

Голенко К.Е.¹, Войчишин Ю.І.², Свідерський В.П.¹, Клипко О.Р.³¹ Хмельницький національний університет, м. Хмельницький, Україна² Національний університет «Львівська політехніка»³ ВСП Автомобільно – дорожній фаховий коледж НУ «Львівська політехніка»

МОДЕЛЮВАННЯ ПОВЕДІНКИ СКЛООЧИСНИКА ПІД ЧАС КОНТАКТУ З КРИВОЛІНІЙНОЮ ПОВЕРХНЕЮ, ФАКТОРИ ВПЛИВУ НА БЕЗПЕКУ ВОДІННЯ

Як відомо, склоочисник (також називають «двірником») являється пристроєм, що використовується для видалення крапель дощу (вологи) та бруду з вітрового скла транспортного засобу. Усі транспортні засоби (включно з потягами та літаками) оснащені склоочисниками, що відповідають нормативним вимогам. Одним з ключових параметрів оцінки якості очищення поверхні скла виступає механічний тиск – його величина та характер розподілу по поверхні. У цій статті проводяться експерименти для демонстрації неоднорідності цього параметру при контакті склоочисника з криволінійною поверхнею скла. Зазначена неоднорідність посилюється рухомістю ланок механізму склоочисника та внутрішніми деформаціями його гумової щітки. Величина тиску залежить від таких факторів, як: притискне зусилля склоочисника; конфігурація гумової щітки (площа контактної поверхні, яка визначається профілем гумового леза), матеріалом виготовлення (еластичністю) щітки; конструкцією каркасу самого склоочисника, тощо. В рамках даної роботи буде змодельовано методом кінцевих елементів (МКЕ) поведінку склоочисника разом з гумовою щіткою під час контакту з криволінійною поверхнею скла в умовах змінного навантаження. Для теоретичного розуміння процесів деформацій авторами додатково будуть розглянуті різні математичні моделі, спрямовані на імітацію натурної поведінки склоочисника в реальних умовах експлуатації. В процесі досліджень даних математичних моделей буде проведено порівняння їх підходів щодо врахування реальних фізичних процесів навантаження та пружних деформацій складових склоочисника включно з енергіями зсуву шарів, тощо. На базі отриманих результатів буде сформовано висновки щодо порівняльності математичних моделей з МКЕ-моделями та визначено практичну ефективність застосування обох підходів аналізу поведінки склоочисників.

Ключові слова: склоочисники, вітрове скло, розподілений тиск, питоме навантаження, напруження, пластичні деформації, еластичність, математичні моделі, Ansys Transient Structural.

ВСТУП

З точки зору комфорту водіння в автомобільному контексті зниження якості очищення поверхні скла може турбувати водія транспортного засобу візуально або акустично, що впливає на безпеку руху транспортного засобу. Дана проблема наразі викликає великий інтерес для виробників та розробників автобусів, легкових та вантажних автомобілів. Існує декілька нормативних актів, які регулюють стандарти склоочисників, у тому числі ті, що встановлені Федеральними Стандартами Безпеки Автомобілів (FMVSS) у Сполучених Штатах і Європейською економічною комісією ООН (ЄЕК ООН) у Європі. У Сполучених Штатах FMVSS 104 і FMVSS 135 встановлюють вимоги до систем склоочисників на автомобілях. FMVSS 104 вимагає, щоб системи склоочисників були здатні очищати певну ділянку вітрового скла, і вказує кількість циклів, які склоочисник повинен виконати під час тестування. FMVSS 135 вимагає, щоб система склоочисників не заважала роботі водія. Подібним чином Правила ЄЕК ООН № 43 (Regulation No. 43) містять вимоги до роботи склоочисників, включаючи їх здатність ефективно очищати вітрове скло від дощу, снігу чи іншого сміття. Зокрема, у Додатку (Аппех 7) зазначено, що щітки склоочисників мають бути сконструйовані таким чином, щоб забезпечити вільне поле зору водія та бути здатними ефективно працювати за різних умов, таких як дощ і сніг. Правила ЄЕК ООН № 43 визначають вимоги тестування склоочисників з типовим одинарним гумовим лезом щітки. Мета наших досліджень – проаналізувати поведінку гумового леза щітки у складі склоочисника під час контакту з криволінійною поверхнею скла в умовах змінного навантаження у середовищі Ansys Transient Structural. Додатково буде проаналізовано відповідні математичні моделі для імітації процесів деформації склоочисника.

АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДАНИХ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Перш ніж перейти до аналізу сучасних досліджень на тему ефективності експлуатації склоочисників та відповідних їм факторів впливу, слід ознайомитися з регуляторними вимогами Правил ЄЕК ООН № 43 (Regulation No. 43) [1]. Там чітко наведені стандартні розміри поперечного перерізу лез гумових щіток склоочисників, що дозволяє з впевненістю створювати власні Solid-моделі для проведення різнотипних розрахунків. Такий підхід несе практичну користь для

виробників, адже отримані результати тих чи інших розрахунків будуть базуватися на реальних профілях склоочисників.

Оскільки одним з основних критеріїв оцінки ефективності склоочисників виступає тиск на поверхню скла зі сторони відповідного леза гумової щітки, доцільно ознайомитися з публікацією [2], що розглядає критичні умови - виникнення вібраційних явищ, наприклад, стукотні вібрації. У статті [3] наведено точні математичні формули для частот вібрації гумового склоочисника на лобовому склі. Фактично прогнози моделі майже ідеально узгоджуються з експериментальними даними у статті. Ці математичні формули для частот вібрації гумового склоочисника на лобовому склі отримано з аналізу тривимірної пружної моделі з конкретними граничними умовами. Дану тематику доповнюють роботи [5-6].

Також є доцільним дослідити нові розробки в галузі склоочисників та підходи до наукових досліджень. Так, у статті [7] розглядаються різні патенти склоочисників шляхом прийняття різноманітних структур і пристроїв для досягнення нових функцій за останні роки. У порівнянні з новими конструкціями традиційний склоочисник має обмежену площу стирання. Крім того, він не здатний регулювати свою швидкість відповідно до зміни погоди. Таким чином, було створено кілька типів нових конструкцій склоочисників для оптимізації проблем, таких як обмежена зона очищення, очищення від сильного снігу, спрощення конструкції, зменшення шуму, вібрації та різкості руху (а саме NVH), зручність заміни щітки та автоматичне керування склоочисником. Так, робота [8] присвячена проектуванню та впровадженню адаптивного автоматичного склоочисника, чутливого до дощу, що належить до наукової новизни. У роботі [9] пропонується система склоочисників повітряним струменем, яка складається з високошвидкісного випускного отвору для повітря, встановленого на краю лобового скла, через який над вітровим склом випускається високошвидкісна маса повітря, яка називається повітряним пучком. Досить цікавою представляється публікація [10], де авторами наведено ретроспективний огляд, зосереджений на розробці дизайну склоочисників і омивачів автомобіля з 1939 по 2021 рік. На основі огляду помічено, що склоочисники та омивачі, встановлені на наземних транспортних засобах, пройшли серйозні розробки для оптимізації очищення лобового скла. Також було проведено огляд важливості належної роботи системи склоочисника та омивача, щоб зрозуміти фактор безпеки наявності такої системи для транспортних засобів пасажирів.

