

В. М. КРАСНОКУТСЬКИЙ

МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ЕЛЕМЕНТІВ МОДЕРНІЗОВАНОЇ РАМИ ТРАКТОРНОГО САМОХІДНОГО ШАСІ ПРИ АГРЕГАТУВАННІ З ФРОНТАЛЬНИМ НАВАНТАЖУВАЧЕМ

У статті виконаний моніторинг тракторних самохідних шасі та типів їх рам. Розглянуті перспективні схеми універсально-просапних самохідних машин із використанням різноманітних рам. Показані найбільш відомі області застосування тракторного самохідного шасі у сільському, лісному, комунальному та дорожньо-будівельному господарствах із використанням різноманітного спеціалізованого навісного та причіпного обладнання. Виконано проєктувальний розрахунок несучої здатності модернізованої рами та її напружено-деформованого стану її елементів рами при агрегуванні з фронтальним навантажувачем. Виконані робочі та складальні креслення модернізованої рами. Описано конструкцію модернізованої рами. Показано недоліки та переваги різних типів рам. Акцентовано увагу, що для проведення аналізу напружено-деформованого стану рами навантажувача використовують складальну модель у вигляді копії збірки вузла, яка виключає всі деталі, відсутність яких не впливатиме на результати проведених розрахунків. Різні компоновальні схеми, перерозподіл нормальних реакцій по осях та специфіка силового впливу відрізняють тягову динаміку тракторного самохідного шасі від тягової динаміки трактора. Розроблена розрахункова схема навантаження рами фронтального навантажувача для дослідження з використанням інструменту "Аналіз напруження AIP" Autodesk Inventor. Підтверджено, що умови міцності забезпечуються по всій довжині елементів рами навантажувача, що підтверджується з епюри розподілення коефіцієнту запасу міцності. Найбільші деформації виникають у лонжероні у вертикальному напрямку і складають 2,2 мм. Найбільш напруженою є передня частина рами, а саме місця з'єднання кронштейнів передньої рами та вісі шарніру переднього мосту. Розглянуто компоновку тракторних самохідних шасі та її вплив на тягово-зчіпні якості та маневреність (стійкість, керованість, поворотність). Проаналізовано публікації провідних вчених у даній галузі.

Ключові слова: машинобудування, тракторне самохідне шасі, рама та її елементи, напружено-деформований стан, розрахунок напружено-деформованого стану, фронтальний навантажувач, складальна модель

V. KRASNOKUTSKYI

METHOD OF CALCULATING THE STRESS-DEFORMED STATE OF ELEMENTS OF THE MODERNIZED FRAME OF A TRACTOR SELF-PROPELLED CHASSIS WHEN ASSEMBLED WITH A FRONT LOADER

This article reviews self-propelled tractor chassis and their frame types. Promising designs of universal row-crop self-propelled machines using various frames are considered. The most common areas of application for tractor self-propelled chassis in agriculture, forestry, municipal services, and road construction are presented, utilizing a variety of specialized mounted and towed equipment. Design calculations were performed for the load-bearing capacity of the modernized frame and the stress-strain state of the elements of the self-propelled frame of the tractor chassis when coupled with a front loader. Working and assembly drawings of the modernized frame were prepared. The design of the modernized frame is described. The advantages and disadvantages of various frame types are presented. It is emphasized that, to analyze the stress-strain state of a loader frame, an assembly model is used in the form of a replica of the assembly, which excludes all components whose absence will not affect the results of the calculations. Different layout schemes, the redistribution of normal reactions along the axes, and the specifics of the force application distinguish the traction dynamics of a self-propelled tractor chassis from those of a tractor. A computational load diagram of the front loader frame has been developed for analysis using the "AIP Stress Analysis" tool in Autodesk Inventor. It has been confirmed that the strength requirements are met along the entire length of the loader frame elements, as evidenced by the safety factor distribution diagram. The greatest deformations occur in the side member in the vertical direction and amount to 2.2 mm. The most stressed part of the frame is the front section, specifically the connection points of the front frame brackets and the front axle hinge. The layout of self-propelled tractor chassis and its impact on traction and handling characteristics (stability, controllability, maneuverability) are examined. Publications by leading scientists in this field are analyzed.

Keywords: mechanical engineering, self-propelled tractor chassis, frame and its components, stress-strain state, stress-strain analysis, front loader, assembly model

Вступ. У сучасних умовах поряд з широко розповсюдженою компоновкою колісних тракторів з'являються нові компоновання, які забезпечують раціональне виконання технологічних процесів у сільському, лісному, комунальному та дорожньому господарствах. До їх числа відноситься тракторні самохідні шасі (ТСШ).

На базі модифікації ТСШ з високим колісним просвітом здійснюється комплексна механізація робіт по вирощуванню та збору чаю та інших культур. На базі модифікації з низьким дорожнім просвітом виконуються транспортні роботи в теплицях.

Різні компоновальні схеми, перерозподіл нормальних реакцій по осях та специфіка силового впливу відрізняють тягову динаміку ТСШ від тягової динаміки трактора [1, 2]. Формування тягових характеристик тракторного самохідного шасі визначається, зокрема, параметрами силового агрегату та режимами його роботи [3].

Збільшення навантаження на ведучі колеса ТСШ збільшує його тягово-зчіпні якості, а міжосьове, заднє та переднє навішування агрегатів забезпе-

чує високий ступінь універсальності [1, 4] та необхідну маневреність (стійкості, керованості, поворотності), що забезпечує підвищення агротехнічної якості робіт, які виконуються. Дослідження показують, що ефективність роботи тракторних агрегатів суттєво залежить від режимів навантаження та умов взаємодії з робочим середовищем [4]. При цьому ефективність реалізації тягового зусилля значною мірою залежить від стабільності зчіпної маси та умов взаємодії рушія з опорною поверхнею [5].

