

**ДОСЛІДЖЕННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ДНА
КУЗОВА НАПІВПРИЧЕПА ВАНТАЖНОГО АВТОМОБІЛЯ**

Ляшук О. Л., д.т.н., професор кафедри автомобілів Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя, e-mail: oleglashuk@ukr.net, ORCID: 0000-0003-4881-8568;

Гевко І. Б., д.т.н., професор кафедри автомобілів Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя, e-mail: gevkoivan1@ukr.net, ORCID: 0000-0001-5170-0857;

Левкович М. Г., к.т.н., доцент кафедри автомобілів Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя, e-mail: Levkovmin@gmail.com, ORCID: 0000-0002-6793-8736;

Вовк Ю. Я., к.т.н., доцент кафедри автомобілів Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя, e-mail: sepd.tntu@gmail.com, ORCID: 0000-0001-8983-2580;

Сташків М. Я., к.т.н., доцент кафедри технічної механіки та сільськогосподарських машин Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя, e-mail: stam77@ukr.net, ORCID: 0000-0002-7325-8016;

Капський Д. В., д.т.н., професор, декан автотракторного факультету Білоруського національного технічного університету, м. Мінськ, Білорусь, e-mail: d.kapsky@gmail.com, ORCID: 0000-0001-9300-3857

У статті наведено нові високоефективні конструкції вантажних автомобілів, що максимально пристосовані для перевезення певних видів вантажів і до конкретних умов експлуатації. Стаття присвячена удосконаленню технології проектування несучих конструкцій кузовів вантажних автомобілів. Виконано огляд і аналіз сучасного стану теорії математичного програмування та оптимального проектування. Запропонована чисельна процедура оптимізації несучих конструкцій кузовів вантажних автомобілів.

Проведено дослідження впливу геометричних параметрів елементів дна кузова на його напружено-деформований стан (НДС) вантажного автомобіля із загальним застосуванням методів комп'ютерного моделювання. Дослідження проводились засобами інженерного аналізу Simulation спеціалізованого програмного комплексу SolidWorks на розробленій CAD-моделі кузова напівпричепи вантажного автомобіля. Проведено аналіз зміни параметрів НДС при зміні геометричних параметрів елементів дна кузова. Досліджено характер зміни статичного напруження та переміщення залежно від зміни пропорцій поперечного перетину швелера при фіксованих геометричних розмірах заготовки й товщини заготовки та матеріалу дна кузова.

За результатами досліджень побудовано графічні залежності зміни статичного напруження, переміщення та коефіцієнта запасу міцності від ширини полки та товщини швелера; залежність статичних напружень у швелері від товщини стінки швелера та товщини листа дна кузова. Отримано рівняння, що описує характер зміни напружень у швелерах дна кузова напівпричепи. Результати проведених досліджень щодо удосконалення конструкції кузова вантажного автомобіля є основою для прийняття інженерних рішень з удосконалення конструкції дна кузова напівпричепи вантажного автомобіля, що дозволяє максимізувати вантажопідйомність та покращити міцність, зменшити вагу та продовжити експлуатаційний ресурс, а також підтримувати технічний ресурс напівпричепи за наявної ремонтної бази.

Ключові слова: дно кузова напівпричепи, швелер, розгортка, статичне напруження, статичне переміщення, CAD-модель.

DOI: 10.33815/2313-4763.2021.1.24.093-103

Вступ. Автомобільний транспорт є одним з найефективніших способів перевезення матеріалів, сировини чи готової продукції. На ринку вантажних перевезень України частка автомобільного транспорту, порівнюючи з іншими видами транспорту, постійно зростає – з 69 % у 2015 р. до близько 75 % у 2020 р.

В Україні протягом 2005–2020 рр. простежується стійка тенденція до зростання обсягів перевезення вантажів автомобільним транспортом у межах 10-13 млрд т

У середньому за добу автомобільним транспортом перевозиться 3,3 млн т вантажів, а середня відстань перевезення однієї тонни вантажів становить близько 60 км [1].

Незважаючи на постійне підвищення інтенсивності експлуатації автомобільного транспорту у сфері вантажних перевезень, оновлення парку рухомого складу автомобільного транспорту відбувається повільними темпами – майже 70 % рухомого складу є технічно та/або морально застарілими, а 50 % одиниць техніки експлуатуються більше як 10 років.

Підвищення надійності, технологічності, вантажопідйомності при одночасному зменшенні металоємності та збільшенні терміну безвідмовної експлуатації транспортних засобів забезпечує необхідну конкурентоспроможність на ринку вантажних перевезень [2].

Кузов напівпричепи вантажного автомобіля – основна частина транспортного засобу, яка містить низку каналів, виготовлених із м'якої сталі або алюмінієвого листового металу. Більшість одиниць технологічного обладнання зосереджуються на конструкції кузова вантажівки з різними модифікаціями, необхідними для мінімізації напруження та підвищення коефіцієнта навантаження. При проектуванні кузова треба враховувати експлуатаційні напруження та властивості матеріалу.

При експлуатації виникають пошкодження кузовів унаслідок зношування та екстремальних впливів, а також певних локальних ділянках рамних конструкцій виникають тріщини та інші пошкодження. У багатьох випадках при аналізі стану кузовів виявляється те, що рама напівпричепи знаходиться в задовільному стані, а кузов містить вм'ятини, тріщини чи інші дефекти [3]. Значні дослідження в цьому напрямку здійснено в наступних працях [4–15].