До наукових публікацій, що досліджують природу механічних процесів склоочисників (наприклад, тиск на скло, що є частиною теми нашого аналізу) можна віднести роботу [11], де представлено оптимізацію максимальної величини кутового прискорення вихідних ланок зв'язної системи для зменшення амплітуд звукових хвиль шуму склоочисника. Авторами створено модель руху CDLS, а потім її обґрунтовано за допомогою ADAMS. У роботі [12] окреслено вплив геометричної конфігурації системи склоочисників на появу стукоту. Результати вимірювань показують комбінований вплив навантаження, прикладеного до гумової щітки склоочисника, і кута атаки на вібраційний рівень щітки. Математична модель із чотирма ступенями свободи, заснована на теорії ковзання, вказує на необхідні умови для нестабільного руху з точки зору орієнтації щітки склоочисника на скляній поверхні. Публікація [13] охоплює теоретичні дослідження функціональності склоочисників (залежить від зарядки та розрядки конденсаторів). Цікава статистика наводиться у роботі [14] - загалом склоочисники використовувалися 8,6% часу. Під час польових експлуатаційних випробувань 96 учасників керували транспортними засобами з приладами, з яких записувалися дані водіння. Результати впливають на конструкцію та довговічність склоочисників, двигунів склоочисників, вітрового скла. Близькою до нашої публікації з точки зору методів досліджень (моделювання кінцевими елементами) та проаналізованих параметрів (навантаження на скло, деформації склоочисника) є публікація [15], де проаналізовано величину переміщення склоочисників залежно від тиску за допомогою методу кінцевих елементів (МКЕ) зі стандартами KS з алюмінієвого сплаву, виготовлених методом лиття під тиском. Згідно з результатами МКЕ, міцність кінцевого склоочисника з алюмінієвого сплаву покращилася на 55% порівняно зі сталевим склоочисником, а вага першого була меншою приблизно на 45%.

ЦІЛЬ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Ціль представлених досліджень полягає у визначенні особливостей моделювання поведінки склоочисників разом з гумовою щіткою під час контакту з криволінійною поверхнею скла. Такий підхід вирішує основну задачу - імітацію натурної поведінки склоочисника в реальних умовах експлуатації, дає цінні дані щодо факторів впливу на розподіл тиску по поверхні скла, деформацію

щітки склоочисника та підбір альтернативних матеріалів його виготовлення. Додатково проведені паралелі з математичними моделями, що описують взаємодію пружних шарів.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Перш ніж перейти до аналітичних досліджень Solid-моделі склоочисника, слід розглянути особливості конструкції вузла загалом. Отже, типова збірна конструкція склоочисника складається з фіксатора (1), каркасу склоочисника (2), гумового леза щітки склоочисника (3), які разом обертаються на осі кронштейну (4) (рис.1а). Фіксатор (1) сполучає каркас склоочисника (2) з однієї сторони та кронштейн осі обертання (4) – з іншої. Вісь кронштейну приводиться в обертальний рух відповідним електродвигуном. Фіксатор (1) з'єднаний циліндричним шарніром з кронштейном (4) та притискається до поверхні скла пружиною (рис.1в). На рис.1в проілюстровано модель склоочисника в зборі.

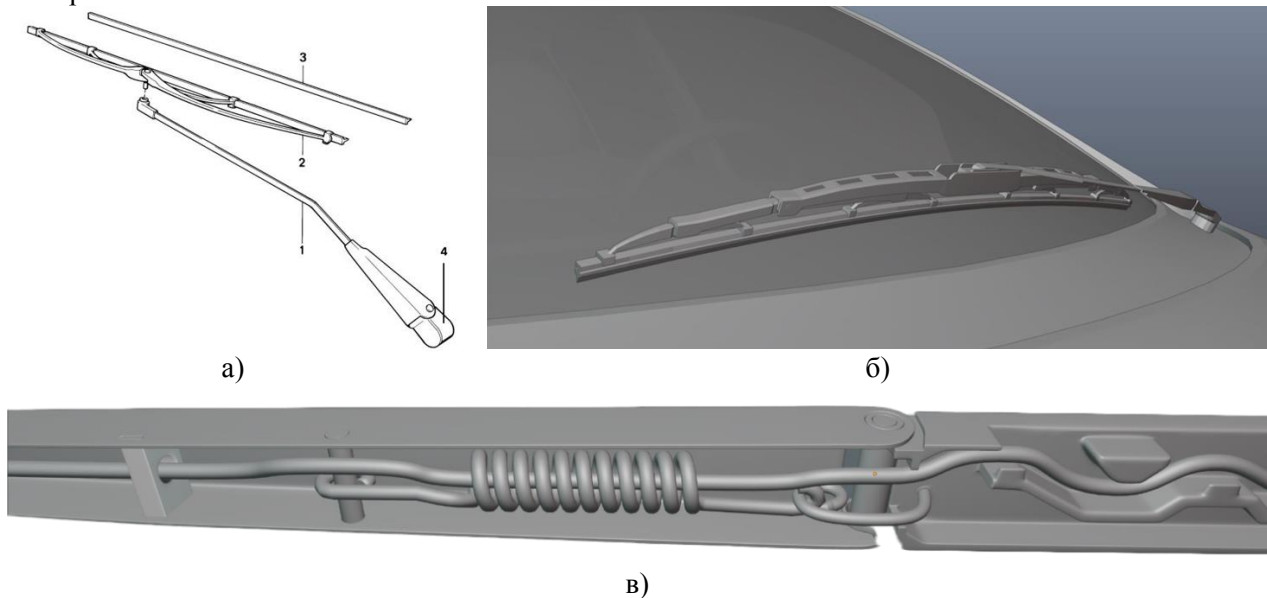


Рисунок 1 – Модель механізму склоочисника: а) принципова схема; б) Solid-модель на авто; в) притискна пружина під фіксатором

Навантаження, створюване пружиною (рис.1в), розташованою під фіксатором (1), передається безпосередньо на каркас склоочисника, створюючи тиск на поверхню скла через гумове лезо щітки. Здавалося б, що цей розподіл буде рівномірним по довжині контакту леза зі склом, проте це не є так: каркас склоочисника (2) являє собою збиральну конструкцію з системи коромисел (ланок), що обертаються на власних осях (рис.1б). Їх задача полягає у забезпеченні повторюваності кривизни скла самим склоочисником. Гумова щітка кріпиться до сталевих коромисел каркасу склоочисника відповідними затискачами, жорсткість котрих є суттєво вищою за гумову щітку. В результаті зазначені затискачі створюють точкові навантаження на гумову щітку, моделювання деформації якої буде представлено нижче. І якщо вже на даному етапі спробувати припустити, що розв'язання цієї проблеми може полягати у підборі гуми щітки вищої жорсткості або альтернативній конфігурації профілю леза (розміри поперечного перерізу), то, на жаль, це не є можливим, адже обидва параметри передбачені вимогами Правил ЄЕК ООН № 43 (Regulation No. 43).