Мета роботи – обґрунтування та розрахунок напружено-деформованого стану елементів модернізованої рами ТСШ складає предмет даної статті.

Моніторинг тракторних самохідних шасі. Тракторне самохідне шасі – серійний транспортний моторизований засіб, виконаний на базі вузлів і агрегатів тракторів. Тракторні самохідні шасі поділяють на універсальні і спеціальні [6].

Універсальні самохідні шасі. Від звичайного трактора самохідне шасі відрізняється компонован-

© В.М. Краснокутський, 2026

ням: мотор компактно розташований за кабіною, а перед кабіною знаходиться відкрита рама і передній міст. Рама зазвичай двохбалочна, рідше – однобалочна. На раму кріпиться різне навісне сільськогосподарське або спеціальне обладнання, у базовій комплектації – кузов-самоскид. Завдяки тому, що обладнання знаходиться перед кабіною, його добре видно і його роботою легко керувати. Управління навісними знаряддями проводиться за допомогою гідравлічної системи. Устаткування для універсального ТСШ зазвичай швидко встановлюється.

Зазвичай, значна частина вузлів і деталей ТСШ уніфікована з близькими за характеристиками колісними універсально-просапними тракторами.

Нескладні в обслуговуванні і економічні у експлуатації ТСШ користуються високим попитом. Цьому сприяє широкий асортимент фірмового навісного і причіпного обладнання, ремонтпридатність усіх систем, уніфікація запасних частин, доступність і самостійна заміна деталей різних рівнів складності [6, 7].

Зміна довжини рами дозволяє використовувати широкий асортимент спеціальних пристосувань і знарядь. Найбільш відомі області застосування: у сільському господарстві (в теплицях і на тваринницьких фермах всередині приміщень), при роботі з обприскувачами, при роботах з навісними і причіпними комбайнами (зазвичай, овочезбиральні), на чайних, тютюнових і ягідних плантаціях (спеціальна модифікація з високим дорожнім просвітом). В умовах малих фермерських та особистих селянських господарств ТСШ в агрегаті з навісними машинами широко використовується для культивування, посіву з одночасним внесенням добрив, опилування та обприскування, підкормки посівів добривами, убирання овочів та трав, навантаження сільськогосподарських та інших вантажів, скиртування тощо. Крім того, вони виконують роботи в зонах з малою контурністю земельних угідь та завдяки високій маневреності в агрегаті з навісною самоскидною платформою широко використовуються для транспортних робіт на фермах [1, 2]. У лісовому господарстві при роботі з лісосадильними машинами та грейдерним обладнанням. У комунальному та дорожньо-будівельному господарствах (тротуароприбиральні і снігозбиральні машини, машини для нанесення розмітки доріг, грейдери, грейфери фронтальні навантажувачі, ремонтні машини з компресором для пневматичних інструментів, зварювальні агрегати), на складах (навантажувачі, підйомники (модифікація з укороченою рамою) тощо.

На платформі ТСШ (рис. 1) випускаються машини різного призначення: екскаватори, вишки, крани, віброущільнювачі. Встановлювалося обладнання для дорожньої розмітки, прибирання вулиць та, звичайно ж, маса сільськогосподарських агрегатів.

У список навісних агрегатів і машин входять: плуг двокорпусний для оранки ґрунтів з питомим опором до 0,9 кг/см під зернові і технічні культури в усіх ґрунтово-кліматичних зонах; культиватор і культиватор-окучувач; фрези садові для суцільного обробітку ґрунту; борона дискова і сітчаста; окучники; різні картоплезажалки і картоплекопачі; обприскувачі; бур садовий для масового викопування ям під посадку плодкових і ягідних культур; різні косарки; розкидач піску; пиросос садовий; снігоочисник

шнекороторний.



Рисунок 1 – Тракторне самохідне шасі на базі Т-16

З усього переліку навішувань користуються найбільшим попитом обладнання для обробки ґрунту, сінокосарки, навантажувачі, обприскувачі та фірмові кузова з гідравлічним фронтальним або бічним розвантаженням (рис. 2).



Рисунок 2 – Фронтальний навантажувач на ТСШ

У ФРН самохідні шасі випускаються на заводі Fendt. Представником ТСШ є Fendt F345GT (рис. 3).



Рисунок 3 – Тракторне самохідне шасі Fendt F345GT

ТСШ Т-16МГ обладнаний дизельним двоциліндровим двигуном потужністю 13,6 кВт (16 к.с.). Середня витрата дизельного палива 274 г/кВт на годину вважається досить економічною. Цей параметр силового агрегату отриманий за рахунок передкамерного сумішоутворення.

Особливість конструкції двигуна Д-16 – використання корпусу картера як остову. Доступ до шестерень приводів забезпечується через передню кришку з сапуном і заправною горловиною.

Транспортна швидкість машини до 40 км/год, коробка передач має шість швидкостей із демультіплікатором-сповільнювачем, маса 1,43 т, вантажоємність 750 кг.

Т-16МГ має легку знімну одномісну кабіну з посиленним каркасом, більш зручну рульову колонку і доопрацьований плунжерний перемикач бортової гідравліки. Жорстка каркасна кабіна забезпечує нормальні умови для роботи в різних кліматичних зонах, а також безпеку оператора в разі перекидання трактора. Кабіна задовольняє вимогам директиви ЄС 79/622, що дає мо-

жливості міжнародної сертифікації.

У комплект бортової роздільно-агрегатної гідравліки ТСШ входить продуктивний шестеренний насос, розподільник плунжерного типу, бак для масла, два виконавчих гідроциліндра і оливопроводи.