Ураховуючи складну економічну ситуацію на підприємствах виникає необхідність ремонту або виготовлення нових кузовів для своїх потреб.

Мета статті – дослідження впливу геометричних параметрів елементів дна кузова на його напружено-деформований стан.

Рішення задачі. При дослідженні напружено-деформованого стану металоконструкції автомобільних кузовів використовують аналітичні, чисельні та експериментальні методи.

При проектуванні кузова вантажного автомобіля важливою є мінімізація його ваги, оскільки надлишкова вага призводить до збільшення виробничих витрат, зменшення частки корисного вантажу та знижує ефективність використання палива. Згідно з концепцією зменшення ваги із забезпеченням заданої міцності, моделюється та аналізується модель кузова із змінними параметрами елементів дна. САД-моделі кузова та аналіз напружено і деформованого стану швелерів дна кузовів виконано засобами програмного комплексу SolidWorks.

У більшості кузовів вантажних автомобілів нижню частину дна виконано у вигляді швелерів (рис. 1.).

Отже, існує потреба в оптимізації конструкції кузова, що дозволяє максимізувати вантажопідйомність та покращити міцність, зменшити вагу та продовжити експлуатаційний ресурс.

Тому проведення оптимізації конструкції швелера нижньої частини кузова шляхом розгляду різних моделей є актуальним завданням.

При проектуванні дна кузова важливе значення мають розміри швелера, матеріал, їх розміщення та кількість. При виготовленні швелерів використовують листи металу розміром 2500×1250 мм та товщиною від 3 до 5 мм. Відповідно, оптимальний розкрій листа складатиме 250 мм.



Рисунок 1 – Зовнішній вигляд дна кузова

Розгортка швелера ($t=5$, $b=50$, $h=165,37$) зображена на рис. 2, а отриманий після згинання розгортки швелер – на рис 3.



Рисунок 2 – Розгортка швелера ($t=5$, $b=50$, $h=165,37$)

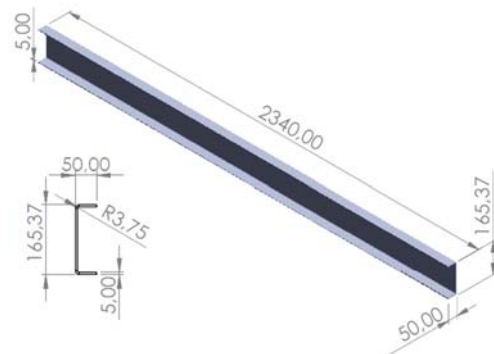


Рисунок 3 – Розміри швелера, отриманого з розгортки (рис. 2)

Нами прийнято використовувати при дослідженні швелери, які виготовлені з матеріалу товщиною від 3 до 5 мм та шириною полки 50 мм. Так як зміна товщини матеріалу призводить до зміни висоти, відповідно, отримаємо наступні розміри швелерів, які наведено в табл. 1.

Таблиця 1 – Розміри швелера залежно від ширини полки та товщини

Товщина швелера t , мм	Ширина полки b , мм	Висота h , мм	R , мм
3	50	160,0	3,75
4	50	163,0	3,75
5	50	165,4	3,75

Для проведення дослідження напружено-деформованого стану (НДС) було створено модель швелерів згідно з табл. 1. Побудовано сітку оболонки з використанням серединних поверхонь для моделей з глобальним розміром 30,86 мм та допуском 1,54 мм (рис. 4).

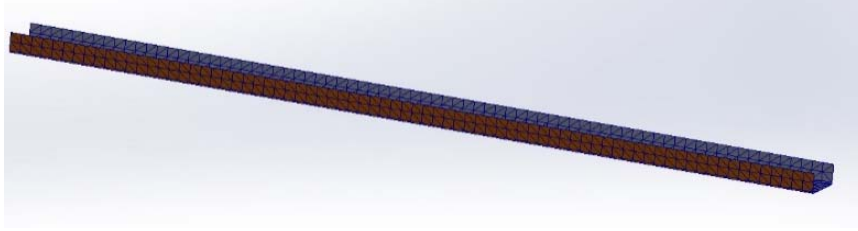


Рисунок 4 – Сітка кінцевих елементів з використанням серединних поверхонь

Умови прикладення навантаження зображено на рис. 5, прикладена сила на об'єкт складала $P=7700$ Н, матеріал – Ст 3 ГОСТ 380-88 (межа текучості $\sigma_T=206,81$ МПа, межа міцності 517,02 МПа).