Для розуміння: зазначене гумове лезо (позначене 4 на рис.2а) випробовується за стандартним тестом. Гумова щітка склоочисника, яка використовується для випробування на безпечність жорсткості стирання скла від бруду, має бути на основі гуми хлоропренового типу (клас CR), хлорована та з антифрикційним покриттям на основі графіту та повинна рухатися по поверхні (9) стандартизованої посудини шириною 80 мм або у іншому сертифікованому обладнанні, умови якого докладно описані у вимогах чинних Правил ЄЕК ООН № 43 (Annex 3). Рис.2б Правил ЄЕК ООН № 43 (Regulation No. 43) визначає розміри поперечного перерізу гумової щітки. Так, товщина леза (7) складає 0.6 мм; шийка (2) – 0.5 мм; висота (1 і 3) – 5 мм; ширина (5) – 9 мм.

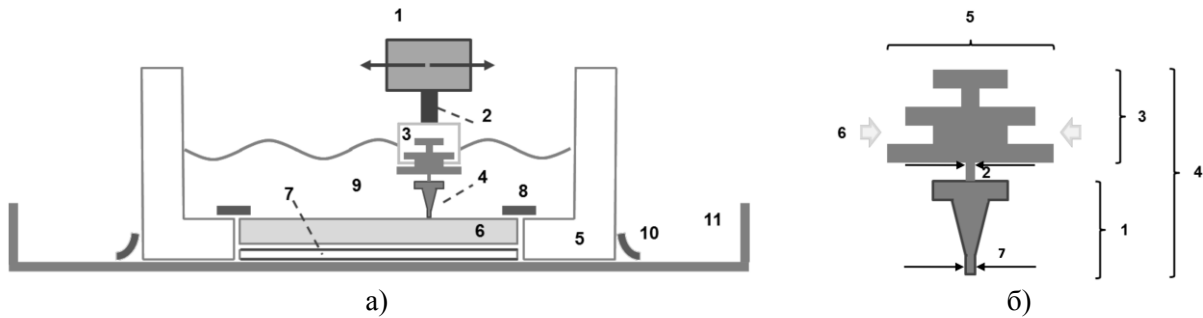


Рисунок 2 – Параметри щітки склоочисника згідно з Правил ЄЕК ООН № 43: а) нормативні випробування; б) поперечне сечення щітки

Для розрахунку питомого навантаження можуть бути застосовані різні математичні моделі. Найбільш поширеною є модель Вінклера - лінійна пружна модель місцевих деформацій з єдиним параметром жорсткості (рис.3).

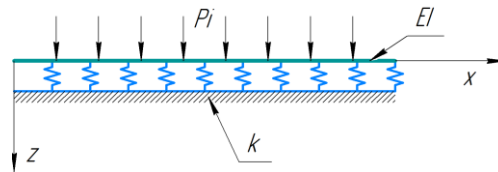


Рисунок 3 – модель Вінклера

Відповідне рівняння моделі можна записати так:

$$EI \frac{d^4 w(x)}{dx^4} + kw(x) = \sum_{i=1}^m P_i \delta(x - x_i), \quad (1)$$

де: $w(x)$ - вертикальний прогин балки; EI - жорсткість балки Ейлера-Бернуллі на прогин; P_i – точкові навантаження від коромисел склоочисника на гумову щітку (в нашому випадку $i=8$, що відповідає крапкам на рис.5б).

Крайові умови для такої балки Ейлера-Бернуллі з вільними кінцями можуть бути записані у наступному вигляді:

$$\begin{cases} \frac{d^4 w}{dx^4}(0) = \frac{d^4 w}{dx^4}(L_0) = 0 \\ \frac{d^3 w}{dx^3}(0) = \frac{d^3 w}{dx^3}(L_0) = 0 \end{cases}, \quad (2)$$

Це рівняння можна вирішити за допомогою методів, запропонованих у роботах [16-18]. На жаль, результати з такою моделлю не є репрезентативними для експериментальних досліджень, представлених вище (з використанням методу кінцевих елементів). Для подальшого розвитку необхідно враховувати певний вид взаємодії між пружними середовищами: жорсткість гумової щітки та каркасу склоочисника разом з коромислами на відповідних осях.

Наступним наближенням до імітації натурної поведінки склоочисників слугує модель Пастернака, яка враховує взаємодію зсуву між пружинами. Математичний опис цієї моделі наведено на рис. 4. Верхній кінець пружини з'єднаний з шаром, що складається з нестисливих вертикальних елементів, які деформуються тільки поперечним зсувом.

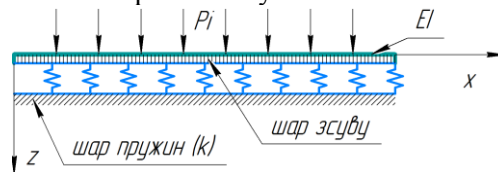


Рисунок 4 – Модель Пастернака з додатковим шаром

Відповідне рівняння для моделі Пастернака можна записати у наступному вигляді:

$$EI \frac{d^4 w(x)}{dx^4} + L(w) + kw(x) = \sum_{i=0}^m P_i \delta(x - x_i), \quad (3)$$

де: $L(w)$ – оператор, що враховує взаємодію зсуву в основі. Відповідні граничні умови вільні з обох кінців.

Представлена модель дозволяє зробити висновок, що взаємодії зсуву мають сильний вплив на результати тиску, але така модель не є достатньо точною для опису внутрішньої поведінки елементів

склоочисника, тому наступним кроком ми розглянемо балку з поперечним зсувом, включаючи зсув гумового леза. Ця балка базується на класичній моделі Вінклера, щоб врахувати вертикальний прогин системи через вигин гумового профілю. Щоб розв'язати проблему вигину, ми визначаємо два незалежні параметри $w(x)$ і $\varphi(x)$: вертикальний прогин балки та обертання поперечних перерізів відповідно. Розглянемо енергію деформації системи:

$$U_{res} = U_b + U_s + U_p \quad (4)$$

У цьому виразі перший член враховує енергію деформації згину балки (U_b), а другий – енергію деформації зсуву балки (U_s). Третій член (U_p) відповідає потенціальній енергії пружинного шару. Відповідні граничні умови все ще є вільними умовами на обох кінцях. Саме дане рівняння (4) і вважається максимально близьким за своїми теоретичними результатами до експериментальних вимірювань.

