaya-legirovannaya-stal-45kh-/>
20. Марка стали 20 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://metallichekiy-portal.ru/marki\\_metallov/stk/20](https://metallichekiy-portal.ru/marki_metallov/stk/20)
21. Цементация стали 20 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://pellete.ru/stal/cementaciya-stali-20.html>
22. Цементация стали [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://stankiexpert.ru/spravochnik/materialovedenie/cementaciya-stali.html>
23. Все о цементации металла на примере стали [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://met-all.org/obrabotka/himicheskaya/vse-o-tsementatsii-metalla-na-primere-stali.html>
24. Цементация [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://karbaz.com.ua/nashi-uslugi/cementacija/>
25. Сталь 20 конструкционная углеродистая качественная [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.nttzm.ru/spravochnik/stali/stal-20/>

26. Оборудование для цементации стали [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://spb-metalloobrabotka.com/oborudovanie-dlya-tsementatsii-stali/>
27. Оборудование для цементации [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://studbooks.net/2443256/tehnika/oborudovanie\\_tsementatsii](https://studbooks.net/2443256/tehnika/oborudovanie_tsementatsii)
28. Кузьменко А.Г. Методи розрахунків і випробувань на зношування та надійність / Навч. посібн. – Хмельницький, ХДУ – 2002. – 150 с.
29. Задний мост автомобилей МАЗ-5551, 5549, МАЗ-5335, 5336, 5337 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://autotextrans.ru/zadnij\\_most\\_maz\\_5551.html](https://autotextrans.ru/zadnij_most_maz_5551.html)

## Додатки

**Наукові праці**

# CERTIFICATE

is awarded to

**Korobka Ivan**

for being an active participant in  
VI International Scientific and Practical Conference  
“SCIENCE AND EDUCATION: PROBLEMS,  
PROSPECTS AND INNOVATIONS”

24 Hours of Participation  
(0,8 ECTS credits)



**KYOTO**

3-5 March 2021

[sci-conf.com.ua](http://sci-conf.com.ua)



295

Psol S. V. CAD/CAE-systems in the study of performance of the off-road differential / S. V. Psol, O. Yu. Rudyk, I. V. Korobka // Science and education: problems, prospects and innovations. Abstracts of the 6th International scientific and practical conference. CPN Publishing Group. – Kyoto, Japan. 2021. – Pp. 79-84. – URL: <https://sci-conf.com.ua/vi-mezhdunarodnaya-nauchno-prakticheskaya-konferentsiya-science-and-education-problems-prospects-and-innovations-3-5-marta-2021-goda-kioto-yaponiya-arhiv/>

Repozytar: <http://elar.khnu.km.ua/jspui/handle/123456789/10147>

Збірник: <https://sci-conf.com.ua/wp-content/uploads/2021/03/SCIENCE-AND-EDUCATION-PROBLEMS-PROSPECTS-AND-INNOVATIONS-3-5.03.21.pdf>

**SCI-CONF.COM.UA**

# **SCIENCE AND EDUCATION: PROBLEMS, PROSPECTS AND INNOVATIONS**



**ABSTRACTS OF VI INTERNATIONAL  
SCIENTIFIC AND PRACTICAL CONFERENCE  
MARCH 3-5, 2021**

**KYOTO  
2021**

UDC 001.1

The 6<sup>th</sup> International scientific and practical conference "Science and education: problems, prospects and innovations" (March 3-5, 2021) CPN Publishing Group, Kyoto, Japan. 2021. 643 p.

ISBN 978-4-9783419-5-2

The recommended citation for this publication is:

*Ivanov I. Analysis of the phonetic composition of Ukraine // Science and education: problems, prospects and innovations. Abstracts of the 6th International scientific and practical conference. CPN Publishing Group, Kyoto, Japan. 2021. Pp. 21-27. URL: <https://sci-conf.com.ua/vi-mezhdunarodnyu-nauchno-prakticheskuu-konferentsiu-science-and-education-problems-prospects-and-innovations-3-5-marta-2021-goda-kyoto-japan/ua/ebiv/>*

**Editor**

**Komarytsky M.L.**

*Ph.D. in Economics, Associate Professor*

Collection of scientific articles published is the scientific and practical publication, which contains scientific articles of students, graduate students, Candidates and Doctors of Sciences, research workers and practitioners from Europe, Ukraine, Russia and from neighbouring countries and beyond. The articles contain the study, reflecting the processes and changes in the structure of modern science. The collection of scientific articles is for students, postgraduate students, doctoral candidates, teachers, researchers, practitioners and people interested in the trends of modern science development.