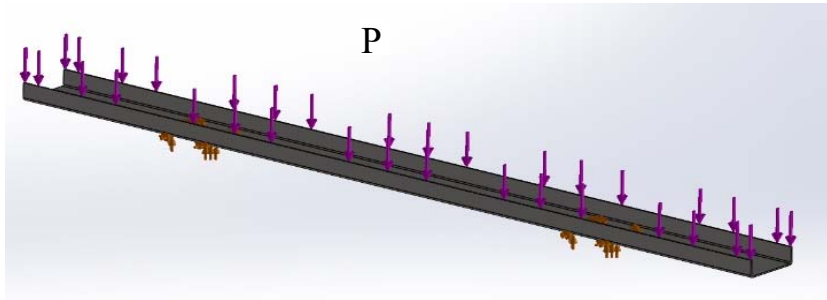
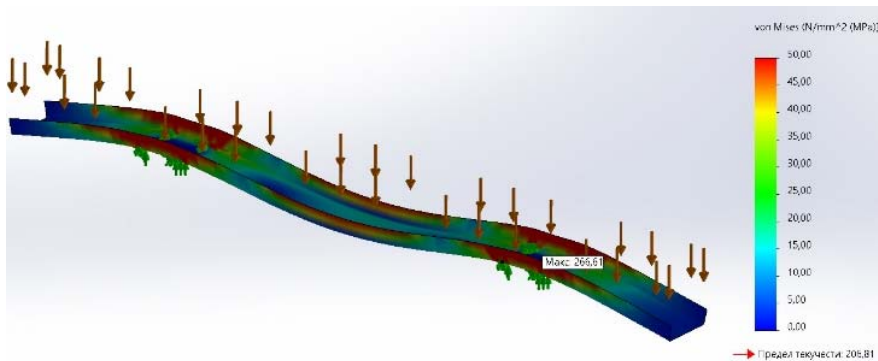


Рисунок 5 – Умови прикладення навантаження ($P=7700$ Н) та закріплення
Результати дослідження НДС швелерів наведено на рис. 6–8 та табл. 2.
Статичне напруження



Статичне переміщення

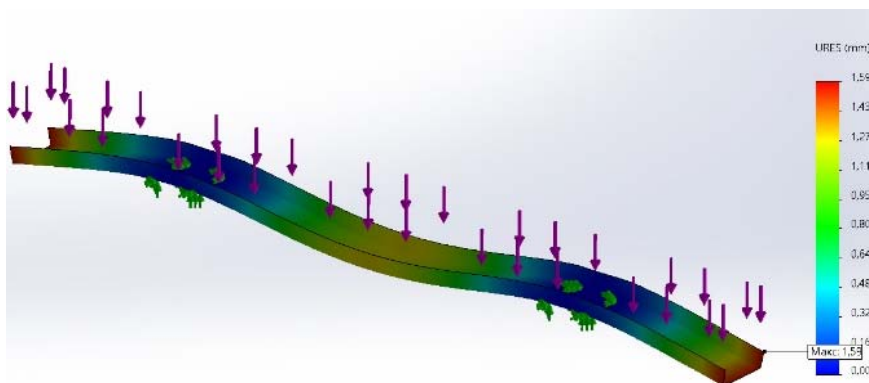
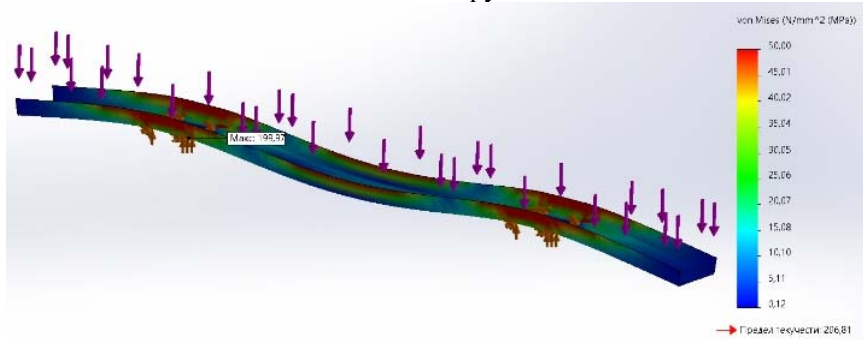


Рисунок 6 – НДС швелера при $b=50$ мм, $t=3$ мм, $\sigma_T=206,8$ МПа

Статичне напруження



Статичне переміщення

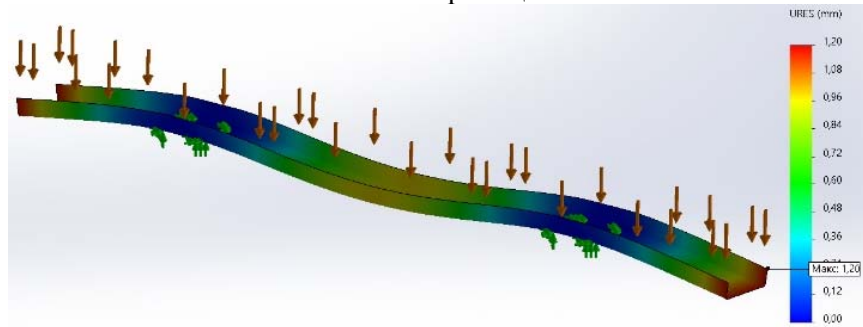
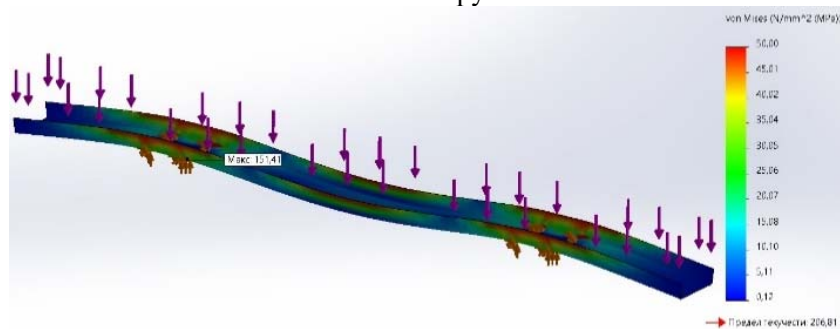


