



ПЛ-НТУ Транскордонний
обмін досвідом. Том 2

PL-NTU Transgraniczna
wymiana doświadczeń. Tom 2

редакція

Вальдемар Вуйцік

Зоряна Герасимчук

redakcja

Waldemar Wójcik

Zoriana Herasymchuk



PL-BY-UA
2007-2013



ПЛ-НТУ Транскордонний обмін
досвідом. Том 2

PL-NTU Transgraniczna wymiana
doświadczeń. Tom 2

Monografie – Politechnika Lubelska



PL-BY-UA
2007-2013



Projekt *IPBU.03.01.00-06-386/11-00 PL-NTU Transgraniczna wymiana doświadczeń* jest współfinansowany w ramach Programu Współpracy Transgranicznej Polska-Białoruś-Ukraina 2007-2013 finansowanego ze środków Unii Europejskiej w ramach Europejskiego Instrumentu Sąsiedztwa i Partnerstwa



Lider projektu:

Politechnika Lubelska
ul. Nadbystrzycka 44A, pok. 1001
20-501 Lublin, Poland
tel. +48 81 538 4112, +48 81 538 4579;
fax +48 81 538 4220
e-mail: PL-LNTU@pollub.pl



Partner projektu:

Львівський національний технічний
університет
75 Лівівська, ст., офіс 12
Львів 43018, Україна
тел. +380 332 746 118;
факс +380 332 746 103
e-mail: plntu.cbc@gmail.com

ПЛ-НТУ Транскордонний обмін
досвідом. Том 2

PL-NTU Transgraniczna wymiana
doświadczeń. Tom 2

редакція
Вальдемар Вуйцік
Зоряна Герасимчук

redakcja
Waldemar Wójcik
Zoriana Herasymchuk



Politechnika Lubelska
Lublin 2015

Рецензенти:

д.т.н. інж., проф. Андрій Котира
д.т.н. інж., проф. Андрій Смолаж
к.т.н. інж. Конрад Громашек

Recenzenci:

dr hab. inż. Andrzej Kotyra, prof. PL
dr hab. inż. Andrzej Smolarz, prof. PL
dr inż. Konrad Gromaszek

Склад і корекція: проектний офіс ПЛ-НТУ Транскордонний обмін досвідом

Skład i korekta: biuro projektu PL-NTU Transgraniczna wymiana doświadczeń

Publikacja wydana za zgodą Rektora Politechniki Lubelskiej

© Copyright by Politechnika Lubelska 2015

ISBN: 978-83-7947-161-4

Wydawca: Politechnika Lubelska

ul. Nadbystrzycka 38D, 20-618 Lublin

Realizacja: Biblioteka Politechniki Lubelskiej

Ośrodek ds. Wydawnictw i Biblioteki Cyfrowej

ul. Nadbystrzycka 36A, 20-618 Lublin

tel. (81) 538-46-59, email: wydawca@pollub.pl

www.biblioteka.pollub.pl

Druk: TOP Agencja Reklamowa Agnieszka Łuczak

www.agencjatorp.pl

Elektroniczna wersja książki dostępna w Bibliotece Cyfrowej PL www.bc.pollub.pl

Publikacja bezpłatna. Nakład: 50 egz. Ark. wyd. 6, 18



Робота створена в рамках проекту PL-NTU Прикордонного обміну досвідом PBU.03.01.00-06-386/11-00, фінансованих в рамках Програми Транскордонного Співробітництва Польща-Білорусь-Україна 2007–2013 фінансується Європейським Союзом в рамках Європейського Інструменту Сусідства та Партнерства.

Ця публікація була створена за допомогою Європейського Союзу. Відповідальність за зміст цієї публікації лежить на авторах, і жодним чином не може розглядатися як відображення поглядів Європейського Союзу.

Praca powstała w ramach projektu PL-NTU Transgraniczna wymiana doświadczeń PBU.03.01.00-06-386/11-00 współfinansowanego w ramach Programu Współpracy Transgranicznej Polska-Białoruś-Ukraina 2007–2013 finansowanego ze środków Unii Europejskiej w ramach Europejskiego Instrumentu Sąsiedztwa i Partnerstwa.

Niniejsza publikacja została stworzona przy pomocy Unii Europejskiej. Wyłącznie odpowiedzialność za zawartość niniejszej publikacji ponoszą autorzy oraz w żaden sposób nie może być ona postrzegana jako odzwierciedlenie poglądów Unii Europejskiej.



Зміст || Spis treści

ПЛ-НТУ Транскордонний обмін досвідом (українською мовою)	9
Використання елемента фрактальності при моделюванні дизайну середовища (Сергій Хомик)	11
Дослідження армоцементних оболонок (Сергій Ужегов).....	21
Розрахунок однопорожнинного гіперболойда методом скінченних різниць (Тарас Горбатюк)	33
До розрахунку основних характеристик стержневих систем (Ілля Козачук).....	43
Акустико–емісійна оцінка зміни в'язкості руйнування ресорних сталей за час експлуатування автомобіля (Олександр С. Дубицький).....	53
PL-NTU Transgraniczna wymiana doświadczeń (w języku polskim)	63
Wykorzystanie fraktali do projektowania otoczenia (Siergiej Homyk)	65
Badanie pokryć żelbetowych (Siergiej Uzhegov).....	75
Obliczanie hiperboloidy jednowłokowej za pomocą metody różnic skończonych (Taras Gorbatyuk)	85
Obliczenia głównych parametrów systemu prętów (Illia Kozachuk).....	95
Akustyczna i emisyjna ocena zmiany wiązkości uszkodzenia stali resorowej podczas eksploatacji pojazdu (Oleksander Dubyckij)	105

**ПЛ-НТУ ТРАНСКОРДОННИЙ ОБМІН
ДОСВІДОМ
(українською мовою)**

ВИКОРИСТАННЯ ЕЛЕМЕНТА ФРАКТАЛЬНОСТІ ПРИ МОДЕЛЮВАННІ ДИЗАЙНУ СЕРЕДОВИЩА

Сергій Хомик

Луцький національний технічний університет
Кафедра дизайну

Анотація. У статті розглянуто використання самоподібності як елемента фрактальності при комп'ютерному моделюванні дизайну середовища. Наведені приклади практичного застосування фракталів в різних видах дизайну, у тому числі – й архітектурному.

Ключові слова: фрактали, самоподібність, фрактальна графіка

1. Вступ

У XXI столітті – добі глобалізації і столітті існування складного багатопланового простору гостро постає питання виявлення напряму розвитку дизайну та проектування загалом. Внутрішня логіка і внутрішні сенси формування простору життя зумовлюють необхідність використання фрактальної геометрії, яка дає розуміння сутності розвитку дизайну як єдиного організму і дозволяє виділити його неповторні індивідуальні риси, розвиваючи і по-новому інтерпретуючи їх. Для того, щоб досягнути закономірності сучасної архітектури і тенденції її інтеграції з дизайном інтер'єру необхідно використовувати не просто фрактальний принцип, а й, власне, фрактальні структури в процесі дизайн-проекування.

2. Виклад основного матеріалу

Метою роботи є проведення аналізу по виявленню використання самоподібності як елемента фрактальності в моделюванні дизайн середовища засобами комп'ютерної графіки.

2.1. Поняття фрактала та історія його виникнення

Після появи наукової роботи Мандельброта Б. по фрактальній геометрії природи відбувся спалах наукових праць по взаємозв'язку фрактальності з наукою і мистецтвом, з яких найбільш близькою до рішення задач технічної естетики з'явилася робота І. Евіна.

Питання використання фрактальності при рішенні містобудівних задач і моделюванні архітектурних комплексів актуалізувалося в кінці XX століття. Спроби аналізу фрактальності об'єктів мистецтва, архітектури і дизайну зазвичай зводяться до аналізу або архітектури, або мистецтва. Ставиться питання про комп'ютерний графічний дизайн, але практично

не розкривається. Дизайн же інтер'єру, як самий синтезований і такий, що має складний просторовий вираз в порівнянні з графічним дизайном, залишається невивченим в контексті фрактальності взагалі.

Грунтовне вивчення та практичне використання фракталів є досить цікавим напрямком серед інструментальних засобів моделювання гармонійного дизайн середовища. Для вирішення проектних завдань використовується комп'ютерна графіка, яка включає методи і засоби створення й обробки зображень за допомогою програмно-апаратних комплексів. В залежності від способу опису та формування зображення розрізняють растрову, векторну та фрактальну графіку. Серед зображень, що створюються засобами комп'ютерної графіки, фрактали посідають особливе місце завдяки своєрідній красі та специфічній будові.

Виявлення композиційних особливостей природних фракталів, аналіз математичних закономірностей фракталоутворення, встановлення відповідностей між композиційними властивостями та математичними залежностями допоможуть у вирішенні задач моделювання.

Безліч процесів, що відбуваються в природі і суспільстві, – від космічних до соціальних і фізіологічних, – характеризуються хаотичною фрактальною динамікою. Фрактальність природних об'єктів підтверджується можливістю побудови вельми правдоподібних комп'ютерних ландшафтів віртуального світу на основі простих фрактальних програм.

Фрактальна графіка, як і векторна, ґрунтується на математичних обчисленнях. Базовим елементом фрактальної графіки є формула, завдяки чому можна побудувати як найпростіші регулярні структури, так і складні ілюстрації, що імітують природні ландшафти та тривимірні об'єкти.

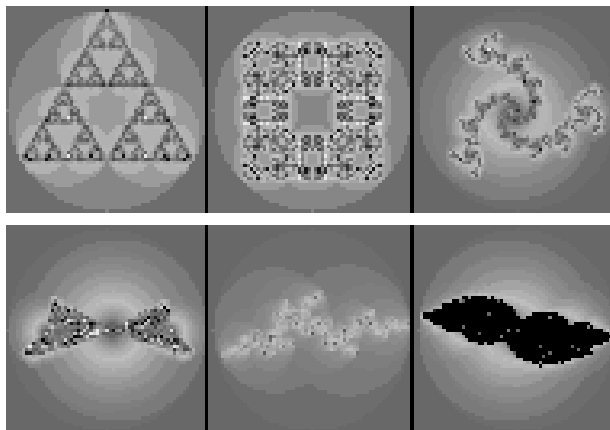


Рис. 1. Приклади самоподібних множин

В математиці точного визначення фрактала немає, але поняття «фрактал», трактується як множина частини якої подібні самій множині. Суворе визначення самоподібних множин було дано Дж. Хатчінсоном

в його класичній роботі 1981. Множину, Дж. Хатчінсон назвав самоподібною (рис. 1), якщо вона складається з кількох компонент, подібних F (тобто компонент які отримуються поворотом, стиском і відображенням множини F). Варто відразу відмітити, що визначення Хатчінсона трохи складніше, але сучасні математики все частіше користуються саме цим.

2.2. Виявлення використання фрактальної самоподібності в оформленні українського інтер'єру

Розпис стін українського народного житла, внутрішньо убрання інтер'єру предметами українського декоративно-прикладного мистецтва, а саме вишивкою і керамікою, використовують фрактальні самоподібні елементи. Розписи меблів, наприклад скринь, використовують зображення хмар і листя дерев, що є самоподібними фракталами.

Елементи історичного коріння використання фрактальної самоподібності в оформленні інтер'єру представлені на рис. 2, а саме в інтер'єрах Софії Київської і стін під'їзду на вул. Міроносицької в Києві, виконаних відомими українськими художниками почала ХХ ст.

Інтер'єри Софії Київської



Самокиш Микола, Васильківський Сергій, Під'їзд на вул. Міроносицької в м. Києві, 1911

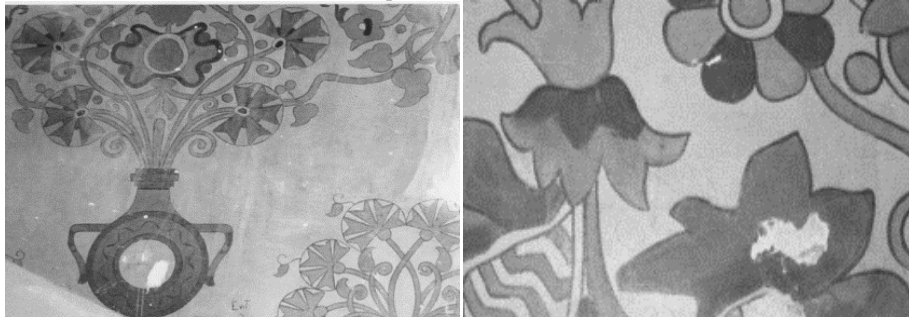


Рис. 2. Історичне використання самоподібності як елементу фрактальності на прикладах оформлення українських інтер'єрів

До сучасних українських інтер'єрів віднесемо статистику останніх двадцяти років – років існування незалежної держави. Наприклад, представлена робота Легаря також показує і на самоподібні елементи водорослей в підводному світі (драпіровки в дизайні інтер'єру), і на самоподібні елементими в рослинному світі, зокрема при цвітінні, що відображене в кованих елементах містка і світильника в створеному ним проекті ресторану.

Навіть у роботах, виконаних в стилі мінімалізм, можуть зустрічатися елементи самоподібності, як, наприклад, видно в стилізаціях С. Олексєенко і М. Маломуж на панно над ліжком (рис. 3) і декоративній ширмі (рис. 4).



Рис. 3. Степан Олексєенко, Марина Маломуж, Квартира, 2008 – панно над ліжком



Рис. 4. Використання самоподібності як елемента фрактальності в оформленні сучасних українських інтер'єрів – декоративна ширма

Самоподібність як елемент фрактальності історично використовувалася при проектуванні українського народного житла і в історичних українських інтер'єрах, виконаних в стилях бароко і модерну. Самоподібність найяскравіше представлено в сучасному дизайні інтер'єру в роботах українських постімпрессионістів.

2.3. Шляхи утворення фракталів

Одним із ефективних засобів для опису фрактальних структур є рекурсивна функція, що має своїм аргументом саму себе:

$$f(x), f(f(x)), f(f(f(x))), \dots \quad (1)$$

Фрактали описуються алгоритмами, які за допомогою комп'ютера перетворюються в геометричні зображення.

Фрактал утворюється шляхом повторення вихідної ланки за визначеним алгоритмом, тобто невелика частина фрактала містить інформацію про весь фрактал. Найпростішим прикладом процесу утворення фрактала є тріадна крива Коха, зображена на рис. 5, що відноситься до класу геометричних фракталів.

