

2. Суглобов В.В. Исследование причин отказов автопогрузчиков при эксплуатации в морских портах / В.В. Суглобов, В.П. Лаврик, И.А. Нефёдов // Підйомно-транспортна техніка – Дніпропетровськ: ДПТ, 2009. – № 3. – С. 103–108.

3. Нефёдов И.А. Разработка математической модели колебаний вилочного автопогрузчика / И.А. Нефёдов // Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета: Сб. науч. трудов. – Харьков: ХНАДУ, 2012. – Вып. 57. – С. 140–145.

4. Суглобов В.В. Разработка динамической модели автопогрузчика / В.В. Суглобов, В.П. Лаврик, И.А. Нефёдов // Підйомно-транспортна техніка. – Дніпропетровськ: ДПТ, 2006. – № 3. – С. 32 – 41.

5. Карпенко Т.Н. Исследование движения автопогрузчика после фронтального наезда на препятствие / Т.Н. Карпенко, И.А. Нефёдов // Вісник Донецької академії автомобільного транспорту. – Донецьк: «Рекламно-видавнича фірма «Молнія», – 2012. – № 4. – С. 67–77.

Nefyodov I.O., Lavryk V.P., Suglobov V.V.

RESEARCH OF THE OPERATING CONDITIONS OF FRONT LOADERS

The operating conditions of forklifts in seaports and the resulting damage to forklifts were investigated. Solid-state models were developed to study the stress-strain state of the metal structure of the forklift truck's forklift using the finite element method, which allowed identifying the most loaded areas - the guide roller support, the side sheet of the inner frame, the guide roller.

The use of elastic shock absorbers was proposed, which, in addition to the absorption of dynamic loads, provide damping of vibrations due to the internal friction of elastic materials. Recommendations were given on the selection of elastic shock absorber materials for balance carts, taking into account their shock-absorbing and damping capabilities.

Keywords: *forklifts, forklift, shock-absorbing and damping capabilities, materials of elastic shock absorbers.*

Стаття надійшла 20.04.2025 р.

УДК 621.833.1

doi.org/10.31498/2522-9990292025330267

Суглобов В.В., Кльон А.М.

АНАЛІЗ НОРМАТИВНОЇ БАЗИ ДЛЯ СИЛОВОГО РОЗРАХУНКУ ЦИЛІНДРИЧНИХ ЗУБЧАСТИХ ПЕРЕДАЧ

У статті розглянуто сучасний стан нормативної бази для силового розрахунку циліндричних зубчастих передач в Україні та світі. Проведено порівняння методик розрахунку міцності зубців циліндричних коліс, викладених у стандартах ISO 6336 та ГОСТ 21354-87.

Ключові слова: *циліндричні зубчасті передачі, силовий розрахунок, стандарт.*

Постановка проблеми. З 1 січня 2018 року, згідно з наказом ДП «Український науково-дослідний і навчальний центр проблем стандартизації, сертифікації та якості», чинність міждержавних стандартів (ГОСТів), розроблених до 1992 року, в Україні було скасовано [1]. Незважаючи на це, автори навчальної та технічної літератури, виданої останніми роками, у розрахунках зубчастих передач продовжують посилалися на згаданий міждержавний стандарт (див., наприклад, [2]).

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Довгий час українська інженерна практика спиралася на стандарти колишнього СРСР — ГОСТи. Зокрема, силовий розрахунок циліндричних зубчастих передач базувався на методиці, викладеній у ГОСТ 21354-87 [3], чинність якого було скасовано. З іншого боку, в українських технічних університетах і на виробничих підприємствах впроваджується дедалі більше західних систем автоматизованого проектування (САПР), у яких реалізовано методики розрахунку типових деталей і вузлів, зокрема зубчастих передач, що ґрунтуються на міжнародних стандартах. Так, наприклад, модулі розрахунку циліндричних зубчастих передач наявні в таких САПР, як Autodesk Inventor, KISSsoft, MDESIGN gear та ін.

Мета дослідження. Порівняльний аналіз сучасної національної нормативної бази для силового розрахунку циліндричних зубчастих передач з відповідними міжнародними стандартами.

Основний матеріал дослідження. Стандарти для силового розрахунку циліндричних зубчастих передач, чинні в Україні на сьогодні, наведено в табл. 1 [4 – 8] (до цієї таблиці також включено скасований ГОСТ 21354-87 з метою його подальшого порівняння з чинними національними та міжнародними стандартами).

Як впливає з наведених даних, основним нормативним документом для силового розрахунку циліндричних зубчастих передач в Україні є ДСТУ ISO 6336, поділений на кілька окремих частин. При цьому структура та зміст цих частин повністю відповідають міжнародному стандарту ISO 6336:1996.