Рисунок 7 – НДС швелера при $b=50$ мм, $t=4$ мм, $\sigma_T=206,8$ МПа

Статичне напруження



Статичне переміщення

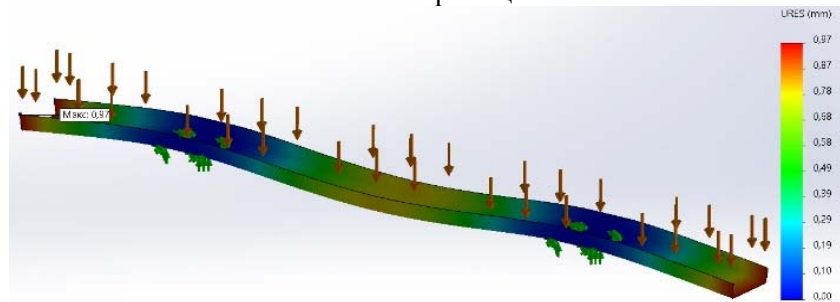


Рисунок 8 – НДС швелера при $b=50$ мм, $t=5$ мм, $\sigma_T=206,8$ МПа

Таблиця 2 – Результати дослідження статичного напруження, переміщення та коефіцієнта запасу міцності

Товщина швелера t , мм	Ширина полки швелера b , мм	Статичне напруження, МПа	Статичне переміщення, мм	Коефіцієнт запасу міцності
3	50	266,61	1,59	0,77
4	50	199,97	1,2	1,03
5	50	151,41	0,97	1,36

На основі результатів дослідження побудовано графічні залежності статичного напруження, переміщення, коефіцієнта запасу міцності від геометричних параметрів рис. 9–11.

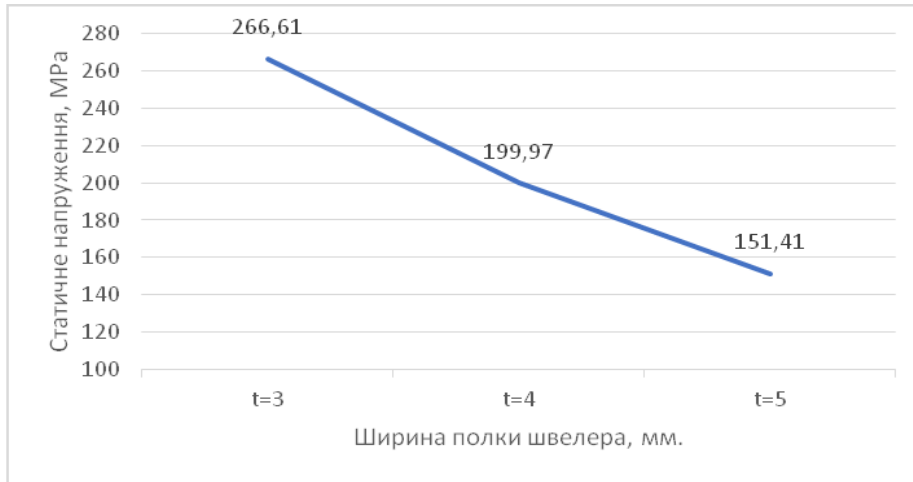


Рисунок 9 – Залежність статичного напруження (МПа) від ширини полки та товщини швелера (b=50, мм; t=3-5 мм; $\sigma_T=206,8$ МПа; прикладена сила на об'єкт 7700 Н)

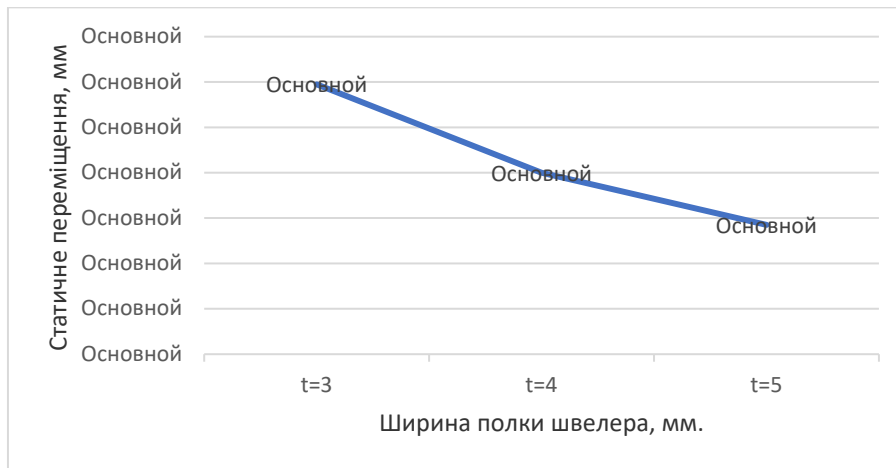


Рисунок 10 – Залежність статичного переміщення в мм від ширини полки та товщини швелера (b=50, мм; t=3-5 мм; $\sigma_T=206,8$ МПа; прикладена сила на об'єкт 7700 Н)