Для введення кривизни лобового скла в алгоритм розрахунку для випадку безперервного контакту щітки склоочисника з вітровим склом спочатку визначимо крайові умови моделі (рис. 13а). Отже, модель містить: кривизну скла; модель Вінклера між склом та склоочисником, що відповідає гумовій щітці; каркас склоочисника з точковими навантаженнями від затискачів коромисел (представлені крапками на рис.5а). Ця конфігурація відповідає початку контакту між гумовою щіткою (лезом) та вітровим склом. Відносно цієї конфігурації ми тоді визначаємо відхилення балки (каркасу склоочисника), як $w(x)$. Враховуючи гладкість перерізу лобового скла в площині щітки склоочисника, можна точно апроксимувати поверхню лобового скла поліномом n ступеня.

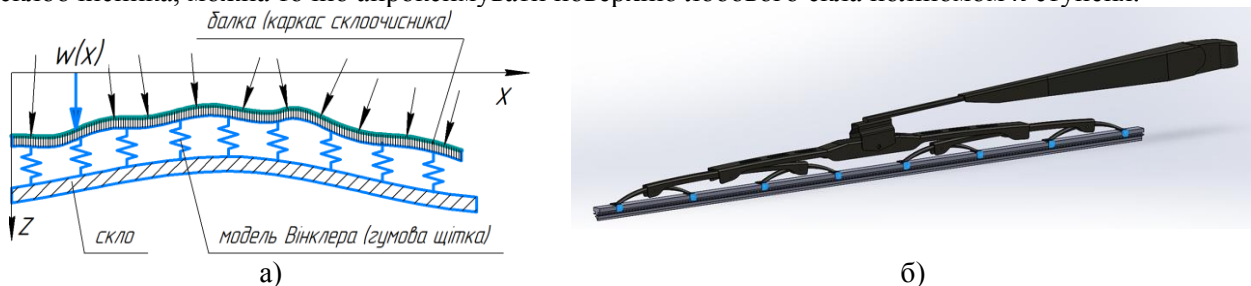


Рисунок 5 – модель склоочисника: а) математична модель з криволінійною поверхнею; б) solid-модель із затискачами коромисел

В такому випадку $w_1(x)$ буде функцією наступного виду:

$$w_1(x) = \sum_{i=0}^n a_i x^i \quad (5)$$

З виразу глобальної енергії деформації (4) ця кривизна поверхні призводить до зміни потенціальної енергії через модель Вінклера так, що:

$$U_{res} = U_b + U_s + U'_p \quad (6)$$

Застосування принципу Гамільтона призводить до нового рівняння в частинних похідних, тоді як граничні умови залишаються незмінними. Таким же чином, кривизна вітрового скла призводить до зміни положення коромисел, що також змінює орієнтацію точкових навантажень, прикладених затискачами (рис.5б) до гумової щітки. В результаті у конструкції склоочисника відбуваються послідовні взаємозалежні процеси деформацій та переміщень його складових, причому, зміни значень одних ланок породжують зміни значень в інших. Такий перехідний процес неможливо математично описати дискретним станом, а тому на рівні МКЕ-розрахунків потрібно вдаватися до таких середовищ, як Ansys Transient Structural, що здатні розрахувати проміжні стани системи.

Проаналізуємо найбільш складний випадок експлуатації склоочисника, коли поверхня скла криволінійна, а гумового леза – прямолінійна (рис.6). Така ситуація є можливою, якщо закрили/замерзли осі обертання коромисел й уся конструкція в результаті стала знерухомленою (від старості, погодних умов або порушення правил експлуатації склоочисників). Прикладемо наступні крайові умови до нашої Solid-моделі (рис.6):

- fixed support (жорстке заземлення до нижньої грані скла) – маркер С;
- displacement, displacement 2 (переміщення каркасу склоочисника по вертикалі вздовж осі Y із заборонаю переміщення у перпендикулярному напрямку) – маркери А, В. Навантаження В

прикладено в центральній частині каркасу (область кріплення фіксатору, який, власне, й передає навантаження через пружину - рис.1в). Навантаження складає 20 Н;

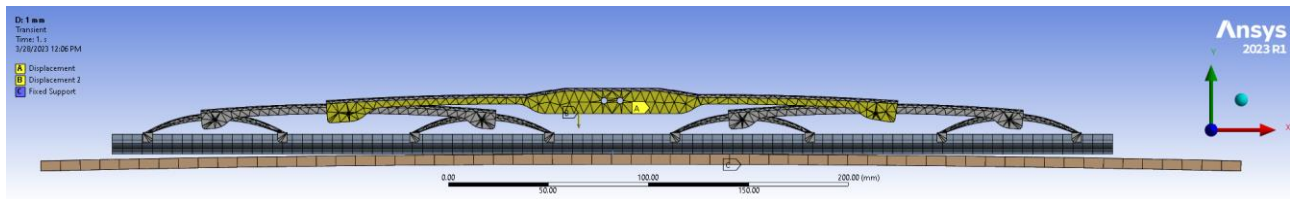


Рисунок 6 – Solid-модель склоочисника на поверхні скла

Property	Value	Unit
Material Field Variables	Table	
Density	1000	kg m ⁻³
Ogden 3rd Order		
Material Constant MU1	6.1803E+05	Pa
Material Constant A1	1.3	
Material Constant MU2	1180	Pa
Material Constant A2	5	
Material Constant MU3	-9810	Pa
Material Constant A3	-2	
Incompressibility Parameter D1	4.825E-09	Pa ⁻¹
Incompressibility Parameter D2	0	Pa ⁻¹
Incompressibility Parameter D3	0	Pa ⁻¹

а)

Property	Value	Unit
Material Field Variables	Table	
Density	2465	kg m ⁻³
Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion		
Coefficient of Thermal Expansion	9.35E-06	C ⁻¹
Isotropic Elasticity		
Derive from	Young's Modulus and Poisson's R...	
Young's Modulus	6.993E+10	Pa
Poisson's Ratio	0.2149	
Bulk Modulus	4.088E+10	Pa
Shear Modulus	2.878E+10	Pa
Tensile Yield Strength	Tabular	
Tensile Ultimate Strength	Tabular	
Isotropic Thermal Conductivity	1.003	W m ⁻¹ C ⁻¹
Specific Heat Constant Pressure, C _p	898.6	J kg ⁻¹ C ⁻¹
Isotropic Electric Loss Tangent	Tabular	
Isotropic Resistivity	2.511E+10	ohm m
Isotropic Relative Permittivity	7.146	

б)

Property	Value	Unit
Material Field Variables	Table	
Density	7850	kg m ⁻³
Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion		
Coefficient of Thermal Expansion	1.2E-05	C ⁻¹
Isotropic Elasticity		
Derive from	Young...	
Young's Modulus	2E+11	Pa
Poisson's Ratio	0.3	
Bulk Modulus	1.6667E+11	Pa
Shear Modulus	7.6923E+10	Pa
Strain-Life Parameters		
Display Curve Type	Strain...	
Strength Coefficient	9.2E+08	Pa
Strength Exponent	-0.106	
Ductility Coefficient	0.213	
Ductility Exponent	-0.47	
Cyclic Strength Coefficient	1E+09	Pa
Cyclic Strain Hardening Exponent	0.2	
S-N Curve	Tabular	
Interpolation	Log-Log	
Scale	1	
Offset	0	Pa
Tensile Yield Strength	2.5E+08	Pa
Compressive Yield Strength	2.5E+08	Pa
Tensile Ultimate Strength	4.6E+08	Pa
Compressive Ultimate Strength	0	Pa
Isotropic Thermal Conductivity	60.5	W m ⁻¹ C ⁻¹
Specific Heat Constant Pressure, C _p	434	J kg ⁻¹ C ⁻¹
Isotropic Relative Permeability	10000	
Isotropic Resistivity	1.7E-07	ohm m

в)

Рисунок 7 – Фізико-механічні властивості матеріалів моделі Ansys: а) гума; б) скло; в) сталь

Довжина полотна гумової щітки – 500 мм. Коефіцієнт тертя – 0.1. Фізико-механічні властивості матеріалів моделі Ansys представлено на рис.7.