Великою перевагою ТСШ є їх габарити.

Базове ТСШ має розміри 3,82x2x2,6 метра. Вага машини – 1,69 тони. Високий агротехнічний просвіт 0,56 м. Маневреність ТСШ у закритих приміщеннях і невеликих майданчиках забезпечується невеликим радіусом розвороту.

Трансмісія ТСШ – механічна. Крутний момент передається на реверсивну коробку передач через зчеплення постійно-замкнутого типу, діапазон робочих і транспортних швидкостей варіюється від 3,74 до 16 км/год. Для версії з ходозменшувачем ці показники становлять 1,6-23,3 км/год. До трансмісії підключені два незалежних ВВП і один синхронний.

На ТСШ, на відміну від трактора, дизельний двигун і силова передача розміщені ззаду, а передня частина є відкритою трубчастою рамою. Центр ваги зміщений з осі задніх коліс, що забезпечує краще зчеплення з ґрунтом. Це також впливає на навантаження в елементах рульового керування та загальну стійкість руху машини [8]. Трубчаста рама шасі призначена для установки платформи, навісних агрегатів і машин, при цьому забезпечується хороший огляд і активний контроль за виконанням планових робіт.

ТСШ комплектується сертифікованим тягово-зчепним пристроєм для буксирування причепа. На шасі можуть також встановлюватися: пневмосистема, ВВП передній і задній, а також інші робочі органи (рис. 4).



Рисунок 4 – Тракторне самохідне шасі в агрегативанні з навісним двокорпусним плугом

Існуючі типи ТСШ з фіксованим по висоті положенням одно- або двобрусної рами мало пристосовані для розміщення цілісних навісних машин у нижній, середній і верхній зонах міжосьового простору. Тому у ТСШ з універсальною (комбінованою) рамою рама може переобладнуватися в одно- або двобрусну і змінювати своє положення по висоті. Універсальна рама ТСШ складається з двох С-подібних секцій, кінці яких шарнірно з'єднані з переднім і заднім поперечним брусами. Завдяки шарнірній установці і спеціальному приводу кожна секція або обидві разом можуть повертатися відносно умовної осі установки її шарнірних кінців, займаючи відповідне фіксоване положення у верхній, середній і нижній зонах міжосьового простору. Така конструкція рами дозволяє здійснювати менш трудомістку навіску компактних навісних машин і знарядь в будь-якій зоні міжосьового простору.

Рама обладнана поперечними і поздовжніми С-подібними брусами. Останні шарнірно з'єднані з поперечними брусами. Кінцеві шарніри обох поздовжніх брусів 7 мають спільну вісь обертання, відносно якої вони по одному або обидва одночасно можуть бути повернені і зафіксовані в одному з положень (рис. 5).

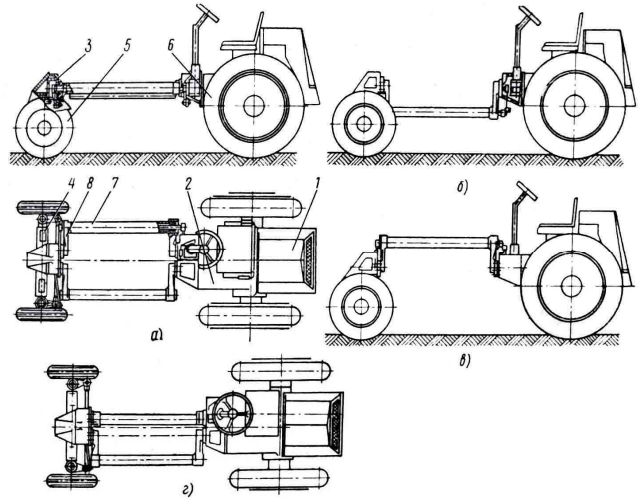


Рисунок 5 – ТСШ з комбінованою рамою: а), б), в), з) – варіанти положень брусів рами

У середньому положенні С-подібні бруси утворюють звичайну двобрусну раму, уніфіковану з рамою Т-16МГ вітчизняних самохідних шасі.

У верхньому і нижньому положеннях бруси зводять, утворюючи однобрусну раму з верхнім або нижнім розташуванням. ТСШ з верхнім положенням рами тотожне шасі РС-09/124 (НДР). При цьому можливе комбінування його з поворотним переднім мостом або з поворотною навісною системою.

При нижньому положенні рами можлива установка підйомно-поворотної навісної системи. Можливо також встановити один брус вертикально, а інший – горизонтально.

Всі ці положення рами підвищують універсальність ТСШ, звільняючи окремі зони міжосьового простору для розміщення навісних машин і знарядь.

Поворот і фіксація брусів проводиться приводом, керованим з місця водія. Привід рульового управління може бути механічним або гідрофікованим і розміщується в одному з поздовжніх брусів рами.

Найбільшого поширення набули ТСШ з однобрусною і двобрусною рамами. Наявність одно- або двобрусної рами потребує за собою розробку різних за конструкцією комплексів навісних машин і знарядь. Досвід показує, що більшість навісних сільськогосподарських машин – з одно- і двобрусною рамами. Наприклад, при досить близьких технічних параметрах ТСШ з двобрусною рамою і однобрусною самохідних шасі РС-09/124 (НДР) не вдається використовувати комплекс сільськогосподарських машин і знарядь, призначених для однобрусних самохідного шасі, на двоярусних, і навпаки.