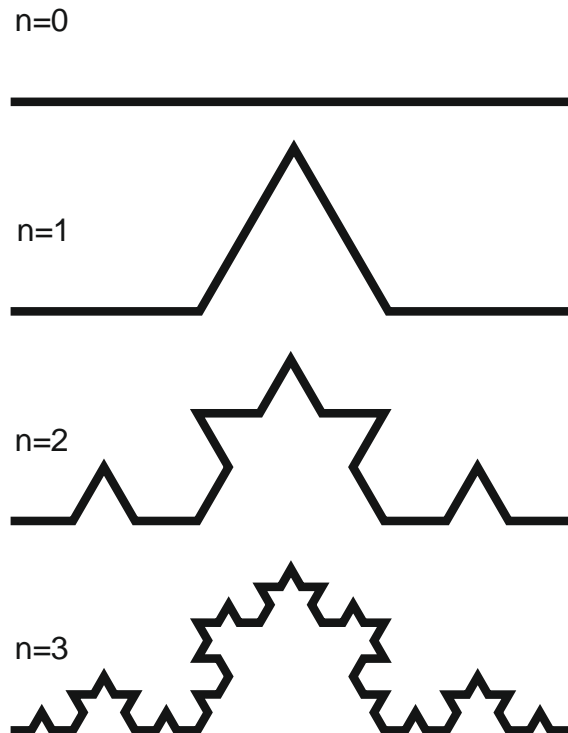


Рис. 5. Побудова тріадної кривої Коха

За один крок алгоритму кожен з відрізків, які складають ламану, замінюється на ламану-генератор відповідного розміру. В результаті нескінченного повторення даної процедури утворюється геометричний фрактал.

Ще одним із способів генерації фракталів є побудова за допомогою L-систем (Lindenmayer).

L-система – це граматики деякої мови (досить простої), яка описує ініціатор і перетворення, що над ним виконується. Таким чином, використовуючи різні команди, такі як поворот на заданий кут, заміну, переміщення на задану довжину, можливо створювати різні зображення. Набір команд L-системи можна розширювати до нескінченності, отримуючи при цьому вражаючі результати.

Правила працюють таким чином: кожен символ ініціатора читається і замінюється на слово, вказане в правилі заміни (якщо воно визначене). Таким чином ми отримуємо новий рядок символів, з яким виконуємо ту ж саму процедуру. Крок за кроком, рекурсивно виникає все довший і довший рядок, тому кількість кроків зазвичай обмежують.

Розглянемо роботу L-системи на прикладі.

Введемо наступні означення:

- "f" – малювання відрізка заданої довжини,
- "+" – поворот на додатній кут,
- "-" – поворот на від'ємний кут,
- "[" – помістити об'єкт в стек,
- "]" – дістати об'єкт зі стека.

Розглянемо виконання наступної системи:

- ініціатор: F,
 - кут повороту: $\pi/8$,
 - правило перетворення: $-F+F+[+F-F]-[-F+F+F]$.
- Вигляд системи через декілька ітерацій (рис. 6).

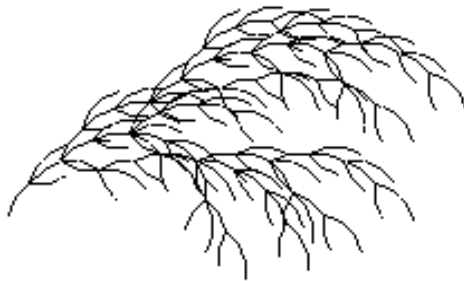


Рис. 6. Приклад L-системи

2.4. Практичне застосування фракталів

Однією з перспективних галузей використання фракталів у якості зображень є виробництво тканин, шпалер, текстури для візуалізації розробки інтер'єрів, шрифтів, каркасів сайтів та іншої продукції з періодично повторюваним візерунком. В час стрімкого розвитку технологій та виробничих процесів головним завданням при виробництві даного виду продукції є вдосконалення методів створення зображень та підвищення їх якості. Використовуючи твори природи, можна зробити більш ефективною працю дизайнерів та художників, отримавши нескінченну кількість варіантів візерунків

На сьогоднішній день при виробництві текстилю візерунки наносять «просторуч»: для цього використовується прозора плівка, на якій анімаційною тушшю виконується малюнок. Далі спеціальну шовкову тканину обробляють полімером, накладають плівку з візерунком і просвічують ультрафіолетовим промінням. Таким чином, створюється форма, через яку буде наноситись фарба на тканину. Цей процес спрощується, якщо візерунок створено за допомогою комп'ютера (рис. 7).



Рис. 7. Приклади візерунків для тканин або шпалер

Не потрібно вигадувати нові види малюнків – фрактали створюють їх самі, залишається лише відредагувати їх. Далі здійснюється фотовивід зображень, що змодельовані (з точністю до 0,01 мм) окремо для червоного, зеленого та блакитного кольорів (так звана палітра RGB). Далі відповідно створюються форми, через які надалі наноситься малюнок.

Перевага запропонованого методу в порівнянні з традиційними полягає у зниженні витрат людських та машинних ресурсів та підвищенні якості

розфарбовування текстилю. Метод є перспективним як для підвищення продуктивності виробництва, так і для його подальшого науково-практичного удосконалення.

Окрім досліджень фракталів в дизайні та живопису, їх використовують також в теорії інформації для компресії графічних даних (в основному використовується властивість самоподібності фракталів – для того, щоб запам'ятати невелику ділянку малюнка і перетворення, за допомогою яких можна отримати інші частини, потрібно помітно менше пам'яті, ніж для зберігання всього файла).

Якщо у формули, що генерують фрактал, додати випадкові відхилення, можна отримати стохастичні фрактали, які досить правдоподібно передають деякі реальні об'єкти – елементи рельєфу, поверхні водоймищ, паростки певних рослин. Ці властивості з успіхом використовуються у фізиці, географії і комп'ютерній графіці для досягнення більшої подібності предметів моделювання до їх реальних прообразів.

Існують системи адресування в комп'ютерних мережах, які використовують принцип фрактальної компресії інформації для побудови децентралізованих, а отже і максимально надійних мереж.

3. Перспективи подальших досліджень

Фрактали – це геометрія природи, тому їх також можна ефективно застосовувати в архітектурі.

Відомо, що різноманітні форми по-різному впливають на свідомість та підсвідомість людини, змінюючи її настрій та самопочуття. Дослідивши, яку саме енергетику несе та чи інша форма, її вплив на організми, можна створювати архітектуру нового покоління, яка б позитивно впливала не лише на людей, а й на оточуюче середовище.

Наприклад, використавши як основу, відомий фрактал Mandelbrot з певним циклом ітерацій (рис. 8а) і опрацювавши його засобами комп'ютерної графіки, можна отримати об'єкти, які в подальшому будуть макетами для архітектурних споруд із фрактальним розміщенням внутрішніх приміщень (рис. 8б). Методом обертання даного фрактала навколо певної осі отримуємо експозиційний центр з внутрішньою панорамою, яка дає змогу розглянути всю виставку одночасно.

Будівлі, створені за такими проектами, є гармонійними, а, відповідно, і люди, які будуть перебувати всередині даних споруд, відчуватимуть позитивний енергетичний вплив. Проте дані твердження ще вимагають ґрунтовного вивчення.

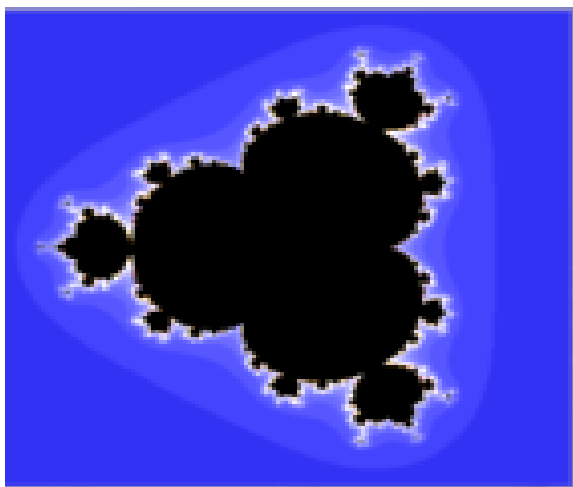


Рис. 8а. Фрактал Мандельброта

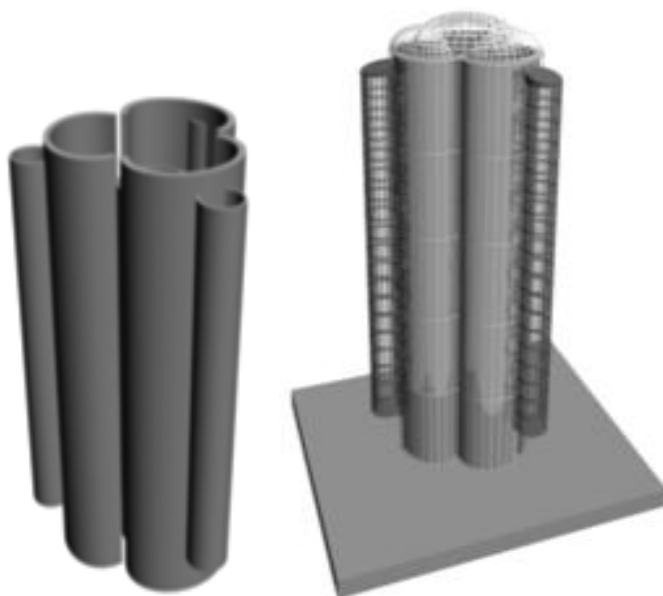


Рис. 8б. Макети для архітектурних споруд із фрактальним розміщенням внутрішніх приміщень

Проведені дослідження дали змогу зробити такі висновки:

- природні об'єкти є переважно фрактальними,
- основи фрактального змісту в дизайні було закладено ще доісторичними архітекторами,
- фрактальна графіка – вид мистецтва, подібний до абстрактного мистецтва,

- принципи фракталоподібного формоутворення в архітектурі застосовуються з давніх часів, але тільки з кінця ХХ ст. використання фрактальних алгоритмів в архітектурному морфогенезі стає усвідомленим.

З допомогою фракталів можна описати нестабільні системи і процеси простіше ніж з допомогою засобів традиційної математики чи фізики, і що найголовніше, передбачити поведінку таких об'єктів.

Природа сама дає відповіді на всі запитання, які важко розв'язати або пояснити. Можливо, фрактальна геометрія – це „окуляри”, через які людина зможе побачити сутність природи.

Література

- [1] Вісник Харківської державної академії дизайну і мистецтв, Харків, № 7, 2011, 26–32.
- [2] Дякив В. А., Матковский О. И., Онтогенические закономерности изменения фрактальной размерности холестериновых дендритов в желчных камнях, Закономерности эволюции земной коры: Тез. докл. междунар. конф. Т. 2, Санкт-Петербург, 1996.
- [3] Евин И. А., Синергетика мозга и синергетика искусства, Москва, ГЕОС, 2001.
- [4] Мандельброт Б., Фрактальная геометрия природы, Москва, Ин-т компьютерных исслед., 2002.
- [5] Фоменко О., Чечельницкий С., Методы фрактальной геометрии в применении к исследованию гармонии в архитектуре. Традиції та новації у вищій архітектурно-художній освіті. Зб. наук. праць., Харків, Вип. 1, 2, 3, 2008, 257–260.

магістр Сергій Хомик
e-mail: Homas@ukr.net

Асистент кафедри дизайну, Луцького НТУ. Працює над дисертаційним дослідженням «Фрактальна геометрія застосування її в архітектурі та дизайні».



USING ELEMENT OF FRACTALITY AT MODELING DESIGN ENVIRONMENT

Abstract. *The article examines the use of self similarity as element fractal in computer modeling of design environment. Examples of practical application of fractals in different types design, including – and architecturally.*

Keywords: *fractals, self-similarity, fractal graphics*

ДОСЛІДЖЕННЯ АРМОЦЕМЕНТНИХ ОБОЛОНОК

Сергій Ужегов

Луцький національний технічний університет
Кафедра промислового та цивільного будівництва

Анотація. У статті наведено розрахунок армоцементного покриття у формі гіперболічного параболоїда, прямокутного в плані, моделювання його конструкції для проведення експериментального дослідження.

Ключові слова: армоцемент, оболонка, гіпар, модель

1. Вступ

Армоцементні конструкції застосовують в елементах будівель та споруд, для яких важливим є зниження власної ваги, зменшення розкриття тріщин, забезпечення водонепроникності бетону. Особливістю армоцементних конструкцій є дисперсне армування, їх тонкостінність, зменшення захисного шару бетону. Вони характеризуються сітковим армуванням тонкими тканими, плетеними або зварними сітками, а досить часто і комбінованим армуванням сітками разом зі стержневою або дротовою арматурою.

2. Виклад основного матеріалу

Армоцемент, як матеріал, має ряд переваг перед залізобетоном: більша міцність на розтяг, вища тріщиностійкість, підвищений опір дії динамічних навантажень; армоцементними просторовими конструкціями можна перекривати значні прольоти без проміжних опор.

2.1. Історія виникнення армоцементних конструкцій

Започаткував армоцементні конструкції італійський інженер-архітектор П. Л. Нерві ще у 1943 році, а першими спорудами стали пакгауз у Римі (1946), стіни та покриття якого виконані з хвилеподібних елементів завтовшки 30 мм; павільйон Міланського ярмарку (1953) з покриттям у вигляді хвилеподібних армоцементних елементів; виставковий павільйон прольотом 95 м у Туріні з хвилястим склепінням; палац спорту у Римі зі сферичним куполом діаметром 59,2 м та інші об'єкти. Нині у будівельній практиці налічується понад 70 типорозмірів різних армоцементних покриттів: балкових, циліндричних та конічних оболонок, аркових, хвилястих, складчастих, склепінчастих тощо, одношарових та багатшарових,

комбінованих, суцільних або зібраних з окремих елементів, попередньо напружених або зі звичайним армуванням.