Сітка кінцевих елементів моделі складається з 13868 елементів та 38912 вузлів. Час розрахунку на обладнанні 2 x Intel Xeon 24, RAM 48 Gb, NVIDIA GeForce 4Gb video склав 28 хв 7 с. Середовище розрахунку – Ansys Transient Structural. Поетапність аналізу: 5 кроків по 0.2 с кожен (загальний час навантаження – 1 с). Для кожного кроку закладені наступні проміжні кроки:

- Initial Time Step = 0.01 с;
- Minimum Time Step = 0.001 с;
- Maximum Time Step = 0.1 с.

За результатами аналізу напружено-деформованого стану склоочисника разом з гумовою щіткою та криволінійним склом у кінці експерименту отримано наступні практичні висновки:

1) жодна з математичних моделей не здатна забезпечити імітацію реальних умов експлуатації склоочисника, що особливо видно по неоднорідності деформації гумового леза по його довжині. Незважаючи на лінійний приріст навантаження (20 Н) протягом тривалості експерименту, вздовж гумового леза знаходяться області (рис.8а), які характеризуються обернено пропорційною поведінкою – скорочують свою деформацію (рис.8б,в). Власне, це видно не лише за представленими нижче графіками, але й за синім кольором карти переміщень моделі (рис.8а). Цікавим виявляється той факт, що край гумової щітки так і не досягнув контакту з поверхнею скла, проте отримав найвищі значення

переміщень (1.345 мм), що видно по червоному градієнту (рис.8а). На рис.8г,д представлено напружено-деформований стан гумової щітки (чорний контур відповідає початковому стану).

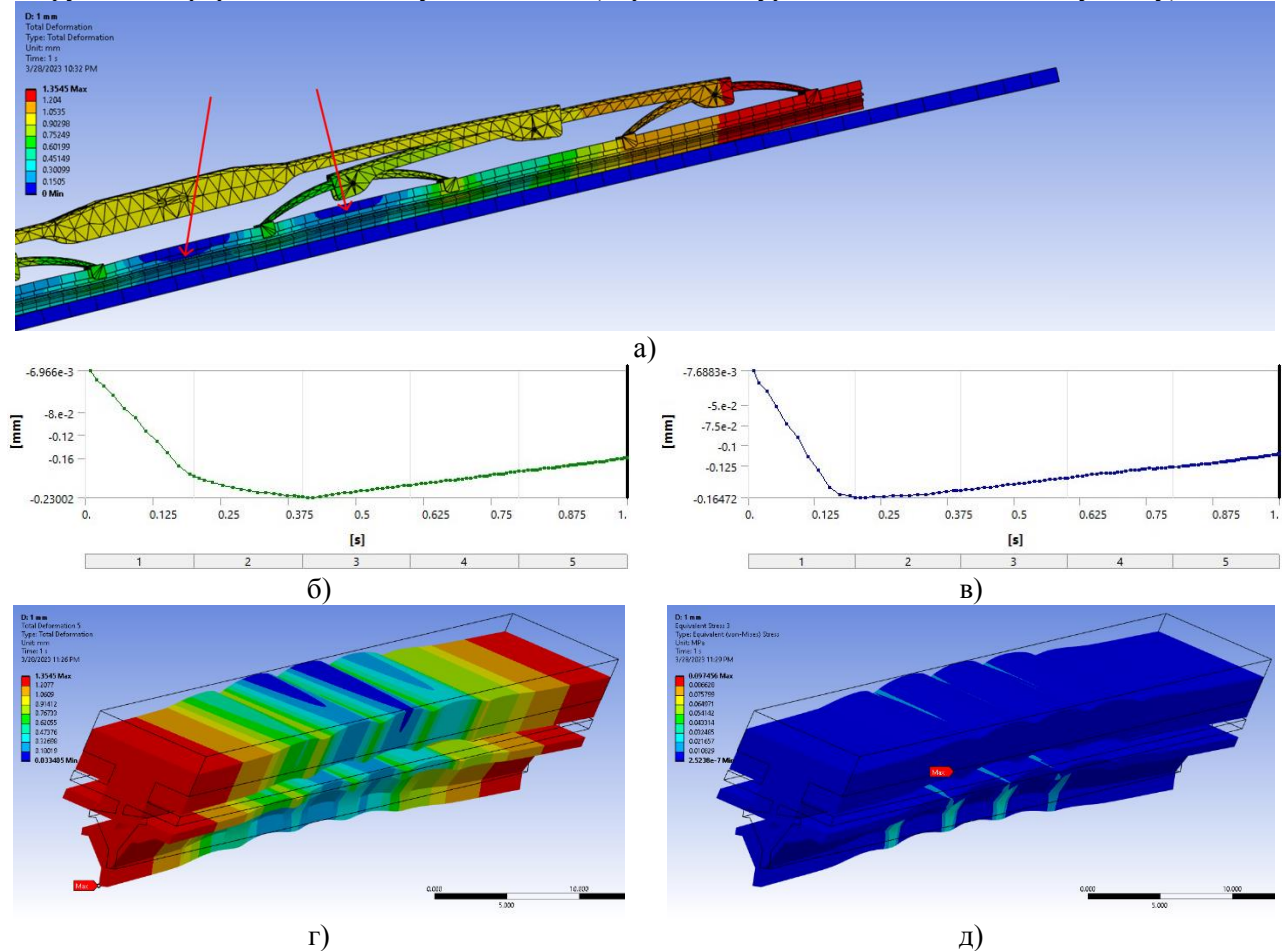


Рисунок 8 – Карта переміщень моделі склоочисника: а) модель у зборі; б,в) переміщення у характерних точках; г) zdeформований стан гумової щітки; д) карта напружень

2) Наступний пункт аналізу присвячений явищу пропускання тонких розводів на склі гумовою щіткою (рис.9а). Якщо продовжити навантаження далі, спостерігаємо пластичні деформації як раз у критичній зоні гумового леза – під одним з 8-ми затискачів коромисла (рис.9б), що й відповідає теоретичним розрахункам – на цю область приходить навантаження P_i , яке було наведено ще у рівнянні (1). Максимальне переміщення тут склало 1.823 мм, а геометрична форма на цій ділянці має «рваний» характер. Це означає неоднорідність прилягання гумового леза до скла, розміри коливань котрої є мінімальні, але достатні, щоб пропустити тонкі розводи по склу.