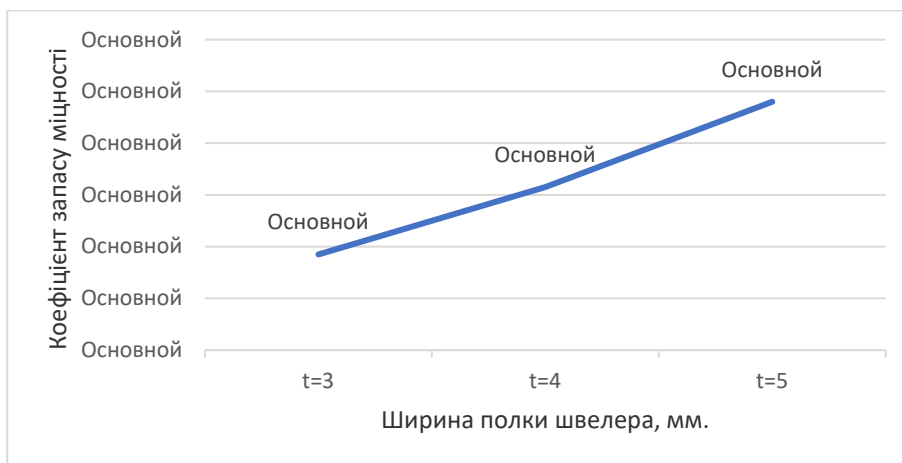


Рисунок 11 – Залежність коефіцієнта запасу міцності від ширини полки та товщини швелера (b=50, мм; t=3-5 мм; $\sigma_T=206,8$ МПа; прикладена сила на об'єкт 7700 Н)

Для проведення дослідження напружено-деформованого стану (НДС) дна кузова було створено САD-модель кузова, рис. 12. Прикладена сила на об'єкт складала $P=200$ кН, матеріал – сталь звичайної якості Ст3пс ГОСТ 380-88.

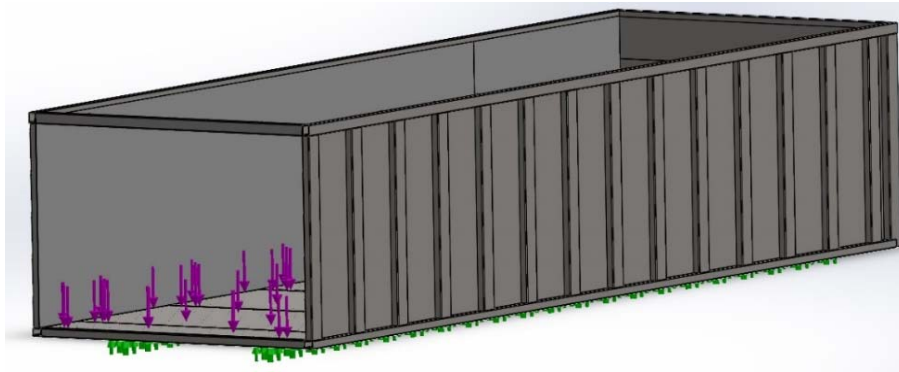


Рисунок 12 – САD-модель кузова

При дослідженні дна кузова проводилася зміна товщини листів у діапазоні від 3 до 5 мм. На рис. 13 зображено схему розміщення швелерів.

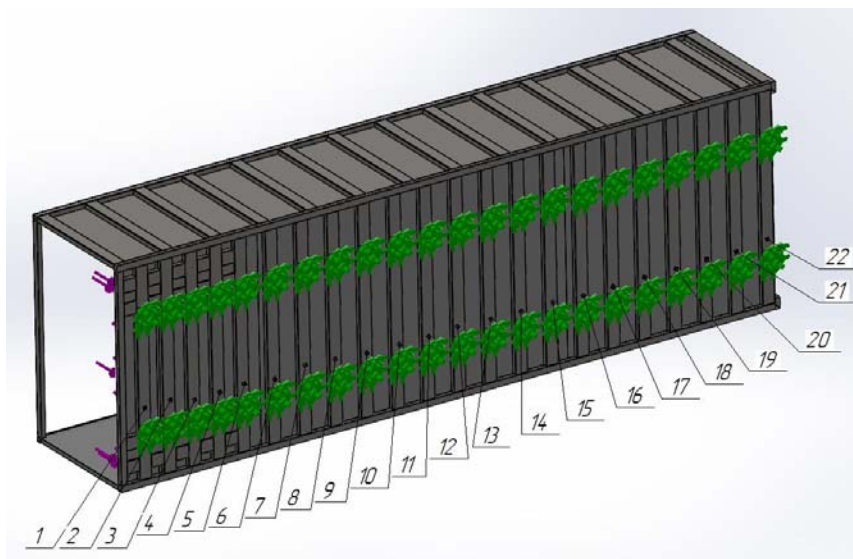


Рисунок 13 – Схема розміщення швелерів

Отримані результати подано на рис. 14–16 та у таблиці 3.

Таблиця 3 – Розрахункові статичні напруження, що діють на швелери, МПа

	Товщина листа дна, мм	Позиція швелера										
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Товщина стінки швелера, t=3 мм	t=3	48,7	26,5	23,9	23,0	23,7	24,0	24,2	24,3	25,3	25,1	25,6
	t=4	47,3	25,3	22,9	22,2	22,8	23,5	23,8	24,2	24,6	24,7	25,1
	t=5	45,2	24,7	22,3	21,6	22,4	23,1	23,5	23,9	24,3	24,4	24,8
	Товщина листа дна, мм	Позиція швелера										
		12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
	t=3	26,1	26,3	26,8	27,5	28,1	28,5	29,4	30,7	31,1	31,3	27,7
	t=4	25,3	25,8	26,3	27,1	27,3	27,6	28,6	29,4	29,8	30,2	26,8
	t=5	24,9	25,4	25,8	26,5	26,7	27,1	27,9	28,7	28,9	29,4	25,8