Подальші експериментальні дослідження та проектні розробки підтверджують, що армоцементні конструкції раціонально використовувати для покриттів будівель різноманітного призначення, довільної форми в плані з малими та великими прольотами і навіть при сейсмічних навантаженнях. Одним з найоптимальніших варіантів поверхонь з армоцементу є оболонка у формі гіперболічного параболоїда. Це дає можливість перекривати значні прольоти будівель і споруд – до 70 м і більше, а покриття влаштовувати з однієї пелюстки або компоувати їх спряженням з декількох пелюсток у різноманітних поєднаннях. Конструктивні рішення таких покриттів повинні забезпечувати несучу здатність, стійкість та геометричну незмінність споруди за будь-яких умов, навіть при ймовірних локальних пошкодженнях, попереджати лавиноподібний обвал системи внаслідок можливого руйнування другорядних елементів конструкції, вузлів, деталей, в'язей. Стійкість будівлі щодо лавиноподібного обвалу забезпечують застосуванням відповідних конструктивних заходів та матеріалів, які можуть сприяти розвитку в конструктивних елементах та їх з'єднаннях пластичних деформацій.

2.2. Оболонка у формі гіпара

Гіперболічний параболоїд (гіпар) характеризується лінійністю форми – його поверхня створена системою прямих ліній (рис. 1), а саме, переносом прямої (твірної) по перехресних прямих (направляючих). Це суттєво спрощує виготовлення опалубки, армування та оздоблення поверхні, виготовлення елементів покриття у вигляді збірних плит. При переміщенні твірна залишається паралельною до однієї з вертикальних координатних площин. Направляючими можуть бути прямі, які проходять через дві довільні протилежні сторони плану. Початкове положення твірної може співпадати з однією з двох інших сторін. Якщо поверхню гіперболічного параболоїда умовно перетнути вертикальними площинами, не паралельними до координатних, то в перерізі отримаємо параболи: одні – з випуклістю доверху, інші – з випуклістю вниз.

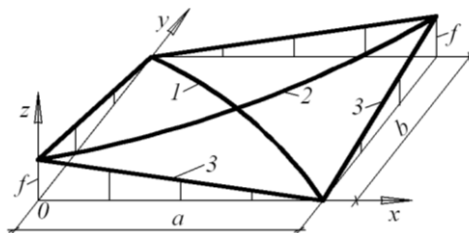


Рис. 1. Поверхня гіперболічного параболоїда: 1 – головний напрямок додатної кривини, 2 – головний напрямок від'ємної кривини, 3 – твірна

Рівняння поверхні довільного гіперболічного параболоїда описується формулою:

$$z = f_1 \left(\frac{x}{a} \right)^2 - f_2 \left(\frac{y}{b} \right)^2. \quad (1)$$

Для однопелюсткового гіпара рівняння серединної поверхні запишеться так:

$$z = C_0xy + C_1x + C_2y + C_3. \quad (2)$$

Для часткового випадку, зображеного на рис. 1 однопелюсткового гіпара, значення констант C_0 , C_1 , C_2 і C_3 можна визначити за відомими аплікатами чотирьох кутів оболонки:

1. при $x = 0$; $y = 0$; $z = f$ умова (2) запишеться так:

$$f = C_0 \times 0 \times 0 + C_1 \times 0 + C_2 \times 0 + C_3, \text{ звідки } C_3 = f;$$

2. при $x = a$; $y = 0$; $z = 0$ і вже відомому $C_3 = f$ умова (2) запишеться так:

$$0 = C_0 \times a \times 0 + C_1 \times a + C_2 \times 0 + f, \text{ звідки } C_1 = -f/a;$$

3. при $x = 0$; $y = b$; $z = 0$ і вже відомому $C_3 = f$ умова (2) запишеться так:

$$0 = C_0 \times 0 \times b + C_1 \times 0 + C_2 \times b + f, \text{ звідки } C_2 = -f/b;$$

4. при $x = a$; $y = b$; $z = f$ і вже відомих $C_1 = -f/a$; $C_2 = -f/b$ та $C_3 = f$ умова (2) запишеться так:

$$f = C_0 \times a \times b + (-f/a) \times a + (-f/b) \times b + f,$$

звідки $C_0 = 2f/ab$.

Тепер можна записати рівняння (2) з визначеними константами:

$$z = \frac{2f}{ab}xy - \frac{f}{a}x - \frac{f}{b}y + f \text{ або } z = f \left(\frac{2xy}{ab} - \frac{x}{a} - \frac{y}{b} + 1 \right). \quad (3)$$

Наведена конструкція гіперболічного параболоїда є розпірною. Розпір доцільно сприймати стягелем, встановленим у двох протилежних нижніх вузлах. Жорсткий стягель дасть змогу закріпити ці точки від горизонтальних переміщень.

Несучу здатність гіпара визначають за умов дії рівномірно розподіленого навантаження за теорією граничної рівноваги.

Проведені чисельні дослідження показали, що покриття у вигляді гіперболічних параболоїдів мають достатню жорсткість та стійкість, а конструкції у вигляді спряжених систем надають будівлям відмінну архітектурну виразність – різними сполученнями оболонок можна створювати різноманітні форми покриттів будівель з довільною сіткою колон.

2.3. Матеріали для армоцементної оболонки

Для виготовлення армоцементних конструкцій застосовують конструкційний дрібнозернистий бетон груп А та Б, класу не нижче С16/20, середньою густиною не нижче 2200 кг/м³, крупність зерен до 5 мм за ГОСТ 25192-82. Армують конструкції сталевими дротяними плетеними

(ГОСТ 2715-80), зварними (ТУ 14-4-713-76) або тканими (ГОСТ 3826-82) сітками. Ткані сітки дорожчі від зварних, мають нестабільні механічні властивості (коефіцієнт нерівномірності роботи тканих сіток коливається в межах 0,85 – 0,90), характеризуються спрямленням дроту у розтягнутих ділянках конструкції, внаслідок чого там швидше з'являються тріщини, тому частіше перевагу віддають саме зварним сіткам, котрі деформуються разом з бетоном. Зварювання дротин у вузлах перетину збільшує жорсткість сітки, збільшує сили зчеплення сіток з бетоном, їх анкерування. Зварні сітки більш технологічні, їх простіше фіксувати у перерізі конструкції, легше забезпечити товщину захисного шару, легше розрізати – дротики при цьому не розсипаються, як у випадку тканих сіток. Тріщиностійкість перерізів армоцементних конструкцій, армованих зварними сітками, значно вища. Для виготовлення таких сіток використовують дріт діаметром 0,7 ... 1,0 мм з кроком 8 ... 10 мм, застосування сіток з меншими чарунками утруднює вкладання бетонної суміші. Нормативний опір дроту тканих і зварних сіток становить $f_{m,ser} = 245$ МПа, що дорівнює найменшому значенню умовної межі текучості, яке відповідає залишковому відносному видовженню 0,2 % і рівне 0,8 тимчасового опору розриву дроту сітки. Розрахунковий опір сіток для граничних станів першої та другої груп визначають з урахуванням коефіцієнта 1,1. Модуль пружності сіток становить $E_m = 150000$ МПа. Характеристикою сітчастого армування є коефіцієнт μ_m або μ'_m , що визначається як відношення площі поперечного перерізу сітки на одиницю довжини в розтягнутій A_m і стиснутій зонах A'_m до товщини елемента на розглядуваній ділянці перерізу t .

Сили зчеплення в армоцементі зростають майже пропорційно до товщини перерізу і кількості сіток у перерізі, зі зменшенням номера сітки сили зчеплення теж зростають. Зі збільшенням водоцементного відношення зчеплення зменшується, у верхніх шарах перерізу це зниження проявляється інтенсивніше.

Дисперсне армування знижує деформації усадки дрібнозернистого бетону на 15 ... 20%, зі збільшенням коефіцієнта сітчастого армування усадка зменшується.

Для армоцементу характерна пропорційна залежність між напруженнями і деформаціями повзучості. Дисперсне армування знижує деформації повзучості дрібнозернистого бетону в середньому на 30 ... 50%.

Армоцемент часто застосовують у конструкціях, які працюють під впливом динамічних, циклічних або сейсмічних навантажень. Місцеве руйнування залежить від сили удару і товщини елемента і відбувається внаслідок того, що на межі контуру удару виникає чистий зсув, а напруження перевищують міцність бетону на розтяг. Дисперсне армування сприяє підвищенню ударної міцності. Зі зменшенням часу дії наванта-

ження міцність дрібнозернистого бетону зростає, бо при динамічних впливах пластичні деформації в бетоні розвиваються повільніше, ніж при його статичному навантаженні. Межа витривалості армоцементу вища від межі витривалості залізобетону внаслідок кращого зчеплення при дисперсному армуванні.

Анкерування арматури у бетоні забезпечує спільну їх роботу протягом усього терміну експлуатації конструкції. Для армоцементних елементів враховуючи їх малу товщину та особливість армування, питання анкерування арматури має важливе значення.

Дисперсне армування тонкими дротяними сітками з часто розташованими (через 6 ... 12,5 мм) поперечними дротинками забезпечує анкерування поздовжніх дротинок сітки. В тканих сітках згини у місцях перетину поздовжніх та поперечних дротинок є своєрідними анкерами. Для зварних сіток такими анкерами є зварні з'єднання поздовжніх та поперечних дротинок.

Встановлено, що зі зменшенням діаметра дроту та зі збільшенням кількості дротинок сили зчеплення арматури з бетоном зростають, а її анкерування покращується.

При застосуванні сіток у кількості 400 – 500 кг на 1 м³ бетону зростає поверхня зчеплення арматури з бетоном, тому бетон рівномірніше включається в роботу, що сприяє зниженню концентрації напружень, більш рівномірному розподілу внутрішніх зусиль, і як наслідок, розтягваність армоцементу у понад 5 разів перевищує розтягваність залізобетону. Таке армування підвищує тріщиностійкість, водонепроникність, стійкість до дії місцевих і динамічних навантажень.

Залежність між напруженнями і деформаціями армоцементу – нелінійна (рис. 2).

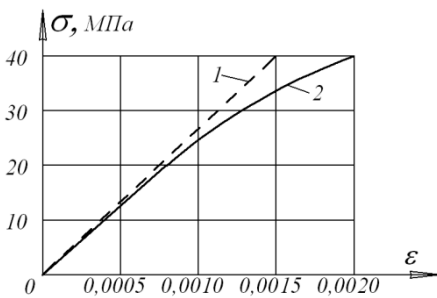


Рис. 2. Діаграма деформацій армоцементу при стиску: 1 – пружні деформації, 2 – повні деформації

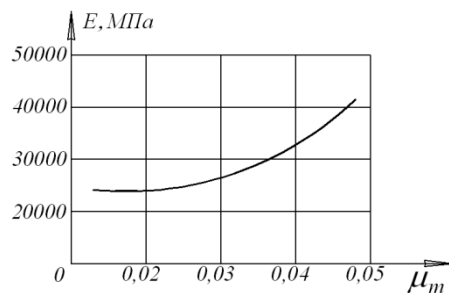


Рис. 3. Залежність модуля пружності від вмісту арматури

Дисперсне армування з $\mu_m \leq 0,02$ не впливає суттєво на міцність армоцементу на стиск, а залежить, в основному, від класу бетону. Зі зменшенням коефіцієнта сітчастого армування стискувальні деформації зростають.

Модуль пружності армоцементу (рис. 3) зростає зі збільшенням коефіцієнта μ_m .

У зв'язку зі значною гнучкістю сіток міцнісні і деформівні характеристики арматури при стиску армоцементних елементів повністю не використовуються.

В межах оптимальних значень коефіцієнта сітчастого армування ($\mu_m \leq 0,04$) відносні деформації армоцементу залежать від сітчастого армування і деформативності бетону, зумовленої його міцністю та віком.

Гранична розтягуваність дрібнозернистого бетону армоцементних конструкцій становить $(10 \dots 15) \times 10^{-5}$. До утворення тріщин модуль пружності на розтяг приблизно такий же як і на стиск, після утворення тріщин він різко знижується. Дисперсне армування в кількості до 2% позитивно впливає на роботу армоцементу на розтяг, проте збільшення кількості сітчастого армування в розтягнутих елементах ефекту не дає – доцільніше виконати розтягнуті конструкції попередньо напруженими.

2.4. Статичний розрахунок оболонок

Зусилля у статично невизначених армоцементних конструкціях від зовнішніх навантажень і впливів при розрахунку за граничними станами першої та другої груп визначають з урахуванням непружних деформацій бетону й арматури, наявності тріщин, з урахуванням деформованого стану елементів. Статичний розрахунок армоцементних оболонок виконують як тонкостінних просторових конструкцій. Прогини оболонок покриттів мають бути в допустимих межах – до 1/400 прольоту, а для великоформатних конструкцій (понад 60 м) – до 1/500 прольоту.

Граничні зусилля у нормальних перерізах елемента визначають з урахуванням таких передумов: опір бетону розтягу приймають рівним нулю; опір бетону стиску рівний f_c і рівномірно розподілений по стиснутій зоні бетону; напруження в арматурі стиснутої зони бетону постійні і не більші за f_{mc} ; розтягуючі напруження в арматурі постійні по висоті розтягнутої зони перерізу і не більші за f_m, f_{yd} .

У проведеному дослідженні виконано розрахунок (рис. 4 ... 7) поверхні у формі гіперболічного параболоїда, прямокутного у плані, зі сторонами: $a = 3500$ мм, $b = 2250$ мм. Стріла підйому $f_1 = f_2 = 500$ мм, що є в рекомендованих межах – від 1/10 до 1/5 прольоту. Найбільший кут нахилу до горизонту дотичної до поверхні монолітної оболонки для можливості бетонування на односторонній опалубці становить 12° , що не перевищує рекомендований кут 35° . Товщина оболонки $t = 30$ мм. По контуру

оболонки передбачено бортові елементи у вигляді металевих ферм. Матеріал конструкції оболонки – армоцемент з використанням бетону класу С16/20 з розрахунковим опором бетону на стиск $f_{cd}=11,5$ МПа. Для армування застосовано зварні сітки № 12,5 за ТУ 14-4-713-76, номінальний діаметр дроту сітки 0,5 мм, номінальний розмір сторін чарунок 12,5 мм, коефіцієнт сітчастого армування A_m при одному шарі сітки на 1 мм товщини перерізу елемента становить 0,0014, розрахунковий опір зварних сіток $f_m = 245$ МПа.