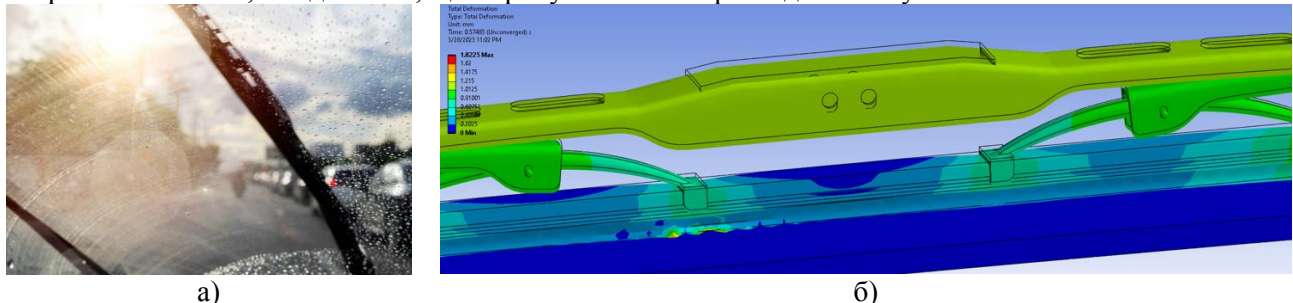


Рисунок 9 – Дослідження природи розводів на склі: а) фото скла під час дощу; б) мікродеформації гумового леза склоочисника під дією навантаження від затискача

3) Слід відзначити, що розводи можуть виникати не тільки з причини мікродеформацій гумового леза, що наведено у п.2 вище, але й в результаті явища обернено пропорційних переміщень у зонах (рис.8б,в). Для підтвердження нашого висновку доцільно проаналізувати нерівномірність

тиску від гумового леза на поверхню скла (рис.10). Фактично локації підвищеного тиску чітко відповідають розташуванню зазначених вище затискачів коромисел склоочисника.

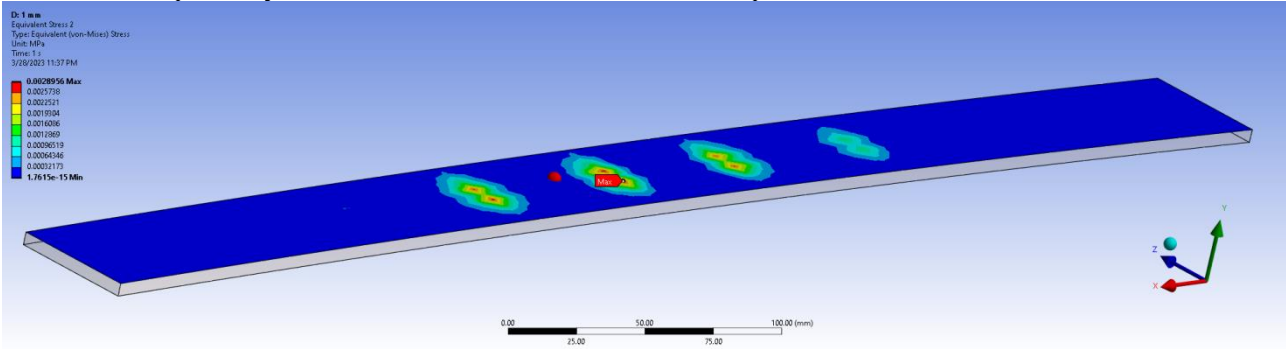


Рисунок 10 – Карта розподілу напружень по поверхні скла під дією навантаження від гумової щітки

ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

Проведений МКЕ-аналіз поведінки гумової щітки у складі конструкції склоочисника під дією зовнішнього навантаження (20 Н) дозволив отримати нелінійні результати розподілу напружень та деформацій по її довжині. В області затискачів коромисел склоочисника гумове лезо отримало пластичні деформації з максимальним значенням переміщення 1.823 мм. Геометрична форма гумового леза на цій ділянці має «рваний» характер, що означає неоднорідність прилягання леза до скла з тонкими розводами від води. По мірі знерухомилення коромисел склоочисника від старості (корозія, закислення, механічні забруднення механізму ланок) розподіл тиску по криволінійній поверхні скла стає ще більш нерівномірним, що візуально спостерігається за екстремумами напружень у чотирьох точках (рис.10). Враховуючи нормативно визначені вимоги Правил ЄЕК ООН № 43 до розмірів профілю гумової щітки разом з лезом, а також до фізико-механічних властивостей гуми, компенсувати зазначену нерівномірність тиску можна виключно рухомістю самого механізму склоочисника (шарнірів його ланок). На жаль, переважна більшість проаналізованих математичних моделей не дозволяє змодельовати фактичні процеси навантаження склоочисника, як це продемонстровано на базі МКЕ-аналізу solid-моделі. Відтак, представляється доцільним моделювання процесів навантаження склоочисника у МКЕ-середовищах, що фіксують проміжні стани моделі (наприклад, застосований Ansys Transient Structural) у відповідності до закладених у розрахунок крайових умов.

ВИСНОВКИ

Основним завданням наведених у публікації досліджень було отримання наступних результатів:

1) Актуальність застосування існуючих математичних моделей розподіленого навантаження з ланками змінної жорсткості в умовах імітації натурної поведінки склоочисника носить сумнівний характер на практиці. Модель, що базується на сумі енергії деформації згину балки (U_b), енергії деформації зсуву балки (U_s) та потенціалній енергії пружинного шару (U_p) є найбільш близькою за сукупністю факторів, які формують крайові умови розрахунку відповідно до натурних випробувань;

2) Імітація навантаження склоочисника методом кінцевих елементів (МКЕ) з врахування перехідних процесів у середовищі Ansys Transient structural дає більш реальні прикладні результати імітації фізичних випробувань склоочисника та пояснює такі явища, як пропускання розводів гумовим лезом, нерівномірність розподілу навантажень по криволінійній поверхні скла;

3) Моделювання склоочисника у критичному положенні, коли закисло/замерзли осі обертання коромисла й уся конструкція в результаті стала знерухоменою, є цікавим з практичної точки зору, адже стає зрозумілим, які процеси відбуваються при тривалій відсутності експлуатації транспортного засобу або впливу природних умов на гнучкість склоочисників. Також з'являється розуміння, чому на дорожній техніці попереднього століття склоочисники зазначеної конструкції ефективніше виконували свою функцію, адже вітрове скло було переважно плоскої форми (без кривизни).