ТСШ з комбінованою рамою (рис. 6) може агрегатуватися з обома комплексами сільськогосподарських машин і знарядь за рахунок переобладнання

рами в одно- або двобрусну модифікацією. Рама цього ТСШ розбірна і складається з двох поздовжніх брусів 1, 2, що переставляються, і двох поперечних брусів 3, 4 із фланцями в центрі і по краях. Двобрусна рама утворюється кріпленням поздовжніх брусів до крайніх фланців (рис. 6, а). Для полегшення навішування машин на двобрусну раму один із поздовжніх брусів може від'єднуватися, забезпечуючи вільний доступ збоку в міжосьову зону.

При перестановці брусів у середнє положення вони утворюють двобрусну зближену раму, розта-

шовану на тій же висоті (рис. 6, б).

З'єднання поздовжніх брусів може бути виконано і за варіантом, показаному на рис. 6, б (вид І). У цьому випадку отримуємо однобрусну раму.

Конструкція дозволяє перебудувати раму в комбіновану двобрусну з асиметричним розташуванням поздовжніх брусів (рис. 6, в, 6, з), а також встановити бруси планками вгору, що підвищує універсальність ТСШ, і ефективність агрегування з навісними машинами [1, 2].

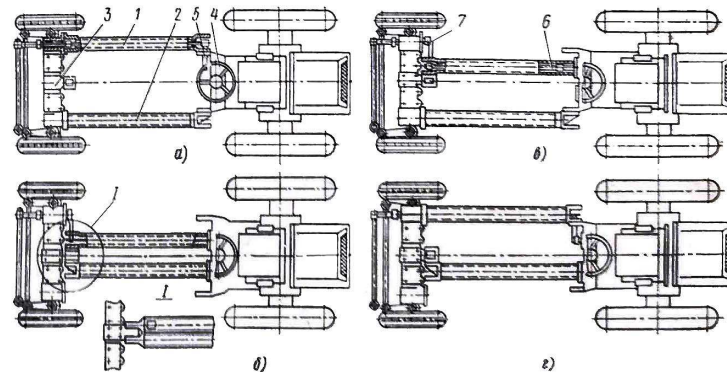


Рисунок 6 – ТСШ з брусами рами, що переставляються: а, б, в, з – варіанти положень брусів рами

Перебудова рульового керування проводиться таким чином. У двобрусній рамі поздовжній вал 6 рульового управління, розташований всередині порожнього бруса 1, з одного боку безпосередньо з'єднується з валом 7 сошки, а з іншого боку через важільний паралелограм 5 – з проміжним валом рульового приводу.

При перебудові рами в однобрусний варіант важільний паралелограм 5 знімають і встановлюють спереду між валом 7 сошки і поздовжнім валом 6 рульового управління, а останній безпосередньо з'єднують ззаду з проміжним валом рульового приводу.

З урахуванням конструктивних особливостей тракторних самохідних шасі та специфіки їх агрегування з навісним обладнанням виникає необхідність оцінки напружено-деформованого стану несучих елементів рами. Особливості компонування, перерозподіл навантажень та умови експлуатації суттєво впливають на напружений стан конструкції, що обумовлює необхідність застосування сучасних методів розрахунку міцності [6, 7].

Аналіз напружено-деформованого стану рами навантажувача на базі ТСШ. Розрахункова схема фронтального навантажувача на базі Т-16МГ. Для визначення навантажень, що діють на раму фронтального навантажувача, розглянемо розрахункову схему (рис. 7). Визначення навантажень на елементи конструкції базується на підходах, що застосовуються при дослідженні навантажених режимів роботи машинно-тракторних агрегатів [9].

На раму в кожному місці кріплення вантажної платформи діє сила $F_1/4$, яка складається з суми сил тяжіння $G_{В.П.}$ вантажної платформи масою 210 кг та максимальної вантажопідйомності платформи $Q_{В.П.}$ (маса вантажа 750 кг):

$$F_1 = G_{В.П.} + Q_{В.П.} = 9420 \text{ Н.} \quad (1)$$

Сили тяжіння G_K навантажувального устаткування масою 190 кг та максимальної вантажопідйомності ковша Q_K масою 300 кг об'єднуються в силу F_2 , що діє на відстані $L = 1,76$ м від місця кріплення навантажувального устаткування та утворює момент M_1 :

$$F_2 = G_K + Q_K, \quad (2)$$

$$M_1 = F_2 \cdot L, \quad (3)$$

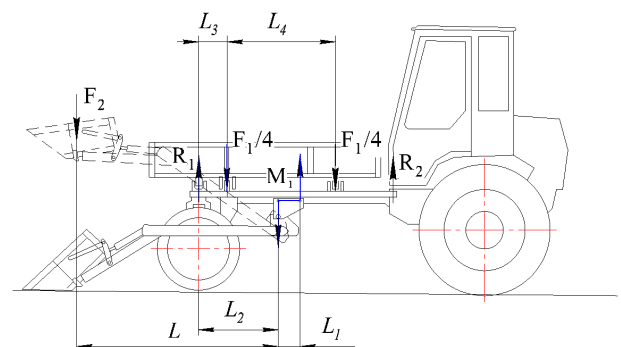


Рисунок 7 – Розрахункова схема навантаження фронтального навантажувача

Опорні реакції R_1 та R_2 виникають в шарнірах кріплення рами до передньої осі та базового модуля, відповідно.

Момент M_1 можна замінити парою сили F_3 з важелем L_1 (0,2 м):

$$F_3 = M_1 / L_1 = 42250 \text{ Н.} \quad (4)$$

Для проведення аналізу напружено-

деформованого стану рами навантажувача використовують складальну модель у вигляді копії збірки вузла, яка виключає всі деталі, відсутність яких не впливатиме на результати проведених розрахунків. Також слід враховувати, що виконання компонентів складальної моделі можливе без урахування таких елементів, як допоміжні отвори, фаски, канавки та інші, відсутність яких не впливатиме на результати моделювання. Виконання моделі за таким принципом дозволить спростити процедуру побудови та управління процесом моделювання, що в цілому підвищить продуктивність. При цьому забезпечення функціональної стійкості конструкції є важливим фактором надійності роботи машин у змінних умовах експлуатації [10].