Коефіцієнт $\mu'_m = \frac{A'_m}{t} = \frac{0,0014}{3} = 0,00047$, тоді міцність армоцементу при стиску становитиме:

$$f_{c1} = f_{cd} + f_m \times \mu'_m = 11,5 + 245 \times 0,00047 = 11,6143 \text{ МПа.}$$

Коефіцієнт $\mu_m = \frac{A_m}{t} = \frac{0,0014}{3} = 0,00047$, а міцність армоцементу при розтягу становитиме:

$$f_{cm} = f_m \times \mu_m = 245 \times 0,00047 = 0,1143 \text{ МПа.}$$

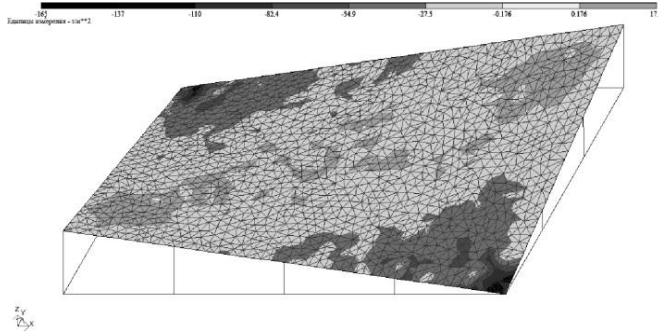


Рис. 4. Ізополя напружень по N_x

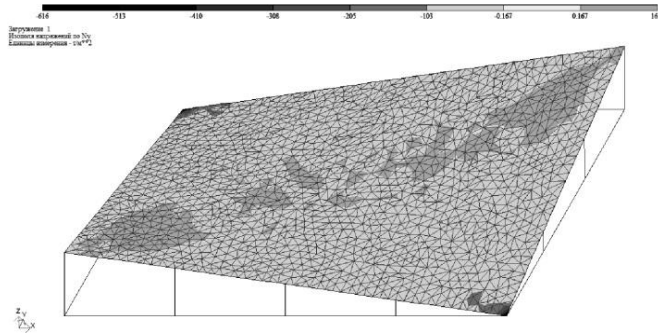


Рис. 5. Ізополя напружень по N_y

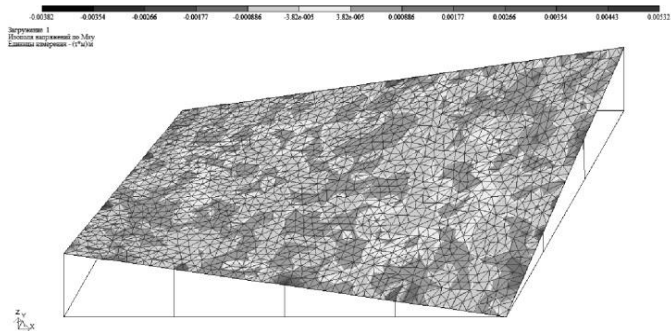


Рис. 6. Ізополя напружень по M_x

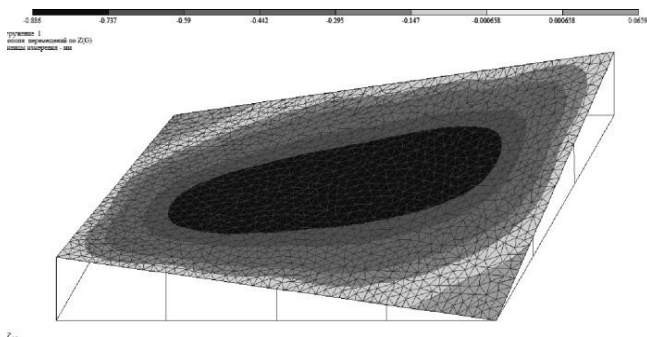


Рис. 7. Ізополя переміщень по Z

Окрім основних розрахунків оболонки за граничними станами, особливий інтерес може викликати виконання розрахунків на найімовірніші варіанти позаграничних впливів. Насамперед, виходячи з розрахунку й аналізу його результатів, виявляють елементи, вузли, в'язі, які більшою мірою впливають на існування як таке цілої конструктивної системи. Раптове послідовне виключення з роботи цих елементів та в'язей дозволить розрахунковим шляхом виявити резерви міцності конструкції. Це дасть змогу передбачити конструктивні заходи з оптимізації окремих елементів конструкції з метою недопущення лавиноподібного руйнування. Особливої уваги надають можливому імпульсному впливу і, як результат, миттєвому виключенню з роботи окремого елемента, вузла, зв'язку, що призведе до появи граничних і позаграничних станів у інших елементах конструктивної системи. Усі розрахунки виконують з урахуванням фізичної, геометричної і конструктивної нелінійності.

Оцінка надійності армоцементної конструкції покриття може бути виконана на основі повного дослідження його напружено-деформованого стану (НДС) за врахування геометричних параметрів. Після дослідження НДС можна удосконалити методику розрахунку конструкцій і подати пропозиції з технології їх виготовлення.

2.5. Виготовлення моделі армоцементної оболонки

Для експериментального дослідження НДС армоцементного покриття у формі гіпара було виготовлено натурну модель (рис. 8 ... 11) з параметрами, прийнятими у наведеному вище розрахунку.



Рис. 8. Бортові елементи оболонки у вигляді металевих ферм та виставлена опалубка під одну з оболонок



Рис. 9. Встановлення «маячків» для контролю товщини оболонки, укладання зварної сітки

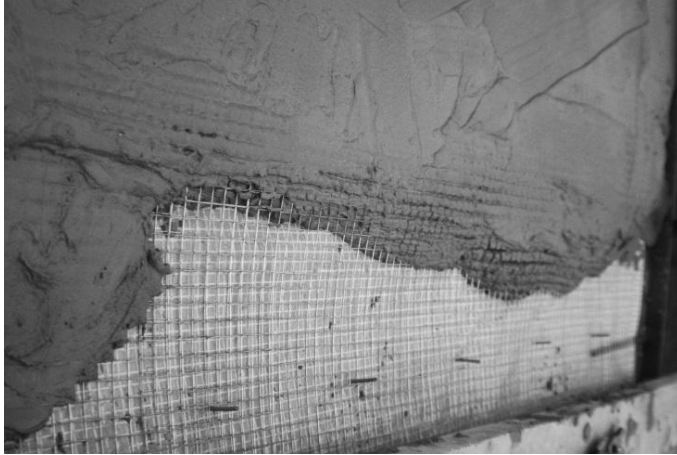


Рис. 10. Формування тіла оболонки



Рис. 11. Загладжування поверхні армоцементної оболонки

3. Перспективи подальших досліджень

В подальшому експериментально буде досліджено НДС армоцементного покриття та порівняно отримані дані із розрахунковими. Будуть досліджуватися процеси виникнення і росту тріщин у тонкостінній конструкції за дії експлуатаційних навантажень. Натурні випробування оболонки остаточно будуть тривати до руйнування, що дозволить отримати схеми злому і форми руйнування. Експериментальне дослідження напружено-деформованого стану армоцементної оболонки покриття дозволить використати експериментально обґрунтовані розрахункові формули для перевірки усіх можливих граничних станів.

Для армоцементної оболонки важливим є ріст деформацій конструкції у часі, зумовлений повзучістю і можливістю поступового виключення з роботи бетону розтягнутої зони. Критичні навантаження тонкостінної оболонки при довготривалій дії виявляються, як правило, значно нижчими, ніж за умови дії короткотривалих випробувань.

На основі детального аналізу отриманих розрахункових результатів та їх зіставлення з експериментальними даними буде проведено статистичний аналіз та узагальнено методику розрахунку тонкостінних конструкцій з армоцементу на випадок повторних навантажень.

Література

- [1] Пасічник Р. В., Скінченнорізницева методика розрахунку стійкості оболонок з від'ємною Гаусовою кривою – дис. канд. тех. наук, Луцьк, 2010.
- [2] Рассказов А. О., Расчет оболочек типа параболических параболоидов, Киев, Изд. Киевского Госуниверситета, 1972.
- [3] Самольянов И. И., Прочность, устойчивость и колебания гиперболического параболоида, Луцк, Луцкий индустриальный институт, 1993.
- [4] Черных К. Ф., Линейная теория оболочек, Ленинград, Изд. Ленинград. ун-та, ч. 2, 1965.

магістр Сергій Ужегов
e-mail: lamerilkkin@gmail.com

Асистент кафедри промислового та цивільного будівництва, Луцького НТУ. Стажувався в університеті Гліндор (Великобританія) та в Люблінській політехніці (Польща). Завершив навчання в аспірантурі у 2014 р. Працює над дисертаційним дослідженням «Міцність, тріщиностійкість та деформативність тонкостінних оболонок типу "гіперболічний параболоїд"».



RESEARCH OF THE FERROCONCRETE SHELLS

Abstract. *The article presents the calculation of ferrocement roofing in the shape of a hyperbolic paraboloid, rectangular, modeling his designs for the experimental research.*

Keywords: *ferroconcrete, shell, hyperbolic paraboloid, model*

РОЗРАХУНОК ОДНОПОРОЖНИННОГО ГІПЕРБОЛОЙДА МЕТОДОМ СКІНЧЕННИХ РІЗНИЦЬ

Тарас Горбатюк

Луцький національний технічний університет
Кафедра промислового та цивільного будівництва

Анотація. В роботі використана методика розрахунку оболонок від'ємної Гаусової кривини методом скінченних різниць. Розглянуто розрахунок однопорожнинного гіперboloйда. Вивчено моментний напружений стан при навантаженні від власної ваги. Розглянуто питання внутрішньої збіжності розв'язку.

Ключові слова: однопорожнинний гіперboloйд, скінченно-різницевий метод, моменти, оболонка

1. Вступ

Оболонки типу однопорожнинного гіперboloйда знайшли практичне застосування в будівництві пізніше оболонок інших видів, тому їх статичні та жорсткісні характеристики виявились менш вивченими і розробленими. За моментною теорією розрахунок оболонок виконується, як правило, на основі таких чисельних методів як метод скінченних різниць (МСР) та метод скінченних елементів (МСЕ).

В статті розглядається розрахунок однопорожнинного гіперboloйда при різних навантаженнях за моментною теорією методом сіток.

2. Основні результати дослідження

Система рівнянь теорії оболонок записана в переміщеннях має вигляд:

$$\begin{aligned} \nabla^4 W + \frac{12}{h^2} \left[\frac{1}{R_1} \frac{\partial U}{\partial \theta} (K_1 + \mu K_2) + \frac{1}{R_1 r} \frac{\partial r}{\partial \theta} U (K_2 + \mu K_1) + \frac{1}{r} \frac{\partial r}{\partial \theta} U (K_2 + \mu K_1) + \right. \\ \left. + \frac{1}{r} \frac{\partial V}{\partial \varphi} (K_2 + \mu K_1) + (K_1^2 + 2\mu K_1 \times K_2 + K_2^2) \right] W = \frac{g_n}{D} \\ \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{r}{R_1} \frac{\partial U}{\partial \theta} \right) + \frac{\partial}{\partial \theta} (r K_1 W) + \mu \left[\frac{\partial^2 V}{\partial \theta \partial \varphi} + \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{1}{R_1} \frac{\partial r}{\partial \theta} U \right) + \frac{\partial}{\partial \theta} (K_2 r W) \right] \\ + \frac{(1-\mu) R_1}{2} \frac{\partial^2 U}{r \partial \varphi^2} + \frac{(1-\mu)}{2} r \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial V}{\partial \varphi} \right) - \frac{\partial r}{\partial \theta} \frac{1}{r} \frac{\partial V}{\partial \varphi} - \frac{1}{R_1 r} \left(\frac{\partial r}{\partial \theta} \right)^2 U \\ - K_2 W \frac{\partial r}{\partial \theta} - \mu \left(\frac{1}{R_1} \frac{\partial U}{\partial \theta} \frac{\partial r}{\partial \theta} + K_1 W \frac{\partial r}{\partial \theta} \right) = - \frac{R_1 r}{B} g_1 \end{aligned} \quad (1)$$

$$\frac{R_1}{r} \frac{\partial^2 V}{\partial \varphi^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial r}{\partial \theta} \frac{\partial U}{\partial \varphi} + R_1 (K_2 + \mu K_1) \frac{\partial W}{\partial \varphi} + \frac{1-\mu}{2} \times \frac{\partial^2 U}{\partial \theta \partial \varphi} + \frac{1-\mu}{2} \frac{\partial}{\partial \theta} \left[\frac{r^2}{R_1} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{V}{r} \right) \right] + \frac{1-\mu}{2} \frac{\partial r}{\partial \theta} \frac{1}{r} \frac{\partial U}{\partial \varphi} + \frac{1-\mu}{2} \frac{\partial r}{\partial \theta} \frac{r}{R_1} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{V}{r} \right) = -\frac{R_1 r}{B} g_2;$$

В статті прийнято, що зміна кривини і кручення, обумовлені компонентами переміщень дотичними до серединної поверхні, як правило, приймаються несуттєвими. Обґрунтування використання цього методу було введено в науку Х. М. Муштарі і Л. Донеллом [2], та широко використовується в задачах стійкості оболонок обернення.

В (1) прийняті позначення:

$$\nabla^4 W = \frac{1}{R_1 r} \left[\frac{r}{R_1} \frac{\partial^2 (\nabla^2 W)}{\partial \theta^2} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{r}{R_1} \right) \frac{\partial (\nabla^2 W)}{\partial \theta} + \frac{R_1}{r} \frac{\partial^2 (\nabla^2 W)}{\partial \varphi^2} \right] \quad (2)$$

$$\nabla^2 W = \frac{1}{R_1 r} \left[\frac{r}{R_1} \frac{\partial^2 W}{\partial \theta^2} + \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{r}{R_1} \right) \frac{\partial W}{\partial \theta} + \frac{R_1}{r} \frac{\partial^2 W}{\partial \varphi^2} \right];$$

U, V, W – компоненти зміщення (рис. 1), h – товщина оболонки, D, B – циліндрична жорсткість на розтяг елемента оболонки, r, R – коефіцієнти першої квадратичної форми Гауса, K_1, K_2 – кривини поверхні, $\mu = 0,2$ – коефіцієнт Пуассона, g_1, g_n, g_2 – компоненти інтенсивності навантаження.