4) Формування власних крайових умов розрахунку засобами моделювання у Ansys Transient Structural дозволяє формувати оригінальні розрахункові методики імітації різних реальних випадків поведінки склоочисників та порівнювати їх з такими математичними моделями, як Вінклера, Пастернака, Філоненко-Бородича, Хетені та інших науковців, що зробили неоціненний вклад у створення моделей, що ввійшли в основу тих же МКЕ-середовищ, які стали нормою сучасної науки.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Regulation No 43 of the Economic Commission for Europe of the United Nations (UN/ECE) — Uniform provisions concerning the approval of safety glazing materials and their installation on vehicles (OJ L 42 12.02.2014, p. 1, ELI: [http://data.europa.eu/eli/reg/2014/43\(2\)/oj](http://data.europa.eu/eli/reg/2014/43(2)/oj))
2. Grenouillat, R., Leblanc, C. "Simulation of chatter vibrations for wiper systems", SAE Papers, 02AC-21 (2002)
3. Chen, Tsai-Jung & Hong, Ying-Ji. (2020). Mathematical Formulae for the Vibration Frequencies of Rubber Wiper on Windshield. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2003.06022>
4. Le Rouzic, Julian & Le Bot, Alain & Perret-Liaudet, J. & Guibert, M. & Rusanov, Anton & Douminge, Ludovic & Bretagnol, Frederic & Mazuyer, Denis. (2013). Friction-Induced Vibration by Stribeck's Law: Application to Wiper Blade Squeal Noise. *Tribology Letters*. 49. 563-572. 10.1007/s11249-012-0100-z.
5. Salim, Mohd Azli & Md zain, M. Z. & abu bakar, abd rahim & Noordin, Aminurrashid. (2010). The Analysis of Friction Effect in Automotive Wiper System Using Input Shaping Controller. *Proceedings of the World Congress on Engineering 2010 Vol IIWCE 2010*, June 30 - July 2, 2010, London, U.K.
6. Chin, Y.-K & Kade, A. & Kowalik, J. & Graham, D.. (1991). Electronic windshield wiper system I. Modelling and validation. *Int. J. of Vehicle Design*. 12. 175 - 182. 10.1504/IJVD.1991.061678.
7. Chen, Shuming & Chen, Gang & Guo, Yongqi & Wang, Dengfeng. (2014). Recent Patents on Windshield Wiper Device. *Recent Patents on Mechanical Engineering*. 7. 10.2174/2212797607666140910010125.
8. Alazzawi, Lubna & Chakravarty, Avik. (2015). Design and implementation of a reconfigurable automatic rain sensitive windshield wiper. *International Journal of Engineering & Technology Sciences*. 8. 73-82.
9. Jallet, Sebastien & Devos, Sylvain & Maubray, Daniel & Sortais, Jean-Luc & Frédéric, Marmonier & Dreher, Thomas. (2001). Numerical Simulation of Wiper System Aerodynamic Behavior. 10.4271/2001-01-0036.
10. Kaur, Harwinder & Nirmal, Umar. (2022). A Review on the Development of Wiper System for Automotive Car Windscreen Cleaning Application. *Current Journal of Applied Science and Technology*, Volume 41, Issue 7, Page 1-27 DOI: 10.9734/cjast/2022/v41i731675
11. Zhengqi, Gu & Zhen, Chen & Peng, Tan. (2016). Research on the Aerodynamic Lift of Vehicle Windshield Wiper. *Journal of Applied Fluid Mechanics*. 9. 2133-2140. 10.18869/acadpub.jafm.68.236.25096.
12. Grenouillat, Régis & Leblanc, Christian. (2002). Simulation of Chatter Vibrations for Wiper Systems. 10.4271/2002-01-1239.
13. C.S.K.Raju K P Naveen Reddy, y Geyavalli, D Sujani. (2018). Closed form Solutions of Functionality of Windshield Wiper. *International Journal of Electronics Engineering* (ISSN:0973-7383). Volume 10. Issue 1. 290-294.
14. Sayer, James & Wetzel, Jacob & Funkhouser, Dillon. (2009). An examination of naturalistic Windshield wiper usage. *Int. J. of Heavy Vehicle Systems*. 16. 328 - 340. 10.1504/IJHVS.2009.027136.
15. Cho, Seunghyun & Lee, Jeungho & Kim, Hangoo. (2016). Strength Analysis of Aluminum Alloy Window Wiper Manufactured by Die Casting. *Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers*. 25. 204-210. 10.7735/ksmte.2016.25.3.204.
16. Zhaohua, F., Cook, R.D. (1983). Beam elements on two-parameter elastic foundations. *Journal of Engineering Mechanics* Vol. 109, Issue 6 (December 1983). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9399\(1983\)109:6\(1390\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(1983)109:6(1390))
17. Moshe Eisenberger, David Z. Yankelovsky, Exact stiffness matrix for beams on elastic foundation, *Computers & Structures*, Volume 21, Issue 6, 1985, Pages 1355-1359, ISSN 0045-7949, [https://doi.org/10.1016/0045-7949\(85\)90189-0](https://doi.org/10.1016/0045-7949(85)90189-0).
18. Ting, B.Y. and Mockry, E.F. (1984), "Beam on elastic foundation finite elements", *J. Struct. Div.-ASCE.*, 110(10), 2324-2339. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1984\)110:10\(2324\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1984)110:10(2324))

REFERENCES

1. Regulation No 43 of the Economic Commission for Europe of the United Nations (UN/ECE) — Uniform provisions concerning the approval of safety glazing materials and their installation on vehicles (OJ L 42 12.02.2014, p. 1, ELI: [http://data.europa.eu/eli/reg/2014/43\(2\)/oj](http://data.europa.eu/eli/reg/2014/43(2)/oj))