3-D модель складальних одиниць рами навантажувача побудована за допомогою системи тривимірного твердотільного моделювання «Autodesk Inventor», що базується на методі скінченних елементів [10, 11]. Тензори моментів інерції, приєднувальні розміри та маса кожного елемента імпортується (рис. 8–11), як маса і інерція твердого тіла.

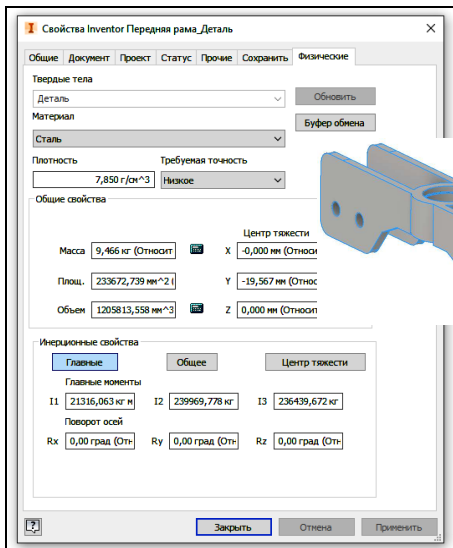


Рисунок 8 – Масово-геометричні характеристики передньої рами

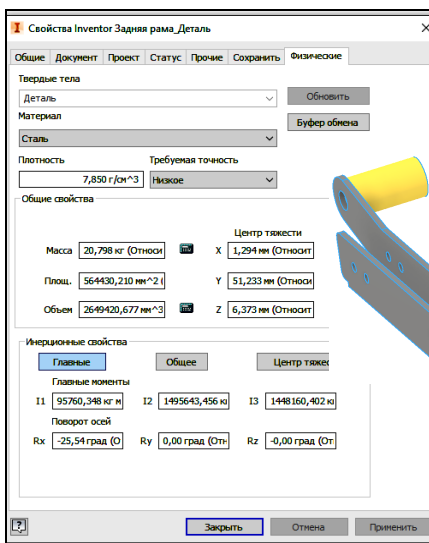


Рисунок 9 – Масово-геометричні характеристики задньої рами

Розрахункова схема навантаження рами фронтального навантажувача для дослідження з використанням інструменту "Аналіз напруження AIP" Autodesk Inventor наведені на рис. 12. Фізичні характеристики матеріалу металоконструкції автогідропідійомника наведені у табл. 1, силові фактори – у табл. 2

Розподіл переміщень точок (мм) всієї рами навантажувача в напрямку координатних осей наведено на рис. 13–15.

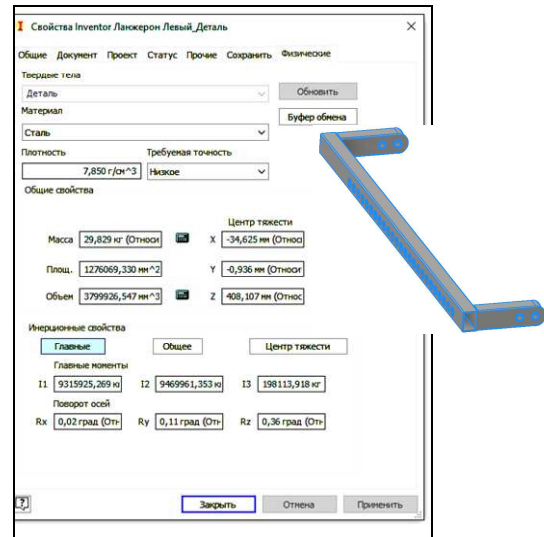


Рисунок 10 – Масово-геометричні характеристики лонжерона

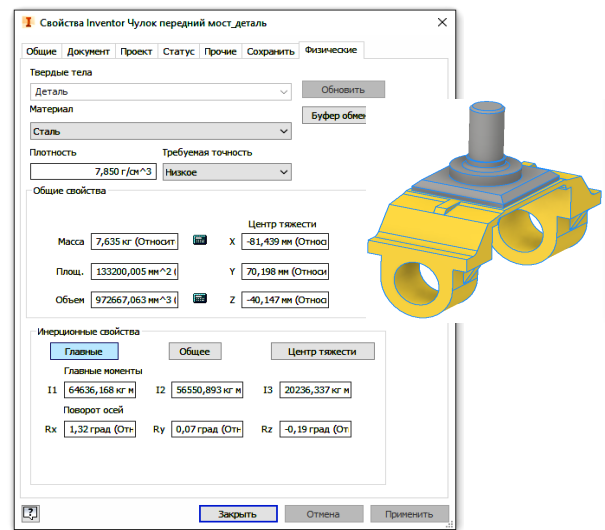


Рисунок 11 – Масово-геометричні характеристики шарніру переднього мосту

Таблиця 1 – Властивості матеріалу

Ім'я	Сталь	
Загальні	Масова щільність, г/см ³	7,85
	Межа текучості, МПа	207
	Остаточна межа міцності розтягування, МПа	345
Напруження	Модуль Юнга, ГПа	210
	Коефіцієнт Пуассона	0,3
	Модуль пружності при зсуву, ГПа	80,77

Для аналізу напруженого стану всієї рами в цілому побудовані епюри розподілення коефіцієнту запасу міцності (рис. 16). Для аналізу окремих елементів рами, таких як: передня і задня рами, лонжерони та шарніру переднього мосту – розподілення еквівалентних напружень за Мізесом (МПа) [12] (рис. 17–20).