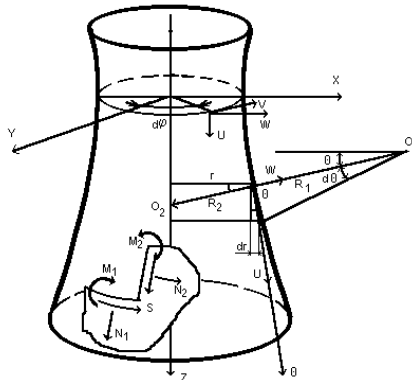


Рис. 1. Схема зусиль

Геометрія поверхні визначається наступними параметрами:

$$r = \frac{a}{c} \sqrt{z^2 + c^2} \quad a, c - \text{параметри гіперболи,}$$

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{dr}{dz} = \frac{a}{rc} \sqrt{r^2 - a^2}, \quad r = a(1 - \alpha^2 \operatorname{tg}^2 \theta)^{\frac{1}{2}}, \quad \frac{dr}{d\theta} = \frac{a\alpha^2}{\cos^2 \theta \sqrt{(1 - \alpha^2 \operatorname{tg}^2 \theta)^3}},$$

$$R_1 = \frac{\alpha}{c^2} \sqrt{[(1 + \alpha^2)r^2 - a^2]^3}, \quad K_1 = -\frac{1}{R_1}, \quad K_2 = \frac{1}{R_2} = \frac{r}{\cos \theta}. \quad (3)$$

Співвідношення Кодацці:

$$\frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{r}{R_1} \right) = -\frac{1}{R_1} \frac{\partial r}{\partial \theta}, \quad \text{або} \quad \frac{\partial r}{\partial \theta} = R_1 \sin \theta. \quad (4)$$

Складність розв'язку поставленої задачі обумовлюється великою розмірністю задачі, високим порядком диференціювання рівнянь в часткових похідних. Їх коефіцієнти являються складними функціями координат на поверхні оболонки. Тому при розв'язанні поставленої задачі переходять до дискретних методів алгебраїзації рівнянь серед яких найбільш ефективним є метод скінченних елементів і метод сіток [1, 3].

Для дискретизації задачі на серединній поверхні, зазвичай, будують координатні лінії, що співпадають з лініями кривини поверхні. Рівняння континуальної системи (1) апроксимуються скінченно-різницевиими аналогами в центральних різницях першого порядку точності, використовуючи при цьому цілочисельні координати, що відповідають номерам вузлів різницевої сітки в напрямку θ і φ . Для визначення коефіцієнтів рівнянь (першої і другої квадратичної форми) використовуються вузли між лініями основної сітки.

Скінченно-різницеві аналоги рівнянь для вузла сітки (i, k) мають вигляд:

$$\begin{aligned} & - \left[\left(\frac{r}{R_1} \right)_{i,k+0.5} + \left(\frac{r}{R_1} \right)_{i,k-0.5} + (1-\mu)\lambda^2 \left(\frac{R_1}{r} \right)_{i,k} + \frac{\nabla \theta^2}{R_1 r} \left(\frac{\partial r}{\partial \theta} \right)_{i,k}^2 \right] U_{i,k} + \\ & + \left[\left(\frac{r}{R_1} \right)_{i,k+0.5} + \frac{\mu}{2} \Delta \theta \times \left(\frac{1}{R_1} \frac{\partial r}{\partial \theta} \right)_{i,k+1} - \frac{\mu}{2} \Delta \theta \left(\frac{1}{R_1} \frac{\partial r}{\partial \theta} \right)_{i,k} \right] U_{i,k+1} + \\ & + \left[\left(\frac{r}{R_1} \right)_{i,k-0.5} - 0.5\mu\Delta\theta \left(\frac{1}{R_1} \frac{\partial r}{\partial \theta} \right)_{i,k-1} + 0.5\mu\Delta\theta \left(\frac{1}{R_1} \frac{\partial r}{\partial \theta} \right)_{i,k} \right] U_{i,k-1} + \\ & + 0.5(1-\mu)\lambda^2 \left(\frac{R_1}{r} \right)_{i,k} \times (U_{i+1,k} + U_{i-1,k}) + 0.25\lambda \left(\mu + (1-\mu)0.5 \frac{r_{i,k}}{r_{i,k+1}} \right) \times \\ & \times (V_{i+1,k+1} + V_{i-1,k+1}) + 0.25\lambda \left[\mu + 0.5(1-\mu) \frac{r_{i,k}}{r_{i,k-1}} \right] \times (V_{i-1,k-1} - V_{i+1,k-1}) - \\ & - 0.25\lambda\Delta\theta \left(\frac{1}{r} \frac{\partial r}{\partial \theta} \right)_{i,k} (V_{i+1,k} - V_{i-1,k}) - \Delta\theta^2 \left(\frac{\partial r}{\partial \theta} \right)_{i,k} (K_2 + \mu K_1)_{i,k} W_{i,k} + \\ & + 0.5\Delta\theta r_{i,k+1} (K_1 + \mu K_2)_{i,k+1} W_{i,k+1} - 0.5\Delta\theta r_{i,k-1} \times \\ & \times (K_1 + \mu K_2)_{i,k-1} W_{i,k-1} = -\frac{\Delta\theta^2}{B} (R_1 r g)_{i,k} \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned}
& - \left[2 \left(\frac{R_1}{r} \right)_{i,k} + \frac{1-\mu}{2\lambda^2} \left(\frac{r^2}{R_1} \right)_{i,k+0.5} \left(\frac{1}{r} \right)_{i,k} + \frac{1-\mu}{2\lambda^2} \times \left(\frac{r^2}{R_1} \right)_{i,k-0.5} \left(\frac{1}{r} \right)_{i,k} \right] V_{i,k} + \left(\frac{R_1}{r} \right)_{i,k} \times \\
& \times (V_{i+1,k} + V_{i-1,k}) + \left[\frac{1-\mu}{2\lambda^2} \left(\frac{r^2}{R_1} \right)_{i,k+0.5} \left(\frac{1}{r} \right)_{i,k+1} + \frac{1-\mu}{4\lambda} \Delta\varphi \times \left(\frac{r}{R_1} \frac{\partial r}{\partial \theta} \right)_{i,k} \left(\frac{1}{r} \right)_{i,k+1} \right] \times \\
& \times V_{i,k+1} + \left[\frac{1-\mu}{2\lambda^2} \left(\frac{r^2}{R_1} \right)_{i,k-0.5} \times \left(\frac{1}{r} \right)_{i,k-1} - \frac{1-\mu}{4\lambda} \Delta\varphi \left(\frac{r}{R_1} \frac{\partial r}{\partial \theta} \right)_{i,k} \left(\frac{1}{r} \right)_{i,k-1} \right] V_{i,k-1} + \quad (6) \\
& + 0.5\Delta\varphi \left(\frac{1}{r} \frac{\partial r}{\partial \theta} \right)_{i,k} (U_{i+1,k} - U_{i-1,k}) \frac{3-\mu}{2} + \\
& + \frac{1+\mu}{8\lambda} (U_{i+1,k+1} - U_{i+1,k-1} + U_{i-1,k-1} - U_{i-1,k+1}) + \\
& + 0.5\Delta\varphi (R_1)_{i,k} (K_2 + \mu K_1)_{i,k} (W_{i+1,k} - W_{i-1,k}) = -\frac{\Delta\varphi^2}{B} (R_1 r g_2)_{i,k}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \left\{ \left[\left(\frac{r}{R_1} \right)_{i,k+0.5}^2 \left(\frac{1}{R_1 r} \right)_{i,k+1} + \rho_{i,k}^2 \left(\frac{1}{R_1 r} \right)_{i,k} + \left(\frac{r}{R_1} \right)_{i,k-0.5}^2 \left(\frac{1}{R_1 r} \right)_{i,k-1} + 2 \left(\frac{R_1}{r^3} \right)_{i,k} \lambda^4 \right] W_{i,k} - \right. \\
& - \left[\rho \left(\frac{1}{R_1 r} \right)_{i,k} \left(\frac{r}{R_1} \right)_{i,k+0.5} + \left(\frac{r}{R_1} \right)_{i,k+0.5} \left(\frac{1}{R_1 r} \right)_{i,k+1} \times \rho_{i,k+1} \right] W_{i,k+1} - \\
& - \left[\rho \left(\frac{1}{R_1 r} \right)_{i,k} \left(\frac{r}{R_1} \right)_{i,k-0.5} + \left(\frac{r}{R_1} \right)_{i,k-0.5} \left(\frac{1}{R_1 r} \right)_{i,k-1} \rho_{i,k-1} \right] W_{i,k-1} - \\
& - 2\rho \left(\frac{1}{r^2} \right)_{i,k} \lambda^2 (W_{i+1,k} + W_{i-1,k}) + \left[\left(\frac{r}{R_1} \right)_{i,k+0.5} \times \left(\frac{1}{r^2} \right)_{i,k+1} \lambda^2 + \left(\frac{r}{R_1} \right)_{i,k+0.5} \left(\frac{1}{r^2} \right)_{i,k} \lambda^2 \right] \times \\
& \times (W_{i+1,k+1} + W_{i-1,k+1}) + \left[\left(\frac{r}{R_1} \right)_{i,k-0.5} \left(\frac{1}{r^2} \right)_{i,k-1} \times \lambda^2 + \left(\frac{r}{R_1} \right)_{i,k-0.5} \left(\frac{1}{r^2} \right)_{i,k} \lambda^2 \right] \times \\
& \times (W_{i+1,k-1} + W_{i-1,k-1}) + \left(\frac{r}{R_1} \right)_{i,k+0.5} \left(\frac{1}{R_1 r} \right)_{i,k+1} \left(\frac{r}{R_1} \right)_{i,k+1.5} \times W_{i,k+2} + \\
& + \left(\frac{r}{R_1} \right)_{i,k-0.5} \left(\frac{1}{R_1 r} \right)_{i,k-1} \left(\frac{r}{R_1} \right)_{i,k-1.5} \times W_{i,k-2} + \left(\frac{R_1}{r^3} \right)_{i,k} \lambda^4 (W_{i+2,k} + W_{i-2,k}) \left. \right\} + \\
& + \frac{12}{h^2} (K_1^2 + 2\mu K_1 K_2 + K_2^2)_{i,k} (r R_1)_{i,k} \Delta\theta^4 W_{i,k} + \frac{6}{h^2} \Delta\theta^3 \times \\
& \times r_{i,k} (U_{i,k+1} - U_{i,k-1}) (K_1 + \mu K_2)_{i,k} + \frac{12}{h^2} \Delta\theta^4 \times \left(\frac{\partial r}{\partial \theta} \right)_{i,k} (K_2 + \mu K_1)_{i,k} U_{i,k} + \quad (7) \\
& + \frac{6}{h^2} \Delta\theta^4 (K_2 + \mu K_1)_{i,k} (R_1)_{i,k} \frac{V_{i+1,k} - V_{i-1,k}}{\Delta\varphi} = \left(\frac{R_1 r g_n}{D} \right)_{i,k} \Delta\theta^4
\end{aligned}$$

Розглядається розрахунок градирні (рис. 1) з параметрами: $a = 35$ м, $c = 82.4$ м, $h = 0.18$ м, $\alpha = c/a = 2.3211$ при різному кроці сітки n . Навантаження прийняті від ваги G_i внутрішнього тиску $g_n - const$.

Граничні умови: верхнє сїчення оболонки при $\theta_{\min} = -8.626^\circ$ вільне від в'язів защемлення $S=0$, $N_1=0$, $R_1=0$, $M_1=0$. $\theta = 18.66^\circ$ (нижній край оболонки) повне защемлення $a = V = W = \frac{\partial W}{\partial \theta} = 0$.

Для визначення значення функцій переміщень на контурі і за контуром використовують наступні різницеві аналоги (8, 9, 10, 11)

Функція V для краю $\varphi = \varphi_{\min}$

$$\begin{aligned}
 & -2 \left(\frac{R_1}{r} \right)_{i,k} + \frac{1-\mu}{2\lambda^2} \left(\frac{r^2}{R_1} \right)_{i,k+0.5} \left(\frac{1}{r} \right)_{i,k} + \frac{1-\mu}{2\lambda^2} \times \left(\frac{r^2}{R_1} \right)_{i,k-0.5} \left(\frac{1}{r} \right)_{i,k} \Big] V_{i,k} + \\
 & + 2 \left(\frac{R_1}{r} \right)_{i,k} V_{i+1,k} + \frac{\Delta\varphi}{2} (1+\mu) \left(\frac{1}{r} \frac{\partial r}{\partial \theta} \right)_{i,k} U_{i,k} + \frac{1}{\lambda} \left(\frac{1-3\mu}{4} \right) \times (U_{i,k-1} + U_{i,k+1}) + \\
 & + \left[\Delta\varphi (R_1)_{i,k} (K_2 + \mu K_1)_{i,k} \right] \times (W_{i,k} + W_{i+1,k}) + \frac{1+\mu}{4\lambda} (U_{i+1,k+1} - U_{i+1,k-1}) + \\
 & \frac{3-\mu}{2} \Delta\varphi \left(\frac{\partial r}{\partial \theta} \frac{1}{r} \right)_{i,k} U_{i+1,k} + \frac{1-\mu}{2\lambda^2} \left[\left(\frac{r^2}{R_1} \right)_{i,k+0.5} + \frac{\Delta\theta}{2} \left(\frac{\partial r}{\partial \theta} \frac{r}{R_1} \right)_{i,k} \right] \left(\frac{V}{r} \right)_{i,k} + \\
 & + \frac{1-\mu}{2\lambda^2} \left(\frac{r^2}{R_1} \right)_{i,k-0.5} - \frac{\Delta\theta}{2} \left(\frac{\partial r}{\partial \theta} \frac{r}{R_1} \right)_{i,k} \Big] \left(\frac{V}{r} \right)_{i,k-1} = -\frac{\Delta\varphi^2}{B} (R_1 r g_2)_{i,k} + 2 \frac{\Delta\varphi}{B} (R_1)_{i,k} (N_2)_{i,k}
 \end{aligned} \tag{8}$$