**e-mail: [kyoto@sci-conf.com.ua](mailto:kyoto@sci-conf.com.ua)**

**homepage: <https://sci-conf.com.ua>**

©2021 Scientific Publishing Center "Sci-conf.com.ua" ®

©2021 CPN Publishing Group ®

©2021 Authors of the articles

**CAD/CAE-SYSTEMS IN THE STUDY OF PERFORMANCE  
OF THE OFF-ROAD DIFFERENTIAL**

**Psol Serhij Vasylyovych**

Ph.D., Associate Professors

National Academy of the State

Border Guard Service of Ukraine  
named after Bohdan Khmelnytskyi

**Rudyk Oleksandr Yuhymovych**

Ph.D., Associate Professors

**Korobka Ivan Vasylyovych**

undergraduate

Khmelnytsky National University

Khmelnytsky, Ukraine

**Abstract:** reconnaissance of satellites of the differential of the front axle of the car LuAZ-1301 was carried out. SolidWorks/SolidWorks Simulation was used as a CAD/CAE system. Determined the maximum stresses, displacements, deformations, the minimum coefficient of margin of safety.

**Keywords:** satellites, differential, SolidWorks Simulation, stress, displacement, strain, margin of safety.

The main information systems for supporting the process of designing technical systems are integrated modern computer-aided design (CAD) systems. Typical examples of complex CAD systems are CAD/CAE systems [1, 2]. CAD systems are used to carry out the design phase of geometric design procedures. Their functions in geometric design are divided into two-dimensional (2D) and three-dimensional (3D) design functions.

2D functions include drafting, design documentation; to 3D functions – obtaining three-dimensional models, metric calculations, realistic visualization, mutual transformation of 2D and 3D models. The functions of CAE systems are quite diverse, as they are associated with design procedures for analysis, modeling, and optimization of design solutions.

The composition of CAE-systems, traditionally called mechanical engineering, primarily include programs for modeling fields of physical quantities, including strength analysis. It is most often performed according to the finite element method (FEM).

The essence of FEM is to approximate a continuous medium with an infinitely large number of degrees of freedom by a set of subregions (or elements) having a finite number of degrees of freedom [3]. The relationship is established between these elements. Recognition of the method is explained by the simplicity of its physical interpretation and mathematical form.

With regard to the differential, this is a mechanism in a car that distributes the torque of the transmission propeller shaft between the drive wheels of the front or rear axle (depending on the type of drive), allowing each of them to rotate without slipping. This is the main purpose of the differential.

In rectilinear motion, when the wheels are equally loaded and have the same angular speed of rotation, the mechanism works as a transmission link. If the driving conditions change (turning, slipping), the load becomes uneven. It becomes necessary for the axle shafts to rotate at different speeds, and, as a result, it becomes necessary to distribute the obtained torque between them in a certain ratio. Then the unit performs a second important function: ensuring safe maneuvering of the car (slipping of the wheels is eliminated and each of them rotates at the speed that is necessary for safe movement).

A bevel differential is a planetary gearbox that includes side gears with satellites placed in a housing (another name is a differential cup) and receives torque from the main gear. He transfers it through satellites to side gears.

The satellites (play the role of a planetary gear) provide a connection between the housing and the side gears. When driving in a straight line, the wheels meet equal road resistance. The torque from the main gear is transmitted to the differential housing, with which the satellites move. They, running around the half-axle gears, transmit torque to the drive wheels in an equal ratio. Since the satellites on the axles do not rotate, the side gears move with equal angular velocity. In this case, the rotational speed of each of the gears is equal to the rotational speed of the driven gear of the main drive.

When cornering, the inner drive wheel (closer to the center of the turn) encounters more resistance than the outer drive wheel. The inner side gear slows down and causes the satellites to rotate around their axis, which in turn increases the speed of the outer side gear. The movement of the driving wheels at different angular speeds allows cornering without slipping.

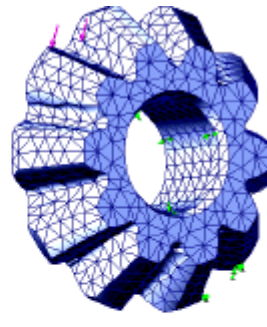
Regarding the research topic: as an example of the use of CAD/CAE-systems, the exploration of the satellites of the differential of the front axle of the car LuAZ-1301 – a compact SUV (wheel formula – 4x4) with a engine MeMZ-2457 with a capacity of 58 hp (maximum torque 90 N\*m, gear ratios: main gear 3,875, first gear of gearbox 3,454).

The load on the tooth of the satellite and half-axle gears (9410.8 N) was determined from the condition that the circuitous force is equally distributed between all the satellites, and each satellite transmits the force by two teeth (9411 N was taken for calculations).

In the first stage of computer modeling, SolidWorks creates a 3D model of the satellite. On the second – the software module SolidWorks Simulation is applied to the model: the type of stress-strain study is chosen – static analysis [4, 5]. At its carrying out appoint material of a detail (steel 20XH3A), choose places of fastening (in this research – the fixed hinge) and application of external loadings.