У табл. 2 наведено огляд актуальних на сьогодні міжнародних нормативних документів серії ISO 6336 [9], яка включає міжнародні стандарти, технічні специфікації та технічні звіти під загальною назвою «Розрахунок навантажувальної здатності циліндричних прямозубих і косозубих передач».

Таблиця 1 – Українські стандарти для силового розрахунку циліндричних зубчастих передач

Номер та назва стандарту	Відповідність міжнародним стандартам	Статус
ГОСТ 21354-87. Передачі зубчасті циліндричні евольвентні зовнішнього зачеплення. Розрахунок на міцність	DIN 3990-1-1987. Calculation of load capacity of cylindrical gears; introduction and general influence factors	Скасований
ДСТУ ISO 6336-1:2005. Розрахунок навантажувальної здатності циліндричних прямозубих і косозубих передач. Частина 1. Основні принципи, вступна частина і загальні коефіцієнти впливу	ISO 6336-1:1996 Calculation of load capacity of spur and helical gears – Part 1: Basic principles, introduction and general influence factors	Чинний
ДСТУ ISO 6336-2:2005. Розрахунок навантажувальної здатності циліндричних прямозубих і косозубих передач. Частина 2. Розрахунок міцності активної поверхні зубців	ISO 6336-2:1996 Calculation of load capacity of spur and helical gears – Part 2: Calculation of surface durability (pitting)	Чинний
ДСТУ ISO 6336-3:2005. Розрахунок навантажувальної здатності циліндричних прямозубих і косозубих передач. Частина 3. Розрахунок на міцність зубців при вигині	ISO 6336-3:1996 Calculation of load capacity of spur and helical gears – Part 3: Calculation of tooth bending strength	Чинний
ДСТУ ISO 6336-5:2005. Розрахунок навантажувальної здатності циліндричних прямозубих і косозубих передач. Частина 5. Міцність і якість матеріалів	ISO 6336-5:1996 Calculation of load capacity of spur and helical gears – Part 5: Strength and quality of materials	Чинний
ДСТУ ISO 9084:2006. Розрахування навантажувальної здатності циліндричних прямозубих і косозубих зубчастих передач. Застосування для швидкісних зубчастих передач та зубчастих передач з подібними вимогами	ISO 9084:2000 Calculation of load capacity of spur and helical gears —Application to high speed gears and gears of similar requirements	Чинний

Таблиця 2 – Огляд нормативних документів серії ISO 6336

Calculation of load capacity of spur and helical gears (Розрахунок вантажопідйомності прямозубих та косозубих зубчастих коліс)	Last edition (Остання редакція)	International Standard (Міжнародний стандарт)	Technical Specification (Технічна специфікація)	Technical Report (Технічний звіт)
Part 1: Basic principles, introduction and general influence factors (Частина 1: Основні принципи, вступна частина і загальні коефіцієнти впливу)	3 (2019)	X		
Part 2: Calculation of surface durability (pitting) (Частина 2: Розрахунок міцності активної поверхні зубців (опір пітінгу))	3 (2019)	X		
Part 3: Calculation of tooth bending strength (Частина 3: Розрахунок на міцність зубців при вигині)	3 (2019)	X		
Part 4: Calculation of tooth flank fracture load capacity (Частина 4: Розрахунок навантажувальної здатності на злам бокової поверхні зубця)	1 (2019)		X	
Part 5: Strength and quality of materials (Частина 5: Міцність і якість матеріалів)	3 (2016)	X		
Part 6: Calculation of service life under variable load (Частина 6: Розрахунок терміну служби під змінним навантаженням)	2 (2019)	X		
Part 20: Calculation of scuffing load capacity (also applicable to bevel and hypoid gears) Flash temperature method (Частина 20: Розрахунок здатності до задирання (також застосовується до конічних та гіпоїдних передач) — Метод температури спалаху)	2 (2022)		X	
Part 21: Calculation of scuffing load capacity (also applicable to bevel and hypoid gears) — Integral temperature method (Частина 21: Розрахунок навантажувальної здатності на тертя (також застосовний до конічних та гіпоїдних зубчастих передач) — Інтегральний метод температури)	2 (2022)		X	
Part 22: Calculation of micropitting load capacity (Частина 22: Розрахунок навантажувальної здатності на мікропітінг)	1 (2018)		X	
Part 30: Calculation examples for the application of ISO 6336 parts 1, 2, 3, 5 (Частина 30: Приклади розрахунків для застосування ISO 6336 частин 1, 2, 3, 5)	2 (2022)			X
Part 31: Calculation examples of micropitting load capacity (Частина 31: Приклади розрахунків навантажувальної здатності на мікропітінг)	1 (2018)			X

Міжнародні стандарти містять методи розрахунку, що базуються на загальновизнаній практиці та пройшли перевірку часом. Технічні специфікації містять методики, які все ще перебувають на стадії розвитку та потребують подальшого вдосконалення. Технічні звіти мають інформативний характер і зазвичай містять допоміжні матеріали, наприклад приклади розрахунків.