Функція U для краю θ_{\min}

$$\begin{aligned}
 & - \left[\left(\frac{r}{R_1} \right)_{i,k+0.5} + \left(\frac{r}{R_1} \right)_{i,k-0.5} + (1-\mu)\lambda^2 \left(\frac{R_1}{r} \right)_{i,k} \times \Delta\theta^2 \left(\frac{1}{R_1 r} \right)_{i,k} \left(\frac{\partial r}{\partial \theta} \right)_{i,k}^2 + 2\mu\Delta\theta \left(\frac{r}{R_1} \right)_{i,k-0.5} \times \right. \\
 & \times \left. \left(\frac{\partial r}{\partial \theta} \frac{1}{r} \right)_{i,k} \right] U_{i,k} + \left[\left(\frac{r}{R_1} \right)_{i,k+0.5} + \left(\frac{r}{R_1} \right)_{i,k-0.5} + \mu\Delta\theta \left(\left(\frac{1}{R_1} \frac{\partial r}{\partial \theta} \right)_{i,k+1} - \left(\frac{1}{R_1} \frac{\partial r}{\partial \theta} \right)_{i,k} \right) \right] U_{i,k+1} + \\
 & + \frac{1-\mu}{2} \lambda^2 \left(\frac{R_1}{r} \right)_{i,k} (U_{i+1,k} + U_{i-1,k}) + \Delta\theta r_{i,k+1} \times (K_1 + \mu K_2)_{i,k+1} W_{i,k+1} - \Delta\theta (K_1 + \mu K_2)_{i,k} \times \\
 & \times \left[r_{i,k} - 2(R_1)_{i,k} \left(\frac{r}{R_1} \right)_{i,k-0.5} \right] W_{i,k} - \Delta\theta^2 \left(\frac{\partial r}{\partial \theta} \right)_{i,k} \times (K_2 + \mu K_1)_{i,k} W_{i,k} + \left(\lambda \frac{\mu}{2} + \frac{1-\mu}{4} \lambda \frac{r_{i,k}}{r_{i,k+1}} \right) \times \\
 & \times (V_{i+1,k+1} - V_{i-1,k+1}) - \left[\frac{1+\mu}{4} \lambda + \frac{\Delta\theta}{r} \lambda \left(\frac{\partial r}{\partial \theta} \frac{1}{r} \right)_{i,k} - \left(\frac{r}{R_1} \right)_{i,k-0.5} \mu \lambda \left(\frac{R_1}{r} \right)_{i,k} \right] (V_{i+1,k} - V_{i-1,k}) = \\
 & = 2\Delta\theta \frac{(R_1)_{i,k}}{B} \left(\frac{r}{R_1} \right)_{i,k-0.5} (N_1)_{i,k} - \frac{\Delta\theta^2}{B} (R_1 r g_1)_{i,k}
 \end{aligned} \tag{9}$$

Функція W для краю θ_{\min}

$$\begin{aligned}
& \left[\left(\frac{r}{R_1} \right)_{i,k+0.5} \left(\frac{1}{R_1 r} \right)_{i,k+1} \left(\left(\frac{r}{R_1} \right)_{i,k+0.5} + \left(\frac{r}{R_1} \right)_{i,k-0.5} \right) + \rho_{i,k}^2 \left(\frac{1}{R_1 r} \right)_{i,k} + 2 \left(\frac{R_1}{r^3} \right)_{i,k} \lambda^4 + \right. \\
& + 4(1-\mu)\lambda^2 \left(\frac{1}{r^3} \right)_{i,k} \times \left(\frac{\partial r}{\partial \theta} \right)_{i,k} \left(\frac{r}{R_1} \right)_{i,k-0.5} \Delta\theta + 12 \frac{\Delta\theta^4}{h^2} (rR_1)_{i,k} \times \\
& \times \left(K_1^2 + 2\mu K_1 K_2 + K_2^2 \right)_{i,k} \left. \right] W_{i,k} - \left[\rho_{i,k} \left(\frac{1}{R_1 r} \right)_{i,k} \left(\frac{r}{R_1} \right)_{i,k+0.5} + \right. \\
& + \rho_{i,k+1} \left(\frac{1}{R_1 r} \right)_{i,k+1} \left(\left(\frac{r}{R_1} \right)_{i,k-0.5} + \left(\frac{r}{R_1} \right)_{i,k+0.5} \right) + 2(1-\mu)\lambda^2 \left(\frac{1}{r^2} \right)_{i,k} \left(\frac{r}{R_1} \right)_{i,k-0.5} \left. \right] W_{i,k+1} - \\
& - \left[\rho_{i,k} \times \left(\frac{1}{R_1 r} \right)_{i,k} \left(\frac{r}{R_1} \right)_{i,k-0.5} - 2(1-\mu)\lambda^2 \left(\frac{1}{r^2} \right)_{i,k} \times \right. \\
& \times \left. \left(\frac{r}{R_1} \right)_{i,k-0.5} \right] W_{i,k-1} - 2\lambda^2 \left[\rho_{i,k} \left(\frac{1}{r^2} \right)_{i,k} + (1-\mu) \times \left(\frac{1}{r^3} \right)_{i,k} \left(\frac{\partial r}{\partial \theta} \right)_{i,k} \left(\frac{r}{R_1} \right)_{i,k-0.5} \Delta\theta \right] \times \\
& \times \left(W_{i+1,k} + W_{i-1,k} \right) + \left[\lambda^2 \left(\frac{1}{r^2} \right)_{i,k+1} \left(\left(\frac{r}{R_1} \right)_{i,k+0.5} + \left(\frac{r}{R_1} \right)_{i,k-0.5} \right) + \left(\frac{1}{r^2} \right)_{i,k} \left(\frac{r}{R_1} \right)_{i,k+0.5} + \right. \\
& + (1-\mu) \left(\frac{1}{r^2} \right)_{i,k} \left(\frac{r}{R_1} \right)_{i,k-0.5} \left. \right] \times \left(W_{i+1,k+1} + W_{i-1,k+1} \right) + \lambda^2 \left[\left(\frac{r}{R_1} \right)_{i,k-0.5} \left(\frac{1}{r^2} \right)_{i,k} - \right. \\
& - (1-\mu) \left(\frac{1}{r^2} \right)_{i,k} \left(\frac{r}{R_1} \right)_{i,k-0.5} \left. \right] \left(W_{i+1,k-1} + W_{i-1,k-1} \right) + \left(\frac{1}{R_1 r} \right)_{i,k+1} \left(\frac{r}{R_1} \right)_{i,k+1.5} \times \\
& \times \left(\left(\frac{r}{R_1} \right)_{i,k+0.5} + \left(\frac{r}{R_1} \right)_{i,k-0.5} \right) \times W_{i,k+2} + \left(\frac{R_1}{r^3} \right)_{i,k} \lambda^4 \left(W_{i+2,k} + W_{i-2,k} \right) + \frac{12}{h^2} \Delta\theta^3 \times \\
& \times r_{i,k} \left(K_1 + \mu K_2 \right)_{i,k} \left(U_{i,k+1} - U_{i,k} \right) + \frac{12}{h^2} \Delta\theta^4 \left(\frac{\partial r}{\partial \theta} \right)_{i,k} \times \left(K_2 + \mu K_1 \right)_{i,k} U_{i,k} + \\
& + \frac{6}{h^2} \lambda \Delta\theta^3 \left(K_2 + \mu K_1 \right)_{i,k} \left(R_1 \right)_{i,k} \times \left(V_{i+1,k} - V_{i-1,k} \right) = \frac{\Delta\theta^4}{D} \left(R_1 r g_n \right)_{i,k} - \\
& - 2 \frac{\Delta\theta^3}{D} \left(R_1 \right)_{i,k} \times \left(\frac{r}{R_1} \right)_{i,k-0.5} \left(Q_1^* \right)_{i,k}
\end{aligned} \tag{10}$$

Згинальний момент на краях: $\theta_{\min} - const$, $\theta_{\max} - const$

$$\begin{aligned}
 -\frac{\Delta\theta^2}{D}(M_1)_{i,k} = & \left[\left(\frac{1}{R_1}\right)_{i,k} \left(\frac{1}{R_1}\right)_{i,k+0.5} + \mu \frac{\Delta\theta}{2} \times \left(\frac{1}{R_1^2 r} \frac{\partial r}{\partial \theta}\right)_{i,k} \right] W_{i,k+1} - \\
 & - \left(\frac{1}{R_1}\right)_{i,k} \left[\left(\frac{1}{R_1}\right)_{i,k+0.5} + \left(\frac{1}{R_1}\right)_{i,k-0.5} \right] + 2\mu\lambda^2 \left(\frac{1}{r^2}\right)_{i,k} \left] W_{i,k} + \right. \\
 & + \left[\left(\frac{1}{R_1}\right)_{i,k} \times \left(\frac{1}{R_1}\right)_{i,k-0.5} - \mu \frac{\Delta\theta}{2} \left(\frac{1}{R_1^2 r} \frac{\partial r}{\partial \theta}\right)_{i,k} \right] W_{i,k-1} + \\
 & + \mu\lambda^2 \times \left(\frac{1}{r^2}\right)_{i,k} (W_{i+1,k} + W_{i-1,k})
 \end{aligned} \tag{11}$$

Враховуючи симетрію задачі, розглядається напружений стан лише в напрямку координати θ з сіткою при $n = 10$. При цьому крок $\Delta\theta = 0.04762$ рад. приймається постійним.

Для внутрішніх вузлів сітки записуються різнісні аналоги (5, 6, 7), відповідні контурні рівняння (9, 10, 11).

Результати розв'язку подані на рис. 3 – 6 в вигляді епюр переміщень та зусиль.

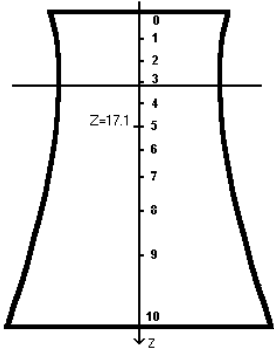


Рис. 2. Розрахункова схема градирні

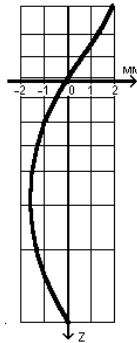


Рис. 3. Епюра W (власна вага)

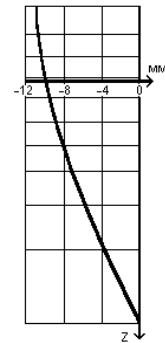


Рис. 4. Епюра U (власна вага)

Розв'язок показує що прогини від власної ваги W та V одного порядку. Порівнюючи зусилля N_1 знайдені за безмоментною теорією і N_1 в нашому розв'язку, бачимо що найбільше розходження виникає біля нижнього защемленого краю. Таку розбіжність можна пояснити значним краєвим ефектом. M_1 по всій висоті градирні величина дуже мала. Вийняток становлять точки розміщені в безпосередній близькості до нижнього защемленого краю, де значення моментів різко зростають, досягаючи екстремуму в защемленні в наслідок значного краєвого ефекту.

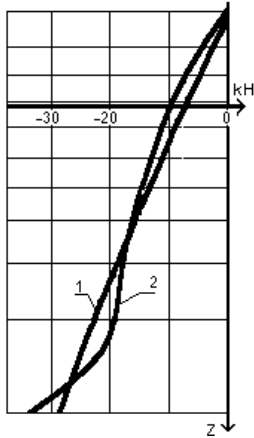


Рис. 5. Епюра N_1 : 1 – безмоментна теорія, 2 – метод сіток

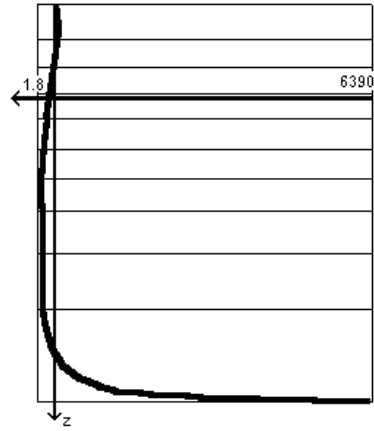


Рис. 6. Епюра M_1 ($\text{kH м } 10^8$)

Для встановлення точності розв'язку, задача розв'язана при різних кроках сітки для $n = 6, 10, 12, 18, 24, 48$, розбиттях. Результати дослідження представлені в таблиці 1.

Таблиця 1. Збіжність розв'язку про різних кроках сітки

Кількість розбиттів	Січення $Z = -17.10 \text{ м}$		Січення $Z = -103.99 \text{ м}$	
	W (мм)	U (мм)	N_1 (кН)	M_1 (10^{-2} кН·м)
6	-0,85	8,90	120	3,05
12	-0,92	9,64	139	1,27
18	-0,93	9,84	148	1,93
24	-0,94	9,93	157	2,50
48	-0,95	9,99	161	2,82

3. Висновок

МСР є економічнішим у порівнянні з МСЕ, він дозволяє здійснити безпосередніший підхід до чисельного розв'язку диференціальних рівнянь крайової задачі, дає можливість отримати кращу стійкість і збіжність розв'язку при розрахунку конструкцій відносно простої геометрії.

Література

- [1] Гуляев В. И., Баженов В. А., Гоцуляк Е. А., Гайдачук В. В., Расчет оболочек сложной формы, Київ, Будівельник, 1990.
- [2] Муштари Х. М., Галимов К. З., Нелинейная теория оболочек, Казань, Таткнигоиздат, 1957.
- [3] Пасічник Р. В., Розрахунок градирні на стійкість. Наукові нотатки. Міжвузівський збірник за напрямом „Інженерна механіка”, Луцьк, Випуск 19, 2007, 115–120.

магістр Тарас Горбатюк
e-mail: gorbatyukt@gmail.com

Горбатюк Тарас Валерійович народився в 1993 році в місті Луцьку. У 2010 році поступив до Луцького національного технічного університету, на спеціальність «Промислове та цивільне будівництво». Магістр кафедри промислового та цивільного будівництва Луцького національного технічного університету. Має досвід роботи в галузі розрахунку будівельних конструкцій. Наукові інтереси: будівельна механіка, будівельні конструкції та комп'ютерне моделювання.



CALCULATION OF THE ONE SHEET HYPERBOLOID USING THE FINITE-DIFFERENCE METHOD

Abstract. *The method of calculating the Gaussian curvature shells negative is used by finite difference method. One sheet hyperboloid calculation is considered. The stress state of moment under load from its own weights studied. The question of internal convergence solution is discovered.*

Keywords: *one sheet hyperboloid, finite-difference method, moment, shell*

ДО РОЗРАХУНКУ ОСНОВНИХ ХАРАКТЕРИСТИК СТЕРЖНЕВИХ СИСТЕМ

Ілля Козачук

Луцький національний технічний університет
Кафедра автомобілів і транспортних технологій

Анотація. В роботі представлено особливості розрахунку основних характеристик стержневих елементів конструкції при різних схемах закріплення. Запропоновано алгоритм визначення основних характеристик стержневих елементів із поєднанням статичного та динамічного їх розрахунку. В основу розрахунку закладені основні рівняння динамічного вигину тонких стержнів. Наведено результати розрахунків. Запропонований метод може використовуватися для визначення зміни параметрів конструкції в подібних задачах.