Висновки. Аналіз отриманих результатів дозволив зробити наступні висновки:

1. Умови міцності забезпечуються по всій довжині елементів рами навантажувача, що підтверджується з епюри розподілення коефіцієнту запасу міцності.

2. Найбільші переміщення виникають у лонжероні у вертикальному напрямку і складають 2,2 мм.

3. Найбільш напруженою є передня частина рами, а саме місця з'єднання кронштейнів передньої

рами та вісі шарніру переднього мосту.

Таблиця 2 – Сила і момент реакції в залежностях

Ім'я залежності	Сила реакції, Н		Реактивний момент, Н м	
	Величина	Компонент (X,Y,Z)	Величина	Компонент (X,Y,Z)
Опора R_1	11310	-27,24	522	-522
		4730		-6,660
		-10280		0
Опора R_2	3803	0	272,7	272,5
		-3801		9,382
		137,5		4,108

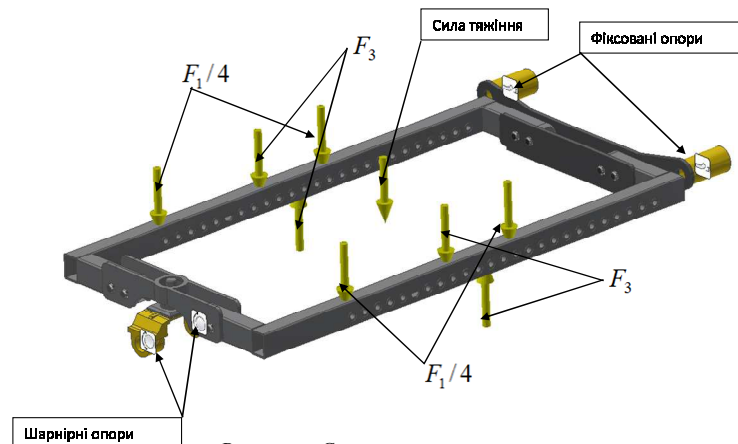


Рисунок 12 – Схема навантаження та опор

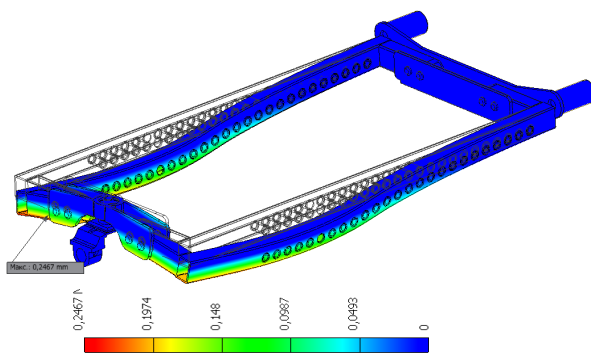


Рисунок 13 – Розподіл переміщень точок (мм) рами навантажувача вздовж осі X

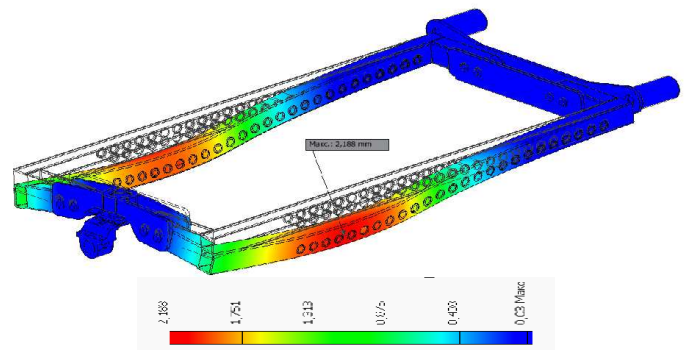


Рисунок 14 – Епюри розподілення переміщень точок (мм) рами навантажувача вздовж осі Y

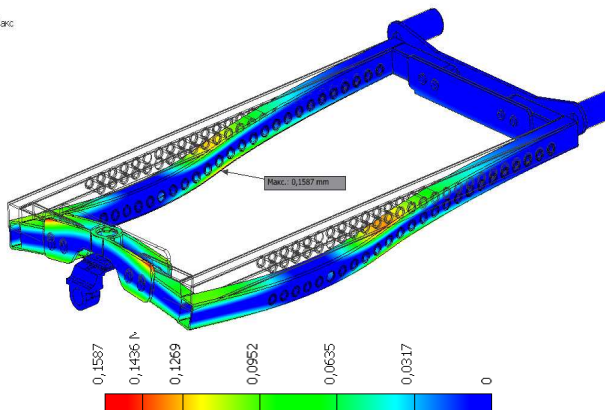


Рисунок 15 – Розподіл переміщень точок (мм) деформацій рами навантажувача вздовж осі Z