Порівнюючи дані табл. 1 і табл. 2, можна зазначити, що національні стандарти ДСТУ базуються на першій редакції ISO 6336, затвердженій у 1996 році, тоді як чинні міжнародні стандарти серії ISO 6336 вже мають третю редакцію, ухвалену у 2019 році. Аналіз третьої редакції стандартів серії ISO 6336 у порівнянні з попередньою показав, що застосування

оновлених методик розрахунку в окремих випадках призводить до суттєвих змін у значеннях розрахункових коефіцієнтів запасу міцності циліндричних зубчастих коліс [10].

Водночас міжнародний стандарт ISO 9084:2006, на основі якого було затверджено відповідний національний стандарт ДСТУ ISO 9084:2006, наразі має статус скасованого.

Усе це дає підстави стверджувати, що на сьогодні існує певна невідповідність між чинними національними нормативними документами для силового розрахунку циліндричних зубчастих передач і актуальними версіями відповідних міжнародних стандартів.

Практичну цінність становить також питання про ступінь відмінності між методиками силового розрахунку, викладеними у ГОСТ 21354-87 та ISO 6336 (незалежно від редакції). З метою орієнтовної оцінки таких відмінностей проведемо порівняльний аналіз основних формул для розрахунку контактної міцності зубців (табл. 3) та їх міцності на вигин (табл. 4) [3, 11, 12]. Величини, що входять до розрахункових формул, наведено в табл. 5.

Перед безпосереднім порівнянням розрахункових формул варто зазначити, що як ISO 6336:1996, так і ГОСТ 21354-87 ґрунтуються на німецькому стандарті DIN 3990:1987, який був одним із перших комплексних нормативних документів для розрахунку навантажувальної здатності циліндричних зубчастих передач. Відповідно, розрахункові методики, викладені в обох цих стандартах (а також у національних стандартах ДСТУ ISO 6336), повинні мати багато спільного та відрізнятися переважно деталями реалізації.

Таблиця 3 – Формули для розрахунку зубців на контактну міцність

ГОСТ 21354-87	ISO 6336-2:2019
Контактні напруження без врахування додаткових навантажень, (МПа)	
$\sigma_{H0} = Z_E Z_H Z_\varepsilon Z_\beta \sqrt{\frac{F_t}{b_w d_1} \cdot \frac{u+1}{u}}$	$\sigma_{H0} = Z_E Z_H Z_\varepsilon Z_\beta \sqrt{\frac{F_t}{b d_1} \cdot \frac{u+1}{u}}$
Розрахункові контактні напруження, Н/мм ² (МПа)	
$\sigma_H = \sigma_{H0} \sqrt{K_A K_{Hv} K_{H\beta} K_{H\alpha}}$	$\sigma_H = Z_{B(D)} \sigma_{H0} \sqrt{K_A K_\gamma K_{Hv} K_{H\beta} K_{H\alpha}}$
Припустимі контактні напруження, (МПа)	
$\sigma_{HP} = \frac{\sigma_{Hlim} Z_N}{S_{Hmin}} Z_L Z_R Z_v Z_w Z_X$	$\sigma_{HP} = \frac{\sigma_{Hlim} Z_N}{S_{Hmin}} Z_L Z_R Z_v Z_w Z_X$

Таблиця 4 – Формули для розрахунку зубців на міцність при вигині

ГОСТ 21354-87	ISO 6336-3:2019
Напруження вигину без врахування додаткових навантажень, (МПа)	
$\sigma_{F0} = \frac{F_t}{b m_n} Y_{FS} Y_\beta Y_\varepsilon$	$\sigma_{F0} = \frac{F_t}{b m_n} Y_F Y_S Y_\beta Y_B Y_{DT}$
Розрахункові напруження вигину, (МПа)	
$\sigma_F = \sigma_{F0} K_A K_{Fv} K_{F\beta} K_{F\alpha}$	$\sigma_F = \sigma_{F0} K_A K_\gamma K_{Fv} K_{F\beta} K_{F\alpha}$
Припустимі напруження вигину, (МПа)	
$\sigma_{FP} = \frac{\sigma_{Flim} Y_N}{S_{Fmin}} Y_R Y_X Y_\delta$	$\sigma_{FP} = \frac{\sigma_{Flim} Y_N Y_{ST}}{S_{Fmin}} Y_{\delta RelT} Y_{RrelT} Y_X$