Ключові слова: динамічний розрахунок, стержнева конструкція, сценарій руйнування

1. Вступ

В практиці вітчизняного і зарубіжного промислового, цивільного та транспортного будівництва широкого розповсюдження набули конструкції, несучі елементи яких виконані у вигляді просторових стержневих систем [3]. Відомо, що питання безпеки сучасних будівель під час будівництва, а так само в ході їх подальшої експлуатації (особливо для старих житлових споруд) в даний час займають одне з важливих місць у будівельній сфері. Це пов'язано зі стрімким збільшенням обсягу будівництва в містах і з супроводжуючим його зростанням техногенних навантажень на споруджувані об'єкти, а так само виникненням надзвичайних ситуацій різного характеру. Не менш важливим є прагнення замовників мінімізувати витрати для отримання значного економічного ефекту, що позначається на економії матеріалу зведених конструкцій. Внаслідок цього, забезпечення безпеки функціонування будівельних конструкцій на всіх стадіях їх життєвого циклу від проектування до ліквідації стає зараз одним з важливих і актуальних завдань [7, 8].

Сучасні перспективні методи проектування включають початкове дослідження можливості застосування класичних і, за необхідності, розробку нових критеріїв руйнування елементів несучих конструкцій в умовах нестаціонарного деформування, дослідження сценаріїв розвитку аварійних ситуацій, отримання кількісних оцінок ризику різних траєкторій можливих сценаріїв [1, 2].

Викладене дозволяє виділити на сучасному етапі наступну проблему. Для конструкцій необхідно мати можливість проводити, як під час проектування, так і в ході експлуатації імітаційний моделюючий розрахунок на ймовірність часткового або повного лавино небезпечно обвалення в разі виникнення критичної ситуації. Під нею розуміється ситуація, коли

одна опора (кріплення) або кілька несучих елементів руйнуються або близькі до цього. Іншими словами необхідно знати ризики, що виникають під час створення і в процесі експлуатації конструкцій. При цьому для адекватної оцінки конструкції необхідно знати її параметри на кожному етапі, коли відбувається зміна її стану.

2. Основні результати дослідження

Дослідження показують, що проведення лише статичного розрахунку не завжди дозволяє визначити справжні значення напружень, які можуть виникати в конструкції в процесі експлуатації [10]. Більше того, існують дані, що значення напружень, визначені в ході динамічного розрахунку, перевищують дані отримані під час статичних розрахунків [11, 12]. Саме тому пропонується проводити розрахунок конструкцій на силові дії згідно із наступним алгоритмом:

1. Визначення початкових параметрів конструкції в початковому стані ($Y(0, x) = Y(x)$).
2. Визначення форм і частот вільних коливань для нової схеми конструкції, яка отримується після зміни її початкового стану.
3. Розкладання вихідного стану за формами отриманих вільних коливань.
4. Розв'язання статичної задачі в новій схемі $\rightarrow Y_{cm}(x)$.
5. Пошук мод для динамічної задачі в новій схемі $\rightarrow Y_{dn}(x)$.

Таким чином, вирішення задачі визначення параметрів конструкції в цілому, в необхідний момент часу, буде представлено накладенням (підсумовуванням) результатів динамічного та статичного розрахунків.

$$Y = Y_{cm}(x) + Y_{dn}(x, t)$$

Даний алгоритм реалізовано для 3-х схем, вибраних з найбільш поширених варіантів зміни умов кріплення вузлів простих стержневих конструкцій [9]. Так, виходячи з представленого, необхідно провести розрахунок параметрів конструкції для трьох задач.

Нехай маємо стержень, який жорстко закріплений з двох сторін. Такий варіант кріплення найбільш часто зустрічається в реальних умовах [4]. У повсякденній експлуатації – це аналог зварювального, нерухомого болтового або заклепкового з'єднання. Така конструкція має свої власні частоти і форми коливань [6]. Стержневий елемент в нашому випадку, навіть якщо не навантажений якимось чином додатково, перебуває під впливом власної ваги, що можна зімітувати, замінивши вагу рівномірно розподіленим навантаженням, як показано на рис. 1.

В розрахунках заздалегідь приймався вузол і спосіб його руйнування, при цьому розглядалися три можливих варіанти розвитку подій.

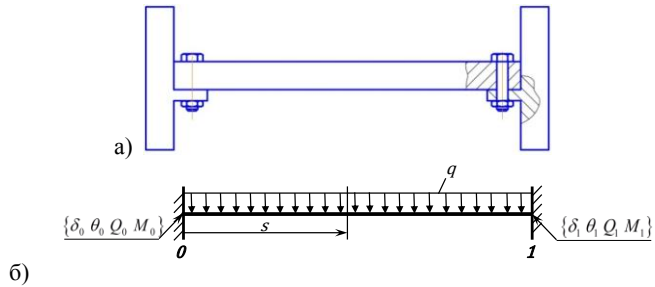


Рис. 1. Початкова схема навантаження стержня:
а) схема кріплення, б) розрахункова схема

Варіант 1 – моделювання обриву одного зі зв'язків на кінці стержня. Так права опора отримує нові ступені вільності, які характерні для шарнірної опори (наприклад, внаслідок зрізання всіх болтів кріплення, крім одного, або не повне руйнування опори). Таким чином, представлена раніше система переходить в новий стан (рис. 2) і отримує нові форми і частоти коливань.

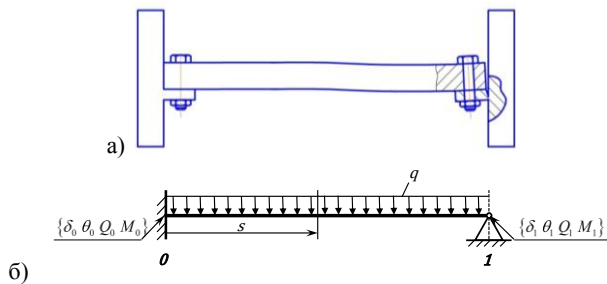


Рис. 2. Змінена схема навантаження стержня:
а) схема кріплення, б) розрахункова схема

Варіант 2 – моделювання поведінки стержня після обриву всіх зв'язків на одному кінці. На відміну від попереднього етапу, на іншому кінці стержня втрачаються всі зв'язки, тобто стержень стає не закріплений (рис. 3).

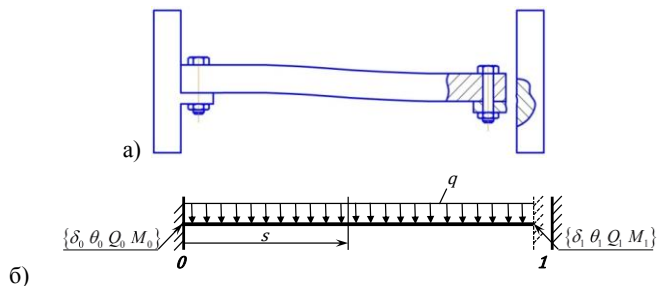


Рис. 3. Схема другого варіанту кріплення стержня після руйнування:
а) схема кріплення; б) розрахункова схема

Варіант 3 – моделювання поведінки стержня після переходу до шарнірів на двох кінцях. Так на кінцях стержня втрачається по одному зв'язку, що можна зімітувати заміною кріплення на шарнірні опори з двох сторін (рис. 4).

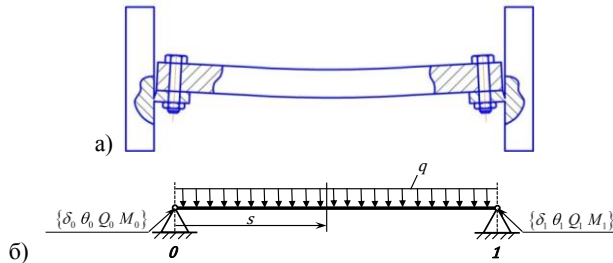


Рис. 4. Варіант кріплення стержня після часткового руйнування опор:
а) схема кріплення, б) розрахункова схема

Використання представленого вище алгоритму дозволило реалізувати вирішення описаних задач в програмному пакеті MathCAD.

В основу розрахунку закладена динамічна матриця впливу, яка представлена через функції Крилова [5]:

$$\delta_0(\xi, \lambda, \alpha, j, d) = \begin{pmatrix} s(\lambda\xi) & \frac{T(\lambda\xi)}{\lambda} & \dots & -\frac{U(\lambda\xi)}{d\lambda^2 j} & -\frac{V(\lambda\xi)}{d\lambda^3 j} \\ \frac{\lambda}{2}V(\lambda, \xi) & S(\lambda\xi) & \dots & -\frac{T(\lambda\xi)}{d\lambda j} & -\frac{U(\lambda\xi)}{d\lambda^2 j} \\ -d\lambda^2 jU(\lambda\xi) & -d\lambda jV(\lambda\xi) & \dots & S(\lambda\xi) & \frac{T(\lambda\xi)}{d\lambda} \\ -d\lambda^3 jT(\lambda\xi) & -d\lambda^2 jU(\lambda\xi) & \dots & d\lambda V(\lambda\xi) & S(\lambda\xi) \end{pmatrix}. \quad (1)$$

Спочатку були визначені початкові параметри конструкції у вихідному стані. В результаті множення вектора стану конструкції на початку (вузол 0) на динамічну матрицю впливу (1), ми отримаємо вираз, який по суті буде вектором стану на кінці стержня (вузол 1) для кожного із варіантів, що розглядаються (рис. 1, 2, 3, 4). Згідно з граничними умовами, на кінці стержня нам відомі параметри, значення яких дорівнюють нулю. Цього достатньо для складання системи рівнянь для визначення невідомих параметрів конструкції.

Отримані частотні рівняння конструкції для змінених станів стержня першого (рис. 2), другого (рис. 3) і третього (рис. 4) варіантів (2) дозволяють визначити частоти вільних коливань для змінених схем конструкції:

- для варіанту 1: $\frac{Q_0(\operatorname{ch}(\lambda) \cdot \sin(\lambda) - \operatorname{sh}(\lambda) \cdot \cos(\lambda))}{\operatorname{ch}(\lambda)} = 0$,

- для варіанту 2:
$$\frac{Q_0 (\operatorname{ch}(\lambda) \cdot \cos(\lambda) + 1)}{\operatorname{ch}(\lambda) + \cos(\lambda)} = 0, \quad (2)$$
- для варіанту 3:
$$\frac{2Q_0 \cdot \operatorname{sh}(\lambda) \cdot \sin(\lambda)}{\operatorname{sh}(\lambda) + \sin(\lambda)} = 0.$$

Рівняння (2) можна вважати частотним, оскільки величина λ відображає частоти вільних коливань конструкції.

Вона дорівнює

$$\lambda = \frac{\sqrt{\omega \cdot \sqrt{\frac{a}{j}}}}{d},$$

де d – безрозмірний діаметр, a – безрозмірна площа поперечного перерізу, j – безрозмірний момент інерції, ω – безрозмірна частота вільних коливань.

Далі нормуємо власні форми коливань, після чого, здійснюючи миттєву зміну граничних умов, імітуємо часткове або повне, залежно від схеми, руйнування кріплення відповідно до нового стану конструкції в задачі (рис. 2, 3, 4). При цьому слід відмітити, що в ряд за формою вільних коливань, у відповідності з новими граничними умовами, розкладаємо лише переміщення. Інші значення нормуючих множників для кутів, моментів і сил отримуємо за допомогою диференціювання (першої, другої, третьої похідних) знайдених значень переміщення. Після цього знаходяться значення мод для динамічної задачі в новій схемі:

- безрозмірне переміщення

$$\delta \text{Lsq}(\xi, \lambda, a, j, d, C) = \sum_{k=0}^{\text{rows}(C)-1} (C_k \cdot \text{Eig } F_n(\xi, \lambda_k, a, j, d)_0),$$

- безрозмірний кут

$$\theta \text{Lsq}(\xi, \lambda, a, j, d, C) = \sum_{k=0}^{\text{rows}(C)-1} (C_k \cdot \text{Eig } F_n(\xi, \lambda_k, a, j, d)_1),$$

- безрозмірний момент

$$M \text{Lsq}(\xi, \lambda, a, j, d, C) = \sum_{k=0}^{\text{rows}(C)-1} (C_k \cdot \text{Eig } F_n(\xi, \lambda_k, a, j, d)_3),$$

- безрозмірна перерізуюча сила

$$Q \text{Lsq}(\xi, \lambda, a, j, d, C) = \sum_{k=0}^{\text{rows}(C)-1} (C_k \cdot \text{Eig } F_n(\xi, \lambda_k, a, j, d)_3).$$

В результаті розкладання вихідного стану за формами отриманих вільних коливань були отримані графіки нормуючих форм вільних коливань конструкції для трьох варіантів. Склавши їх з такими ж графіками, але для статичної постановки задачі в новому стані було отримано безрозмірні графіки основних параметрів конструкції по безрозмірній координаті для нового стану конструкції (рис. 5–9).

Результати розрахунків, а також запропонований алгоритм можуть бути використані для описання зміни умов закріплення типових конструкцій і для розрахунку аналогічних стержневих схем.

Слід відмітити, що сам процес руйнування як правило складається з наступних етапів: початковий стан (рис. 1а), втрата одного із зв'язків у точці кріплення (рис. 2а), повна відсутність зв'язків у вузлі (рис. 3а).

Існують і інші сценарії руйнування, коли має місце прискорений розвиток процесу руйнування, і зважаючи на швидкоплинність процесів, що протікають в конструкції, зникає другий етап і після першого настає відразу третій. Або в результаті нового розподілу напружень після етапу «б» (рис. 2) в конструкції виникає втрата одного зв'язку і в лівому вузлі кріплення, що в результаті зведе розрахунки до описаної раніше схеми, показаної на рис. 4, а далі до можливого повного руйнування. Саме цим продиктований вибір прикладів розглядуваних вище задач.

Безрозмірне подання даних у програмі розрахунку дає можливість використовувати її для вирішення задач з різними початковими параметрами.