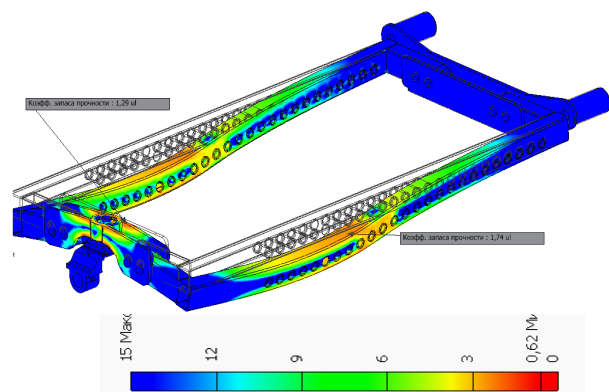


Рисунок 16 – Розподіл коефіцієнту запасу міцності в рами навантажувача

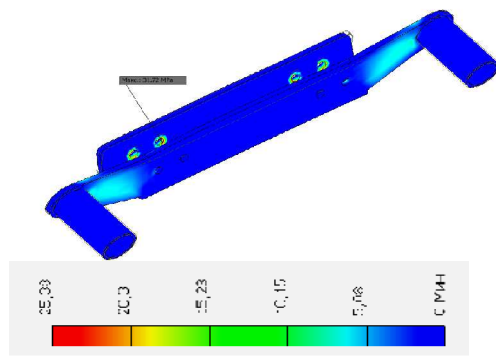


Рисунок 17 – Розподіл еквівалентних напружень за Мізесом у задній рамі

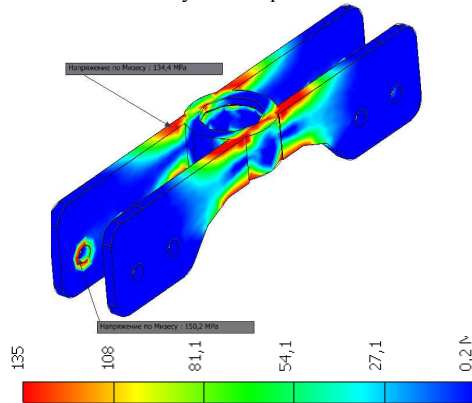


Рисунок 19 – Розподіл еквівалентних напружень за Мізесом у передній рамі

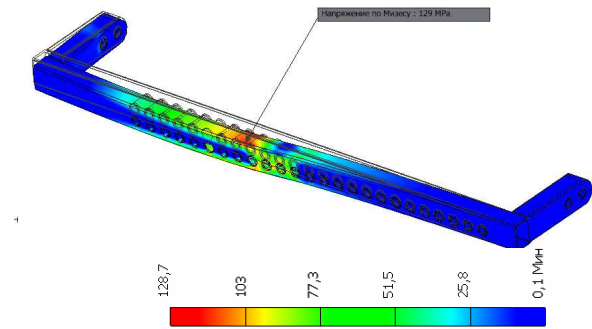


Рисунок 18 – Розподіл еквівалентних напружень за Мізесом у лонжероні

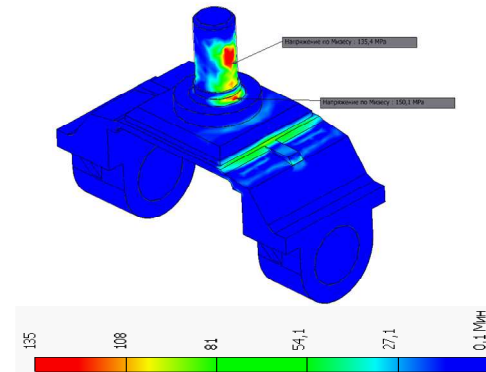


Рисунок 20 – Розподіл еквівалентних напружень за Мізесом у шарнірі переднього мосту

Список літератури

1. Подригалo М. А., Краснокутський В. М., Шевцов В. Ю. Принципи раціонального агрегування тракторних самохідних шасі. *Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Автомобіле- та тракторобудування.* 2021. № 2. С. 91-98. URL: <https://repository.kpi.kharkov.ua/items/f10d4a17-d0d9-4737-8a38-f204a05cab9a>.
2. Podrigalo M., Krasnokutskiy V., Selevych S., Vakhniuk S., Dolinskyi M. Methodology for Analyzing the Traction Dynamics of a Self-Propelled Tractor Chassis During Coupling with Cross-Axle Linkage of Mounted Machines. *Innovations in Mechanical Engineering IV.* 2025. P. 129-139. https://doi.org/10.1007/978-3-031-93554-1_12.
3. Rebrov O., Kozhushko A., Kalchenko B., Mamontov A., Zakovorotniy A., Kalinin E., Holovina E. Mathematical model of diesel engine characteristics for determining the performance of traction dynamics of wheel-type tractor. *EUREKA: Physics and Engineering.* 2020. 4. 90–100. DOI: 10.21303/2461-4262.2020.001352.
4. Lebedev A., Shuliak M., Lebedev S., Khalin S., Haidai T., Kholodov A., Pirogov V., Shaposhnyk V. Determining conditions for providing maximum traction efficiency of tractor as part of a soil tillage unit. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies,* 2024, Volume 1(1 (127)), pp. 6-14. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.297902>.
5. Lebedev A.; Shuliak M.; Khalin S.; Lebedev S.; Szwedziak K.; Lejman K.; Niedbala G.; Lusiak T. Methodology for Assessing Tractor Traction Properties with Instability of Coupling Weight. *Agriculture.* 2023, 13, 977.
6. Закапко О. Г. Поліпшення агрегативності і маневреності тракторних самохідних шасі: дис. канд. техн. наук. ХНАДУ. 2023. URL: <https://dspace.khadi.kharkov.ua/bitstreams/4088e1a2-3563-4114-9af2-78b574d1f480/download>.
7. Кальченко Б. І., Ребров О. Ю., Мамонтов А. Г., Кожушко А. П., Якунін М. С. Динаміка руху колісних тракторів: монографія. НТУ «ХПІ». 2021. 320 с. URL: <https://repository.kpi.kharkov.ua/items/8779fb2d-068d-47a8-9d79-1b76769c365e>.
8. Подригалo М. А., Разарьонов Л. В., Закапко О. Г. Оцінка