Таблиця 5 – Параметри, що враховані у розрахунках міцності зубців

Позначення	Одиниц і виміру	Пояснення	Примітка
Z_E	$\sqrt{H/\text{мм}^2}$	Коефіцієнт, що враховує механічні властивості матеріалів спряжених зубчастих коліс	
Z_H	–	Коефіцієнт, що враховує форму спряжених поверхонь зубців в полюсі зачеплення	
Z_ε	–	Коефіцієнт, що враховує сумарну довжину контактних ліній	
$Z_\beta (Y_\beta)$	–	Коефіцієнт, що враховує нахил зубців при розрахунку контактних напружень (напружень вигину)	
F_t	Н	Окружне зусилля на ділільному циліндрі	
$b_w (b)$	мм	Робоча ширина вінця зубчастої передачі	
d_1	мм	Ділільний діаметр шестерні	
u	–	Передатне число зубчастої передачі	
K_A	–	Коефіцієнт, що враховує зовнішнє динамічне навантаження	
$K_{Hv} (K_{Fv})$	–	Коефіцієнт, що враховує внутрішнє динамічне навантаження при розрахунку контактних напружень (напружень вигину)	
$K_{H\beta} (K_{F\beta})$	–	Коефіцієнт, що враховує нерівномірність розподілу навантаження по довжині контактних ліній при розрахунку контактних напружень (напружень вигину)	
$K_{H\alpha} (K_{F\alpha})$	–	Коефіцієнт, що враховує розподіл навантаження між зубцями при розрахунку контактних напружень (напружень вигину)	
$Z_{B(D)}$	–	Коефіцієнт однопарного зачеплення шестерні (колеса)	лише [11]
K_γ	–	Коефіцієнт нерівномірності навантаження в зачепленні	лише [11]
$\sigma_{Hlim} (\sigma_{Flim})$	МПа	Граничне значення контактної витривалості поверхні зубців (витривалості при вигині), що відповідає базовій кількості циклів напруження	
$S_{Hmin} (S_{Fmin})$	–	Мінімальний коефіцієнт запасу міцності при розрахунку контактних напружень (напружень вигину)	
$Z_N (Y_N)$	–	Коефіцієнт довговічності при розрахунку контактних напружень (напружень вигину)	
Z_L	–	Коефіцієнт, що враховує вплив в'язкості мастильного матеріалу	
Z_R	–	Коефіцієнт, що враховує вплив вихідної шорсткості спряжених поверхонь зубців	
Z_v	–	Коефіцієнт, що враховує вплив окружної швидкості	

Ремонт та відновлення деталей машин

Z_w	–	Коефіцієнт, що враховує перепад твердостей матеріалів спряжених поверхонь зубців	
$Z_X (Y_X)$	–	Коефіцієнт, що враховує розмір зубчастого колеса при розрахунку контактних напружень (напружень вигину)	
m_n	мм	Нормальний модуль	
Y_{FS}	–	Коефіцієнт, що враховує вплив форми зубців та концентрацію напружень	лише [3]
$Y_\delta (Y_{\delta RelT})$	–	Опорний коефіцієнт (враховує чутливість матеріалу до концентрації напружень)	
Y_ϵ	–	Коефіцієнт, що враховує вплив перекриття зубців	лише [3]
Y_F	–	Коефіцієнт форми зубців	лише [12]
Y_S	–	Коефіцієнт концентрації напружень	лише [12]
Y_B	–	Коефіцієнт товщини обода	лише [12]
Y_{DT}	–	Коефіцієнт збільшеної висоти зубця	лише [12]
$Y_R (Y_{RelT})$	–	Коефіцієнт, що враховує вплив шорсткості перехідної поверхні	

* Коефіцієнти, що входять до формул лише одного зі стандартів (ГОСТ 21354-87 або ISO 6336), вказані у примітках

Порівняльний аналіз основних розрахункових формул, наведених у табл. 3 та табл. 4, дозволяє стверджувати, що методики розрахунку навантажувальної здатності циліндричних прямозубих і косозубих передач, викладені у ГОСТ 21354-87 та ISO 6336:2019, є дійсно суттєво схожими. Обидва стандарти при розрахунку контактної міцності зубчастих передач ґрунтуються на загальній теорії Герца, але використовують її у модифікованому вигляді, адаптованому до специфіки зубців шестерень. Розрахунок міцності на вигин базується на спрощеній моделі зубця як балки, з урахуванням емпіричних коефіцієнтів.