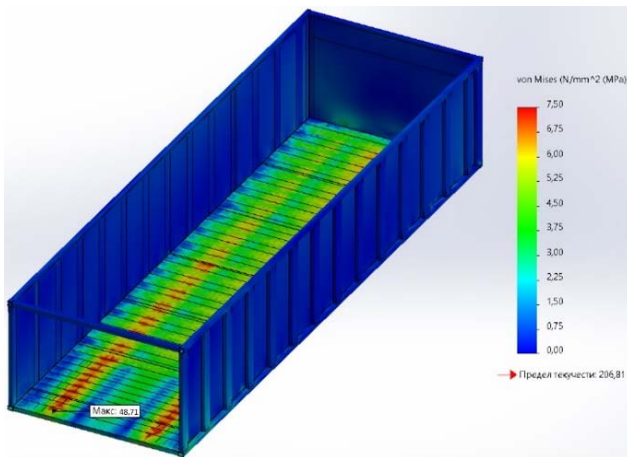


Рисунок 14 – Статичне напруження, що діє на швелер №1 ($t_{шв}=3$ мм, $t_{л,дн\grave{a}}=3$, $\sigma_T=206,8$ МПа)

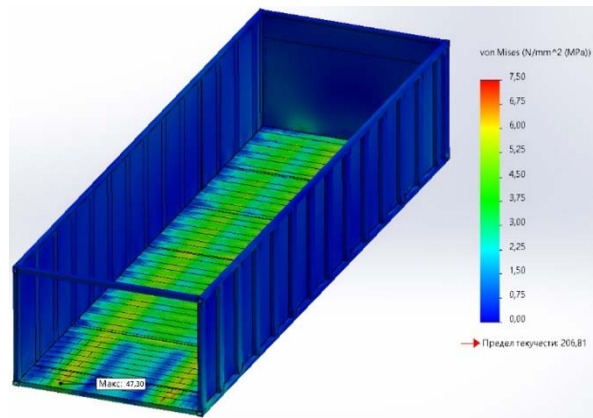


Рисунок 15 – Статичне напруження, що діє на швелер №1 ($t_{шв}=3$ мм, $t_{л,дн\grave{a}}=4$, $\sigma_T=206,8$ МПа)

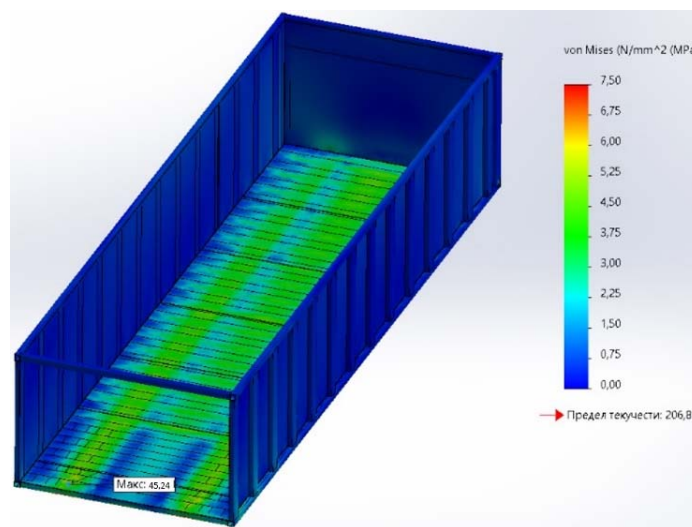


Рисунок 16 – Статичне напруження, що діє на швелер №1 ($t_{шв}=3$ мм, $t_{л,дн\grave{a}}=5$, $\sigma_T=206,8$ МПа)

На основі отриманих результатів побудовано залежність статичного напруження у швелерах дна кузова залежно від товщини стінки швелера та товщини листа дна кузова (рис. 17.).

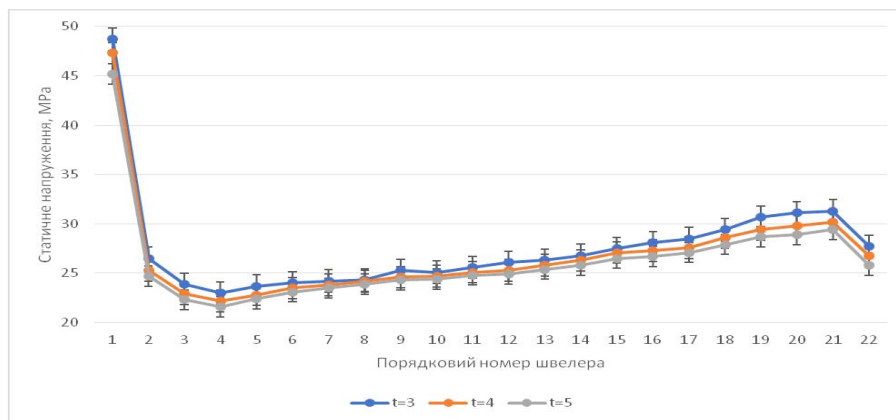


Рисунок 17 – Статичне напруження у швелерах дна кузова залежно від товщини стінки швелера та товщини листа дна кузова ($t_{шв}=3$ мм, $t_{л,дн\grave{a}}=3-5$, $\sigma_T=206,8$ МПа)

Характер зміни напружень у швелерах dna кузова напівпричепа в загальному можна описати рівнянням:

$$\sigma(x) = 3 \cdot 10^{-5}x^6 - 0,0027x^5 + 0,0856x^4 - 1,329x^3 + 10,591x^2 - 39,905x + 77,394.$$

Отримані результати є основою для прийняття інженерних рішень з удосконалення конструкції dna кузова напівпричепа вантажного автомобіля, що дозволяє максимізувати вантажопідйомність та покращити міцність, зменшити вагу та продовжити експлуатаційний ресурс.