- граничного навантажувального режиму рульового керування тракторного самохідного шасі. *Збірник наукових праць Харківського національного університету Повітряних Сил.* 2022. № 1(71). С. 111-116. <https://doi.org/10.30748/zhups.2022.71.13>
9. Artiymov N., Anikeev A., Kaluzhniy A., Sirovitskiy K., Kolodiazhnyi I. Investigation of agricultural unit loads in non-established mode of motion when performing technological operations. *Engineering for Rural Development.* 2022. 675 – 681. 10.22616/ERDev.2022.21.TF216.
 10. Podrigalo M., Dubinin Y., Moldovan A., Polianskiy O. et al., New Methods and Systems for Monitoring the Functional Stability Parameters of Wheel Machines Power Units. *SAE Technical Paper 2020-01-2014.* 2020. <https://doi.org/10.4271/2020-01-2014>
 11. Cook R.D., Malkus D.S., Plesha M.E., Witt R.J. *Concepts and Applications of Finite Element Analysis.* John Wiley & Sons, 4th Edition, 2001 ISBN: 978-0471356059.
 12. Budynas R.G., Nisbett J.K. *Shigley's Mechanical Engineering Design McGraw-Hill Education.* 10th Edition, 2015, ISBN: 978-0073398204.

References (transliterated)

1. Podryhalo M. A., Krasnokutskiy V. M., Shevtsov V. Yu. Pryntsyпы ratsionalnoho ahrehatuvannia traktornykh samokhidnykh shasi [Principles of rational aggregation of tractor self-propelled chassis]. *Visnyk NTU «KhPI». Seriya: Avtomobile-ta traktorobuduvannia,* 2021, no. 2, pp. 91-98. URL: <https://repository.kpi.kharkov.ua/items/f10d4a17-d0d9-4737-8a38-f204a05cab9a>
2. Podrigalo M., Krasnokutskiy V., Selevych S., Vakhniuk S., Dolinskyi M. Methodology for Analyzing the Traction Dynamics of a Self-Propelled Tractor Chassis During Coupling with Cross-Axle Linkage of Mounted Machines. *Innovations in Mechanical Engineering IV,* 2025, 129-139, https://doi.org/10.1007/978-3-031-93554-1_12.
3. Rebrov O., Kozhushko A., Kalchenko B., Mamontov A., Zakovorotniy A., Kalinin E., Holovina E. Mathematical model of diesel engine characteristics for determining the performance of traction dynamics of wheel-type tractor, *EUREKA: Physics and Engineering,* 2020, 4, 90–100. DOI: 10.21303/2461-

- 4262.2020.001352.
4. Lebedev A., Shuliak M., Lebedev S., Khalin S., Haidai T., Kholodov A., Pirogov V., Shaposhnyk V. Determining conditions for providing maximum traction efficiency of tractor as part of a soil tillage unit. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2024, Volume 1(1 (127)), pp. 6-14. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.297902>.
 5. Lebedev A.; Shuliak M.; Khalin S.; Lebedev S.; Szwedziak K.; Lejman K.; Niedbała G.; Łusiak T. Methodology for Assessing Tractor Traction Properties with Instability of Coupling Weight. *Agriculture*, 2023, 13, 977.
 6. Zakapko O. H. *Polipshennia ahrehatovanosti i manevrenosti traktornykh samokhidnykh shasi* [Improving the aggregation and maneuverability of tractor self-propelled chassis]: dys. kand. tekhn. nauk. KhNADU. 2023. URL: <https://dspace.khadi.kharkov.ua/bitstreams/4088e1a2-3563-4114-9af2-78b574d1f480/download>.
 7. Kalchenko B. I., Rebrov O. Yu., Mamontov A. H., Kozhushko A. P., Yakunin M. Ye. *Dynamika rukhu kolisnykh traktoriv* [Dynamics of wheeled tractors]: monohrafiia. NTU «KhPI». 2021, 320 p. URL: <https://repository.kpi.kharkov.ua/items/8779fb2d-068d-47a8-9d79-1b76769c365e>.
 8. Podryhalo M. A., Razaronov L. V., Zakapko O. H. Otsinka hranychnoho navantazhuvalnoho rezhymu rulovoho keruvannia traktornoho samokhidnoho shasi [Estimation of the ultimate load mode of steering of a tractor self-propelled chassis]. *Zbirnyk naukovykh prats Kharkivskoho natsionalnoho universytetu Povitrianykh Syl*, 2022, no. 1(71), pp. 111-116. <https://doi.org/10.30748/zhups.2022.71.13>
 9. Artiomov N., Anikeev A., Kaluzhnyi A., Sirovitskiy K., Kolodiaznyi I. Investigation of agricultural unit loads in non-established mode of motion when performing technological operations. *Engineering for Rural Development*, 2022, 675 – 681. 10.22616/ERDev.2022.21.TF216.
 10. Podrigalo M., Dubinin Y., Moldovan A., Polianskyi O. et al. New Methods and Systems for Monitoring the Functional Stability Parameters of Wheel Machines Power Units, *SAE Technical Paper 2020-01-2014*, 2020, <https://doi.org/10.4271/2020-01-2014>
 11. Cook R.D., Malkus D.S., Plesha M.E., Witt R.J. *Concepts and Applications of Finite Element Analysis*. John Wiley & Sons, 4th Edition, 2001 ISBN: 978-0471356059.
 12. Budynas R.G., Nisbett J.K. *Shigley's Mechanical Engineering Design*. McGraw-Hill Education, 10th Edition, 2015, ISBN: 978-0073398204.

Надійшла (received) 06.04.2026

Стаття прийнята до друку 21.04.2026

Опублікована 28.04.2026

Відомості про авторів /About the Authors

Краснокутський Володимир Миколайович / Krasnokutskiy Volodymyr – кандидат технічних наук, доцент, докторант кафедри Технології машинобудування і ремонту машин, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9484-4113>; e-mail: hvukvn62@gmail.com.