Розрахунок за ISO 6336:2019 є точнішим у порівнянні з розрахунком за ГОСТ 21354-87 завдяки врахуванню більшої кількості факторів, що впливають на міцність зубців циліндричного колеса.

ВИСНОВКИ

Проведений аналіз сучасної національної нормативної бази для силового розрахунку циліндричних зубчастих передач та порівняння її з відповідними міжнародними стандартами показав:

1. У цей час міждержавний стандарт ГОСТ 21354-87, який регламентував розрахунок міцності зубців циліндричної зубчастої передачі, в Україні втратив чинність. Замість нього діючим є ДСТУ ISO 6336, що складається з кількох нормативних документів та повністю відповідає міжнародному стандарту ISO 6336:1996 (по суті, перший є тотожним перекладом останнього).

2. Національні стандарти ДСТУ базуються на першій редакції ISO 6336, затвердженій у 1996 році, в той час як сучасні міжнародні стандарти серії ISO 6336 мають третю редакцію, затверджену у 2019 році. Таким чином, на даний момент існує певна невідповідність національних нормативних документів для силового розрахунку циліндричних зубчастих передач з сучасними версіями відповідних міжнародних стандартів.

Порівняльний аналіз основних розрахункових формул, наведених у ГОСТ 21354-87 та ISO 6336:2019, дозволяє стверджувати, що обидва стандарти базуються на спільній методиці розрахунку міцності циліндричних зубчастих передач. Разом з тим розрахунок за ISO 6336:2019 є точнішим завдяки врахуванню більшої кількості факторів, що впливають на міцність зубців циліндричного колеса.

Список використаних джерел

1. НАКАЗ ДП «Український науково-дослідний і навчальний центр проблем стандартизації, сертифікації та якості» від 14.12.2015 № 184 «Про скасування міждержавних стандартів в Україні, що розроблені до 1992 року». URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0184774-15>
2. Гайдамака А. В. Деталі машин. Основи теорії та розрахунків : навчальний посібник для студентів машинобудівних спеціальностей усіх форм навчання / А. В. Гайдамака. – Харків : НТУ «ХПІ», 2020. – 275 с.
3. ГОСТ 21354-87. «Передачи зубчатые цилиндрические эвольвентные внешнего зацепления. Расчет на прочность».
4. ДСТУ ISO 6336-1:2005. Розрахунок навантажувальної здатності циліндричних прямозубих і косозубих передач. Частина 1. Основні принципи, вступна частина і загальні коефіцієнти впливу.
5. ДСТУ ISO 6336-2:2005. Розрахунок навантажувальної здатності циліндричних прямозубих і косозубих передач. Частина 2. Розрахунок міцності активної поверхні зубців.
6. ДСТУ ISO 6336-3:2005. Розрахунок навантажувальної здатності циліндричних прямозубих і косозубих передач. Частина 3. Розрахунок на міцність зубців при вигині.
7. ДСТУ ISO 6336-5:2005. Розрахунок навантажувальної здатності циліндричних прямозубих і косозубих передач. Частина 5. Міцність і якість матеріалів.
8. ДСТУ ISO 9084:2006. Розраховування навантажувальної здатності циліндричних прямозубих і косозубих зубчастих передач. Застосування для швидкісних зубчастих передач та зубчастих передач з подібними вимогами.
9. International Organization for Standardization (ISO). URL: <https://www.iso.org>.
10. Hanspeter Dinner. Changes in ISO 6336:2019— Parts 1, 2, 3, 5 and 6 / GEAR TECHNOLOGY | June 2021, PP 54 – 63. URL <https://www.kisssoft.com/en/products/publications/brochures/changes-in-iso-63362019-parts-1-2-3-5-and-6>
11. ISO 6336-2:2019. Calculation of load capacity of spur and helical gears – Part 2: Calculation of surface durability (pitting)
12. ISO 6336-3: 2019. Calculation of load capacity of spur and helical gears – Part 3: Calculation of tooth bending strength.

Suglobov V.V., Klyon A.M.

ANALYSIS OF THE REGULATORY BASIS FOR FORCE CALCULATION OF CYLINDRICAL GEAR TRANSMISSIONS

The article examines the current state of the regulatory framework for the strength calculation of cylindrical gears in both national and international contexts. A comparative analysis of the methods for calculating the strength of cylindrical gear teeth, as outlined in the ISO 6336 and GOST 21354-87 standards, is provided.

Keywords: cylindrical gear transmissions, strength calculation, standard.

Стаття надійшла 10.05.2025 р.