The model is then divided into small particles of simple shape (elements) connected at common points (nodes): the finite element analysis program considers the model as a network of discrete interconnected elements (grid) – fig. 1.

Сетка Детализация	
Имя исследования	Статический анализ 1 (1)
Тип сетки	Сетка на твердотель
Использование разбиения	Стандартная сетка
Адаптируется ли элементная сетка	Выкл.
Включить адаптивную сетку	Выкл.
Точка Якобиана для сетки высокого качества	4 точки
Размер элемента	2.495027mm
Длина	8.122596mm
Качество (QJMN)	1.600499
Всего узлов	3209
Всего элементов	7730
Максимальное соотношение сторон	5.1711
Процент элементов с соотношением сторон < 3	99.3
Процент элементов с соотношением сторон > 10	0
Процент некачественных элементов	0
Число использованных элементов	0
Время для построения сетки (Мин:сек)	00:00:10



**Fig. 1. Parameters of the grid (a) and its reflection on the solid (b)**

SolidWorks Simulation software develops algebraic equations based on the connections between elements. They associate the reaction with the property of the material, the limitation and the load. After arranging the equations into a large common system are the unknowns.

The results of static analysis are displayed in the form of a color gradient, which shows the color change distribution of the calculated parameters. It is established that for the satellite the nodal maximum stresses Von Mises, URES displacement and equivalent deformation ESTRN are 176 MPa (node 10447), 0.02019 mm (node 267), and 0.000592 mm (element 1743), ie do not exceed the allowable values (fig. 2). The minimum strength factor FOS is  $n = 4,176$ , ie above the allowable, which is  $[n] = 3$ .

Thus, according to the results of the stress-strain state of the model after the application of static load, we can talk about the adequacy of the constructed model and the prospects of computer modeling. With the help of the virtual model it became possible to analyze not only the stresses, displacements and equivalent deformations of the satellite, but also its margin of safety. An additional advantage of modeling in SolidWorks Simulation is the ease of graphical presentation of research results.

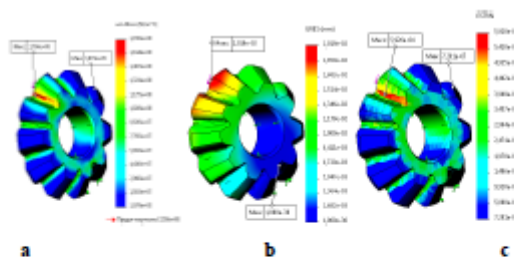


Fig. 2. Diagram of the distribution of nodal stresses of the satellite (a), displacements (b), deformations (c)

#### LIST OF REFERENCES

1. Psol S. V. Impact of blow on the stability of details of wheeled machines / S. V. Psol, S. Gramenko, O. Yu. Rudyk // The world of science and innovation. Abstracts of the 6th International scientific and practical conference. Cognum Publishing House. – London, United Kingdom. 2021. – Pp. 217-224. – URL: <https://sci-conf.com.ua/vi-mezhdunarodnaya-nauchno-prakticheskaya-konferentsiya-the-world-of-science-and-innovation-14-16-yanvary-2021-goda-london-velikobritaniya-arhiv/>
2. Androshchuk M. V. Using of SolidWorks for prognostication of durability of materials [Electronic resource] / M. V. Androshchuk, O. V. Dykha, O. Yu. Rudyk. – Access mode: <http://elar.khnu.km.ua/jspui/handle/123456789/8468>
3. Rudyk O. Yu. SolidWorks as an innovative means for studying the disciplines of automobile profile / O. Yu. Rudyk, O. V. Dykha // «System technologies» 3 (128) 2020. – Pp. 21-35. – URL: <https://journals.nmetau.edu.ua/index.php/st/article/view/178>
4. Rudyk O. Yu. Using of SolidWorks for simulation of screw puller of bearings / O. Yu. Rudyk, P. V. Kaplun, R. V. Solovyov // World science: problems, prospects and innovations. Abstracts of the 5th International scientific and practical conference. Perfect Publishing. – Toronto, Canada. 2021. – Pp. 185-191. – URL: <https://sci-conf.com.ua/v-mezhdunarodnaya-nauchno-prakticheskaya-konferentsiya-world-science-problems-prospects-and-innovations-27-29-yanvary-2021-goda-toronto-kanada-arhiv/>