2. Grenouillat, R., Leblanc, C. "Simulation of chatter vibrations for wiper systems", SAE Papers, 02AC-21 (2002)
3. Chen, Tsai-Jung & Hong, Ying-Ji. (2020). Mathematical Formulae for the Vibration Frequencies of Rubber Wiper on Windshield. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2003.06022>
4. Le Rouzic, Julian & Le Bot, Alain & Perret-Liaudet, J. & Guibert, M. & Rusanov, Anton & Douminge, Ludovic & Bretagnol, Frederic & Mazuyer, Denis. (2013). Friction-Induced Vibration by Stribeck's Law: Application to Wiper Blade Squeal Noise. *Tribology Letters*. 49. 563-572. 10.1007/s11249-012-0100-z.
5. Salim, Mohd Azli & Md zain, M. Z. & abu bakar, abd rahim & Noordin, Aminurrashid. (2010). The Analysis of Friction Effect in Automotive Wiper System Using Input Shaping Controller. *Proceedings of the World Congress on Engineering 2010 Vol IIWCE 2010*, June 30 - July 2, 2010, London, U.K.
6. Chin, Y.-K & Kade, A. & Kowalik, J. & Graham, D.. (1991). Electronic windshield wiper system I. Modelling and validation. *Int. J. of Vehicle Design*. 12. 175 - 182. 10.1504/IJVD.1991.061678.
7. Chen, Shuming & Chen, Gang & Guo, Yongqi & Wang, Dengfeng. (2014). Recent Patents on Windshield Wiper Device. *Recent Patents on Mechanical Engineering*. 7. 10.2174/2212797607666140910010125.
8. Alazzawi, Lubna & Chakravarty, Avik. (2015). Design and implementation of a reconfigurable automatic rain sensitive windshield wiper. *International Journal of Engineering & Technology Sciences*. 8. 73-82.
9. Jallet, Sebastien & Devos, Sylvain & Maubray, Daniel & Sortais, Jean-Luc & Frédéric, Marmonier & Dreher, Thomas. (2001). Numerical Simulation of Wiper System Aerodynamic Behavior. 10.4271/2001-01-0036.
10. Kaur, Harwinder & Nirmal, Umar. (2022). A Review on the Development of Wiper System for Automotive Car Windscreen Cleaning Application. *Current Journal of Applied Science and Technology*, Volume 41, Issue 7, Page 1-27 DOI: 10.9734/cjast/2022/v41i731675
11. Zhengqi, Gu & Zhen, Chen & Peng, Tan. (2016). Research on the Aerodynamic Lift of Vehicle Windshield Wiper. *Journal of Applied Fluid Mechanics*. 9. 2133-2140. 10.18869/acadpub.jafm.68.236.25096.
12. Grenouillat, Régis & Leblanc, Christian. (2002). Simulation of Chatter Vibrations for Wiper Systems. 10.4271/2002-01-1239.
13. C.S.K.Raju K P Naveen Reddy, y Geyavalli, D Sujani. (2018). Closed form Solutions of Functionality of Windshield Wiper. *International Journal of Electronics Engineering* (ISSN:0973-7383). Volume 10. Issue 1. 290-294.
14. Sayer, James & Wetzel, Jacob & Funkhouser, Dillon. (2009). An examination of naturalistic Windshield wiper usage. *Int. J. of Heavy Vehicle Systems*. 16. 328 - 340. 10.1504/IJHVS.2009.027136.
15. Cho, Seunghyun & Lee, Jeungho & Kim, Hangoo. (2016). Strength Analysis of Aluminum Alloy Window Wiper Manufactured by Die Casting. *Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers*. 25. 204-210. 10.7735/ksmte.2016.25.3.204.
16. Zhaohua, F., Cook, R.D. (1983). Beam elements on two-parameter elastic foundations. *Journal of Engineering Mechanics* Vol. 109, Issue 6 (December 1983). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9399\(1983\)109:6\(1390\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(1983)109:6(1390))
17. Moshe Eisenberger, David Z. Yankelovsky, Exact stiffness matrix for beams on elastic foundation, *Computers & Structures*, Volume 21, Issue 6, 1985, Pages 1355-1359, ISSN 0045-7949, [https://doi.org/10.1016/0045-7949\(85\)90189-0](https://doi.org/10.1016/0045-7949(85)90189-0).
18. Ting, B.Y. and Mockry, E.F. (1984), "Beam on elastic foundation finite elements", *J. Struct. Div.-ASCE.*, 110(10), 2324-2339. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1984\)110:10\(2324\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1984)110:10(2324))

K. Holenko, Yu. Voichyshyn, V. Svidersky, O. Klypko. Simulation of wiper behavior during contact with a curved surface, factors affecting driving safety

As you know, a windshield wiper is a device used to remove raindrops (moisture) and dirt from the windshield of a vehicle. All vehicles (including trains, planes, and ships) are equipped with windshield wipers that meet regulatory requirements. One of the key parameters for assessing the quality of glass surface cleaning is mechanical pressure - its magnitude and distribution over the surface. In this article, experiments are conducted to demonstrate the inhomogeneity of this parameter when the windshield wiper is in contact with a curved glass surface. The specified heterogeneity is enhanced by the flexibility of the wiper mechanism links and the internal deformations of its rubber blade. The amount of pressure depends on such

factors as: pressing force of the windshield wiper; the configuration of the rubber blade (the area of the contact surface, which is determined by the profile of the rubber blade), the material of manufacture (elasticity) of the blade; construction of the windshield wiper frame itself, etc. As part of this work, the behavior of the windshield wiper together with the rubber blade during contact with the curved surface of the glass under conditions of variable load will be simulated using the finite element method (FEM). For a theoretical understanding of deformation processes, the authors will additionally consider various mathematical models aimed at simulating the natural behavior of the windshield wiper in real operating conditions. In the process of researching these mathematical models, a comparison of their approaches will be made to take into account real physical processes of loading and elastic deformations of the windshield wiper components, including shear stress energy of layers, etc. On the basis of the obtained results, conclusions will be drawn regarding the comparability of mathematical models with FEM models. Besides the practical effectiveness of applying both approaches to the analysis of windshield wipers behavior will be determined.

Key words: windshield wipers, windshield, distributed pressure, specific load, stress, plastic deformations, elasticity, mathematical models, Ansys Transient Structural.

ГОЛЕНКО Костянтин Едуардович, кандидат технічних наук, викладач кафедри трибології, автомобілів та матеріалознавства, Хмельницького національного університету, e-mail: kgolenko@gmail.com. ORCID: 0000-0002-6140-4573.

ВОЙЧИШИН Юрій Іванович, аспірант, кафедри автомобілебудування, Національний університет «Львівська політехніка», e-mail: Jurko-Q@ukr.net, ORCID 0000-0001-7004-0567.

СВІДЕРСЬКИЙ Владислав Петрович, кандидат технічних наук, доцент кафедри трибології, автомобілів та матеріалознавства, Хмельницького національного університету, e-mail: sviderskyvladyslav@gmail.com. ORCID: 0000-0003-4816-6977

КЛИПКО Олег Романович, кандидат технічних наук, викладач ВСП «Автомобільно – дорожній фаховий коледж Національного університету «Львівська політехніка», e-mail: 0675932041k@gmail.com. ORCID 0009-0006-4219-9347

HOLENKO Kostyantyn, PhD, Department of Tribology, Automobiles and Materials Science. Khmelnytskyi National University, e-mail: kgolenko@gmail.com. ORCID: 0000-0002-6140-4573.

SVIDERSKY Vladyslav, PhD, Associate Professor, Department of Tribology, Automobiles and Materials Science, Khmelnytskyi National University, sviderskyvladyslav@gmail.com, ORCID: 0000-0003-4816-6977

VOICHYSHYN Yurii, postgraduate, Department of Automotive Engineering, Lviv Polytechnic National University e-mail: Jurko-Q@ukr.net, ORCID 0000-0001-7004-0567

KLYPKO Oleh, PhD, Department of ASSU «Avtomobil'no – dorozhniy fakhovyy koledzh Natsional'noho universytetu «L'vivs'ka politekhnika» e-mail: 0675932041k@gmail.com. ORCID 0009-0006-4219-9347

DOI 10.36910/automash.v1i20.1041