Висновки. Аналіз НДС кузова напівпричепа вантажного автомобіля на основі розробленої CAD-моделі кузова дозволяє дослідити характер розподілу напружень в елементах dna кузова, встановити залежності рівня напружень та деформацій елементів dna кузова від їх товщини та товщини dna кузова, виявити найбільш небезпечні в плані несучої здатності елементи dna кузова напівпричепа. Отримані результати є основою для прийняття інженерних рішень з удосконалення конструкції dna кузова напівпричепа вантажного автомобіля.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Офіційний сайт Державної служби статистики України. URL : <http://www.ukrstat.gov.ua/> (дата звернення: 18.01.2021)
2. Krishna K. V., Reddy K. Y., Venugopal K., Ravi K. Design and analysis of truck body for increasing the payload capacity. *In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Bristol : IOP Publishing, 2017. Vol. 263, No. 6. 062065.
3. Vinjavarapu S., Koteswararao U., Narayana V. L. Design Optimization of Tipper Truck Body. *International Journal of Engineering Research and Development*. 2012. Vol. 4, Issue 9. P. 11–20.
4. Garud R. Y., Pandey A. Structural Analysis of Automotive Chassis, Design Modification and Optimization. *Int. Journal Appl. Eng. Res.* 2018. Vol. 13, No. 11. P. 9887–9892.
5. Nayak B., Sambaiah Ch. Design and Analysis of Dumped Body. *Int. Journal of Mech. Indus. Eng.* 2013. Vol. 2, Issue 3. P. 161–165.
6. Jithendra B., Anil K. M. Optimization of Weight and Stress Reduction of Dump For Automotive Vehicles. *Int. Journal of Engineering of Res. Technol.* 2013. Vol. 2, Issue 3. P. 1886–1893.
7. Ramacharan C., Prashanth A. S. Design and analysis of Dump Truck Floor Bed. *Int. Journal Sci. Res. Dev.*, 2015. Vol. 3, Issue 3. P. 706–710.
8. Техническая эксплуатация автомобилей / за ред. Э. С. Кузнецова. Москва : Транспорт, 1991. 412 с.
9. Павлов В. А., Муханов С. А. Транспортные прицепы и полуприцепы. Москва : Воениздат, 1981. 191 с.
10. Алямовский А. А. Инженерные расчеты в SolidWorks Simulation. Москва : ДМК Пресс, 2010. 464 с.
11. Бочаров Н. Ф., Зузов В. Н., Курбатский М. И. Применение ЭВМ в проектировании рам грузовых автомобилей : учебное пособие. Москва : МВТУ, 1982. 36 с.
12. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике. Москва : Мир, 1975. 541 с.
13. Lyashuk O., Pyndus Y., Lutsiv I., Vovk Y., Poberezhna L., Tretiakov O., Zolotyy R. Fracture cause analysis of the extruder's shaft and geometry optimization of the spline. *Journal of Mechanical Engineering and Sciences*. 2019. Vol. 13, No. 1. P. 4449–4460. DOI:10.15282/jmes.13.1.2019.08.0378.
14. Tson O. Analytical evaluation of technical and operational indicators impact on the transportation technology by automobile trailers. *Journal of Sustainable Development of Transport and Logistics*. 2016. Vol. 1, No. 1. P. 23–26. doi:10.14254/jsdtl.2016.1-1.4.

REFERENCES

1. Ofitsiyniyi sait Derzhavnoi sluzhby statystyky Ukrainy. Rerrived from <http://www.ukrstat.gov.ua/> (data zvernennia 18.01.2021)
2. Krishna K. V., Reddy K. Y., Venugopal K., Ravi K. (2017). Design and analysis of truck body for increasing the payload capacity. *In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Bristol : IOP Publishing. Vol. 263, Issue 6. P. 062065.
3. Vinjavarapu S., Koteswararao U., Narayana V. L. (2012). Design Optimization of Tipper Truck Body. *International Journal of Enginerring Research and Development*, Vol. 4, Issue 9, 11–20.
4. Garud R. Y., Pandey A. (2018). Structural Analysis of Automotive Chassis, Design Modification and Optimization. *Int. J. Appl. Eng. Res*, Vol. 13, Issue 11, 9887–9892.
5. Nayak B., Sambaiah Ch. (2013). Design and Analysis of Dumped Body. *Int. Journal of Mech. Indus. Eng*, Vol. 2, Issue 3, 161–165.
6. Jithendra B., Anil K. M. (2013). Optimization of Weight and Stress Reduction of Dump For Automotive Vehicles. *Int. Journal of Engineering of Res. Technol.*, Vol. 2, 1886–1893.
7. Ramacharan C., Prashanth A. S. (2015). Design and analysis of Dump Truck Floor Bed. *Int. Journal Sci. Res. Dev.*, Vol. 3, 706–710.
8. Kuznecova Eh. S. (Ed.) (1991). *Tekhnicheskaya ehkspluatatsiya avtomobiley*. Moskva : Transport.
9. Pavlov V. A., Mukhanov S. A. (1981). *Transportnihe pricepiv i polupricepiv*. Moskva : Voenizdat.
10. Alyamovskiyj A. A. (2010). *Inzhenernihe raschetih v SolidWorks Simulation*. Moskva : DMK Press.
11. Bocharov N. F., Zuzov V. N., Kurbatskiyj M. I. (1982). *Primenenie EhVM v proektirovanii ram gruzovihkh avtomobileyj : uchebnoe posobie*. Moskva : MVTU.
12. Zenkevich O. (1975). *Metod konechnihkh ehlementov v tekhnike*. Moskva : Mir.
13. Lyashuk O., Pyndus Y., Lutsiv I., Vovk Y., Poberezhna L., Tretiakov O. & Zoloty R. (2019). Fracture cause analysis of the extruders shaft and geometry optimization of the spline. *Journal of Mechanical Engineering and Sciences*, Vol. 13, Issue 1, 4449–4460. DOI:10.15282/jmes.13.1.2019.08.0378.
14. Tson O. (2016). Analytical evaluation of technical and operational indicators impact on the transportation technology by automobile trailers. *Journal of Sustainable Development of Transport and Logistics*, Vol. 1, Issue 1, 23–26. DOI:10.14254/jsdtl.2016.1-1.4.