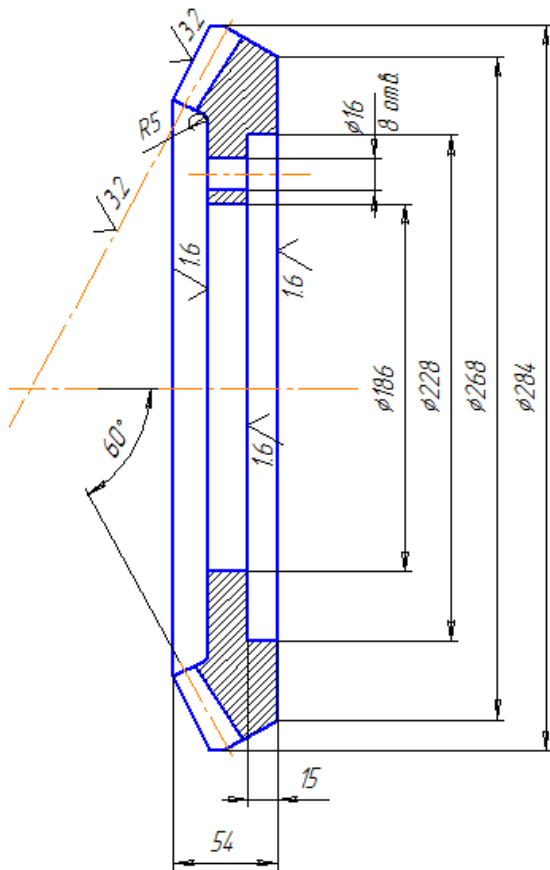
83

[konferentsiya-achievements-and-prospects-of-modern-scientific-research-11-13-yanvary-2021-goda-buenos-ajres-argentina-arhiv/](https://sci-conf.com.ua/vi-mezhdunarodnaya-nauchno-prakticheskaya-konferentsiya-achievements-and-prospects-of-modern-scientific-research-11-13-yanvary-2021-goda-buenos-ajres-argentina-arhiv/)

5. Psol S. V. Using SolidWorks to ensure passability of automotive equipment / S. V. Psol, Y. Leshchak, O. Yu. Rudyk // Achievements and prospects of modern scientific research. Abstracts of the 2nd International scientific and practical conference. Editorial EDULCP. – Buenos Aires, Argentina. 2021. – Pp. 140-146. – URL: <https://sci-conf.com.ua/ii-mezhdunarodnaya-nauchno-prakticheskaya-konferentsiya-achievements-and-prospects-of-modern-scientific-research-11-13-yanvary-2021-goda-buenos-ajres-argentina-arhiv/>

**Графічне забезпечення дипломної роботи**





Зовнішній коловий модуль	$m_o$	9.8
Число зубів	$z$	32
Тип зуба	--	Прямий
Нормальний вихідний контур	--	ГОСТ 137554-81
Коефіцієнт зміщення	$x_o$	-0.4
Коефіцієнт зміни товщини зуба	$x_T$	0
Кут ділительного конуса	$\delta$	24
Ступінь точності по ГОСТ 1758-81	--	8-B
Постійна хорда зуба у виміральному перетині	$S_{ca}$	$5.650_{-0.381}^{-0.148}$
Висота до постійної хорди	$h_{ca}$	
Міжосьовий кут передачі		$90^\circ$
Середній коловий модуль	$m_m$	6.45
Зовнішня конусна відстань	$R_e$	167.5
Середня конусна відстань	$R$	140
Середній ділительний діаметр	$d$	120
Кут конуса западин	$\delta_1$	16

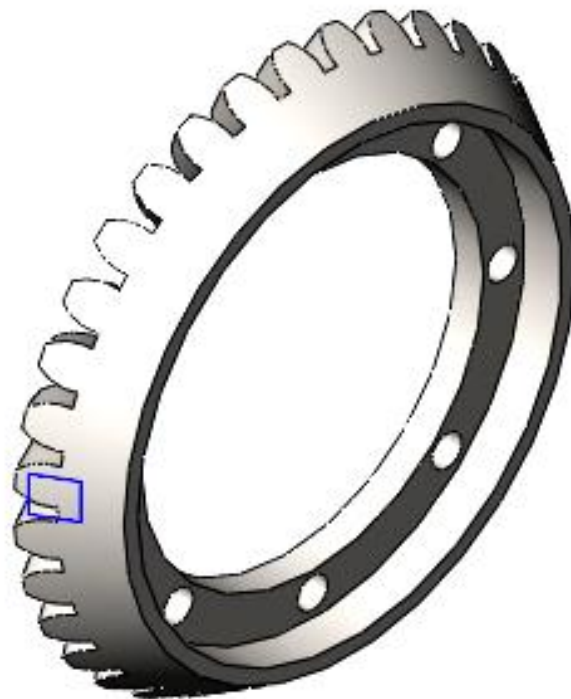


Рисунок Б2 – Ведена конічна колесо головної передачі (Compas-3D, SolidWorks)