Ляшук О. Л., Гевко И. Б., Левкович М. Г., Вовк Ю. Я., Сташків Н. Я., Капський Д. В.
ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ДНА КУЗОВА
ПОЛУПРИЦЕПА ГРУЗОВОГО АВТОМОБИЛЯ

В статье приведены новые высокоэффективные конструкции грузовых автомобилей, максимально приспособленные для перевозки определенных видов грузов и к конкретным условиям эксплуатации. Статья посвящена совершенствованию технологии проектирования несущих конструкций кузовов грузовых автомобилей. Выполнен обзор и анализ современного состояния теории математического программирования и оптимального проектирования. Предложена численная процедура оптимизации несущих конструкций кузовов грузовых автомобилей.

Проведено исследование влияния геометрических параметров элементов дна кузова на его напряженно-деформированное состояние (НДС) грузового автомобиля с общим применением методов компьютерного моделирования. Исследования проводились средствами инженерного анализа Simulation специализированного программного комплекса SolidWorks на разработанной САД - модели кузова полуприцепа грузового автомобиля. Проведен анализ изменения параметров НДС при изменении геометрических параметров элементов дна кузова. Исследован характер изменения статического напряжения и перемещения в зависимости от изменения пропорций поперечного пересеку швеллера при фиксированных геометрических размерах заготовки и толщины заготовки и материала дна кузова.

По результатам исследований построены графические зависимости изменения статического напряжения, перемещения и коэффициента запаса прочности от ширины полки и толщины швеллера; зависимость статических напряжений в швеллере от толщины стенки швеллера и толщины листа дна кузова. Получено уравнение, описывающее характер изменения напряжений

в швеллерах дна кузова полуприцепа. Результаты проведенных исследований по совершенствованию конструкции кузова грузового автомобиля является основой для принятия инженерных решений по совершенствованию конструкции дна кузова полуприцепа грузового автомобиля, что позволяет максимизировать грузоподъемность и улучшить прочность, уменьшить вес и продлить эксплуатационный ресурс, а также поддерживать технический ресурс полуприцепа при существующей ремонтной базе.

Ключевые слова: дно кузова полуприцепа, швеллер, развертка, статическое напряжение, статическое перемещение, CAD-модель.

Lyashuk O. L., Hevko I. B., Levkovych M. G., Vovk Y. Y., Stashkiv M. Ya., Kapsky D. V.
INVESTIGATION OF THE STRESS-STRAIN STATE OF A TRUCK SEMI-TRAILER BODY BOTTOM

The article contains new high-performance truck designs best suited for the transportation of certain goods types and for specific operating conditions. The article is devoted to the improvement of the designing technology of load-bearing structures of truck bodies. A review and analysis of the current state of the theory of mathematical programming and optimal design have been carried out. A numerical procedure for optimizing the load-bearing structures of truck bodies has been proposed.

The influence of the truck body bottom elements geometric parameters on its stress-strain state (SSS) has been investigated with the general application of computer modeling methods. The research was carried out by the module Simulation engineering analysis tools of the specialized software SolidWorks on the developed CAD - model of the truck semi - trailer body. The analysis of a change of the stress-strain state parameters at a change of body bottom elements geometrical parameters has been conducted. The nature of static stress and displacement change depending on a change of channel cross section proportions at the fixed geometrical sizes and thickness of a blank and material of a body bottom has been investigated. On the basis of the research results, the graphical dependences of the static stress change, displacement and safety factor (FOS) on the shelf width and channel thickness, as well as the dependence of static stresses in the channel on the channel wall thickness and body bottom sheet thickness are being constructed. An equation that describes the nature of the static stress change in the channels of the body semi-trailer bottom has been obtained. The results of research on improving the design of the truck body provide the basis for engineering solutions to improve the design of the semi-trailer body bottom, which allows to maximize load capacity and improve strength, reduce weight and extend service life, and maintain the technical resource.

Keywords: semi - trailer body bottom, channel, scan, static stress, static displacement, CAD model.

© Ляшук О. Л., Гевко І. Б., Левкович М. Г., Вовк Ю. Я., Сташків М. Я., Капський Д. В.

Статтю прийнято
до редакції 09.04.21