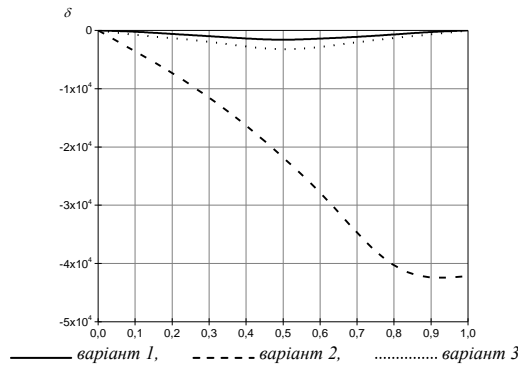


Рис. 5. Розподіл переміщень стержневої конструкції відносно безрозмірної координати для трьох варіантів руйнування

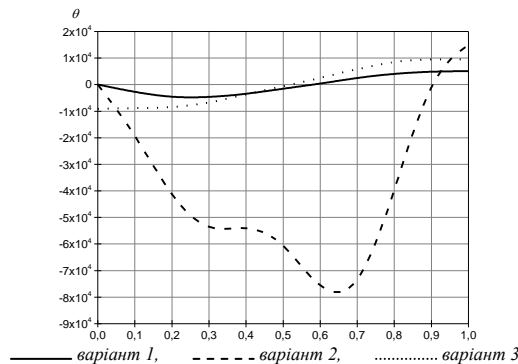


Рис. 6. Розподіл кутів відносно безрозмірної координати для трьох варіантів руйнування

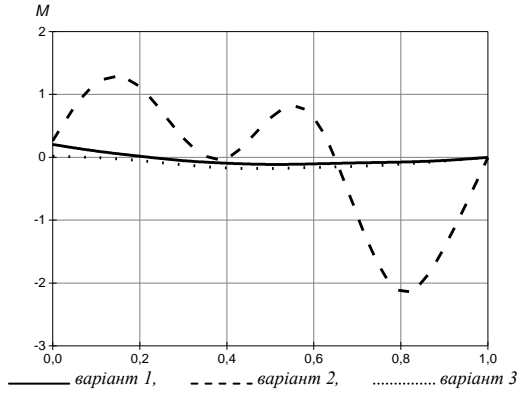


Рис. 7. Розподіл моментів відносно безрозмірної координати для трьох варіантів руйнування

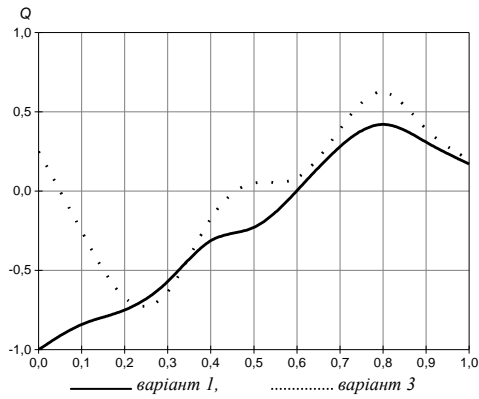


Рис. 8. Розподіл сил відносно безрозмірної координати для першого і третього варіантів руйнування

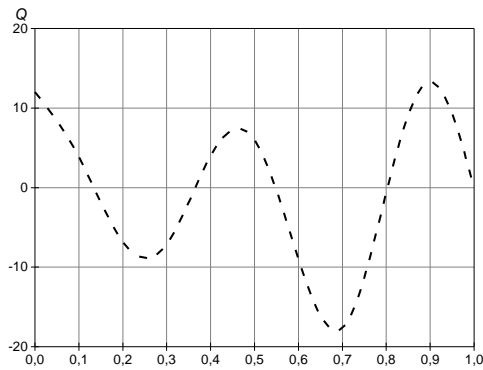


Рис. 9. Розподіл сил відносно безрозмірної координати для другого варіанту руйнування

Дані графіків переконливо свідчать, що в результаті проведення динамічного розрахунку відбувається істотне уточнення моментів і перерізуючих сил в порівнянні з статичним розрахунком. Важливим є і те, що динамічна постановка задачі дозволяє з'ясувати дійсне місце існування небезпечного перерізу і уточнити його місце розташування.

3. Висновки

Згідно з представленими графічними даними розрахунків (рис. 5–9) найбільш небезпечною схемою виявилася друга, оскільки в ній виникає найбільший максимальний момент в перерізі з координатою 0,81, який за модулем складає 2,2 (рис. 7). Небезпека даної схеми полягає також у тому, що в ній виникає кілька критичних точок з великим перепадом значень моменту.

Другою за небезпечністю можна вважати схему один із защемленням і шарніром. Справа в тому, що фіксація на початку координат призвела до виникнення тут максимального діючого у цій конструкції моменту зі значенням близьким до 0,25.

Найменшу небезпеку представляє розвиток сценарію за схемою три з переходом до шарнірних опор. Майже рівне значення моменту в конструкції розташувалося в координатах 0,4 і 0,6, що дозволило знизити його максимальне значення. Так максимальний момент в цьому випадку виявився порядку 0,16 по модулю.

Таким чином, найбільш небезпечним варіантом, для розглянутої стержневої схеми, є руйнування за сценарієм, згідно з яким відбувається миттєве зникнення відразу двох зв'язків в одному з вузлів, без будь-яких проміжних етапів.

Література

- [1] Kwon M., Spacone E., Three-dimensional finite element analyses of reinforced concrete columns, *Computers and Structures*, Vol. 80, 2002, 199–212.
- [2] Meyer C., Roufaiel S. L., Arzoumanidis S. G., Analysis of damaged concrete frames for cyclic loads, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 11, No. 2, 1983, 207–228.
- [3] Артёмов, В. С., Стержневі будівельні конструкції: основні типи, класифікація, навантаження, Діагностика, довговічність та реконструкція мостів і будівельних конструкцій: збірник наук. праць, НАН України Фізико-механічний ін-т ім. Г. В. Карпенка, Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, Каменяр, Вип. 11, 2009.
- [4] Баженов В. А., Шишов О. В., Будівельна механіка. Електронний підручник, 2008: <http://www.knuba.edu.ua/ua/facultes/10/38>.
- [5] Бидерман В. Л., Теория механических колебаний, Москва, Высшая школа, 1980.

- [6] Божидарник В. В., Сулим Г. Т., Элементы теории пружности, Львів, Світ, 1994.
- [7] Болотин В. В., Статистическое моделирование в расчетах на сейсмостойкость, Строительная механика и расчет сооружений, № 1, 1981, 60–64.
- [8] Гусев А. С., Светлицкий В. А., Расчет конструкций при случайных воздействиях, Москва, Машиностроение, 1984.
- [9] Клаф Р., Пензиен Дж., Динамика сооружений, Москва, Стройиздат, 1979.
- [10] Николаенко Н. А., Ульянов С. В., Статистическая динамика машиностроительных конструкций, Москва, Машиностроение, 1977.
- [11] Распопов О. С., Русу С. П., Артьомов В. Є., Дослідження динамічної роботи металеві прогнаної будови моста під впливом рухомого навантаження, Проблеми механіки залізничного транспорту: Безпека руху, динаміка, міцність рухомого складу та енергозбереження: XII Міжнародна конференція, Мінтранс України. ДНУЖТ ім. академіка В. Лазаряна, Дніпропетровськ, ДНУЖТ, 2008.
- [12] Распопов О. С., Артьомов В. Є., Русу С. П., Удосконалення динамічних розрахунків стержневих систем на основі методів скінчених елементів та динаміки твердого тіла, Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту: тези доп. 70-й Міжнар. наук.-практ. конф., ДНУЗТ. Схід. наук. центр трансп. акад. України, Дніпропетровськ, ДПТ, 2010, 220–221.

к.т.н., доцент, Ілля Козачук
 e-mail: illyakozachuk@gmail.com

Козачук Ілля Святославович народився в 1981 році в місті Корець. В 2003 році закінчив Луцький державний технічний університет, здобув кваліфікацію магістра. В 2008 році захистив дисертацію на ступінь кандидата технічних наук.

Наукові інтереси: дослідження параметрів міцності та стійкості технічних конструкцій, математичне та комп'ютерне моделювання.



ABOUT THE CALCULATION OF BASIC CHARACTERISTICS OF ROD SYSTEMS

Abstract. *The paper presents the features of the calculation of basic characteristics of rod elements of construction under various schemes of their fixing. The algorithm of definition of the basic characteristics of rod elements is offered. Dynamic and static calculations were combined in this algorithm. Basic equations of dynamic bend of thin bars are used in calculations. Results of calculations are shown. The offered method can be used for the determining of parameters variation of the construction in similar tasks.*

Keywords: *dynamic calculation, rod construction, destruction scenario*

АКУСТИКО-ЕМІСІЙНА ОЦІНКА ЗМІНИ В'ЯЗКОСТІ РУЙНУВАННЯ РЕСОРНИХ СТАЛЕЙ ЗА ЧАС ЕКСПЛУАТУВАННЯ АВТОМОБІЛЯ

Олександр Сергійович Дубицький

Луцький національний технічний університет
Кафедра автомобілів і транспортних технологій

Анотація. У роботі викладено результати дослідження зміни міцнісних характеристик ресорної сталі корінного листа вантажного автомобіля за час її експлуатування. Показано, що завдяки особливостям структури матеріалу та технології виготовлення ресорна сталь змінює свої властивості за час експлуатування в незначних межах, а акустико-емісійна міра пошкодженості матеріалу зростає ще суттєвіше.

Ключові слова: ресора, акустична емісія

1. Вступ

У техніці широко застосовують принципи розрахунку деталей, що базуються на отриманих під час випробувань розтяганням характеристиках міцності та пластичності матеріалів. Дуже часто такі розрахунки не забезпечують достатньої надійності, внаслідок чого настає руйнування.

Для запобігання катастрофічному крихкому руйнуванню були розвинуті концепція температури в'язко-крихкого переходу та механіка руйнування. Остання виходить із положення про те, що в твердих тілах наявні тріщини, які можна розглядати як гострі надрізи. Під впливом зовнішнього навантаження у вершині тріщини створюється концентрація напружень і виникає багатовісний напружений стан. Внаслідок цього (особливо за низьких температур) може відбуватися крихке руйнування у конструкційному матеріалі, яке зумовлює передчасний вихід із ладу елементів конструкцій. Це в повній мірі стосується і ресор, а саме їх листів і, в першу чергу, кореневого.

З метою забезпечення надійності шляхом запобігання руйнуванню, в механіці руйнування введені параметри, які описують вплив напружень та розмірів тріщини на визначальні характеристики матеріалу: критичні значення силових, деформаційних чи енергетичних критеріїв. Це дає змогу визначати умови росту наявних у матеріалі тріщин, які розвиваються двома шляхами: стабільного росту, що відбувається за підвищення напружень у нетто-перерізі зразка, та нестабільного, який проходить без такого підвищення.

У даній статті досліджено зміну характеристик статичної тріщиностійкості матеріалів ресорного листа під впливом експлуатаційного чинника, а основні результати досліджень викладено у працях [8–10].

2. Стан проблеми

Ресора є пружним і направляючим елементом підвіски. Її використання полегшує збирання і ремонт машини. Ресора проста за конструкцією і в ремонті, але не позбавлена цілої низки суттєвих недоліків. До головних з них відносять: високе міжлистова тертя, здатне сильно погіршити плавність ходу на хорошій дорозі, а також велика матеріаломісткість у поєднанні з технологічною складністю під час виготовлення листів. У ресор можуть бути такі дефекти: руйнування листів, втрата пружності, зрізання центрального болта, зношення пальців і втулок у вушках ресор і кронштейнах, а також і самих кронштейнів під торцями вушок ресори.

Довговічність цього важливого вузла, обумовлена початковими напруженнями, складним напруженим станом, динамічною дією різноманітних циклічних навантажень, залишається невисокою. Порівняно з торсіонами і пружинами, ресора працює в менш сприятливих умовах; її втомна міцність в 4 рази менша, ніж у торсіона. В даний час за експлуатування в хороших дорожніх умовах (асфальтове покриття) довговічність ресор магістральних вантажівок становить 100–150 тис. км пробігу, але в поганих умовах (грунтові дороги, робота на будівництвах, в кар'єрах тощо) вона падає вдвічі і навіть доходить до 10–15 тис. км.

Робочими корозійними середовищами ресор є вологе повітря і вода. Саме вода, а також водні розчини солей, кислот і лугів створюють сильне електролітичне середовище. Поверхня сталі в електроліті виступає в ролі короткозамкнутого багатоелектродного гальванічного елемента, який складається із великої кількості таких мікроелементів [2]. Їх виникнення пов'язане із неоднорідностями металічної фази, що сформувалася внаслідок термічної і механічної обробки, плівок окислів та забруднення поверхні металу, і рідкої фази, що зумовлено різницею концентрацій як власних іонів металу в електроліті, так і іонів розчиненої речовини і газів. Електролітичні процеси сприяють адсорбції гідратованих іонів водню на катодних поверхнях сталі, де вони звільняються від молекул води. При цьому частина іонів розряджається і, молізуючись, виділяється у вигляді бульбашок газу у електроліт, частина у вигляді протонів H^+ проникає в кристалічну ґратку сталі. Тоді проходить низькотемпературне наводнення [6]. Під впливом деформації появляються додаткові умови, що сприяють протіканню всіх фізико-хімічних процесів, в тому числі і корозійно-дифузійних (пластична деформація сильно активізує вплив середовища на метал), а також спостерігається значне зниження опору деформуванню та руйнуванню – адсорбційний ефект зниження міцності (ефект Ребіндера) [7].

На рис. 1 показано зміну поверхні кореневого листа ресори автомобіля ГАЗ-53А, який експлуатували протягом 4 років, а також вигляд піттингових тріщин, що виникають під впливом контактної взаємодії

(тертя) за наявності корозивного середовища. Як бачимо, поверхня кореневого листа перед експлуатацією не має поверхневих тріщин і є відносно гладкою (рис. 1а), а за час експлуатування внаслідок дії корозивно-механічного чинника вона зазнала суттєвих змін. Появилися корозивні каверни, закриті продуктами корозії, між якими гострі тонкі перемички (рис. 1б). У впадинах видно втомні мікротріщини, які проросли у тіло ресорного листа, що має трооститну структуру, як і у матеріалі вихідного стану. Такий поверхневий рельєф сприяє інтенсивному її окрихченню (зокрема і наводненню), а відтак і зародженню згаданих зародків втомного руйнування, які надалі зливаючись утворюють поверхневі макротріщини.

На рис. 1в, г показано мікрошліф зародження пітингової мікротріщини з корозивної каверни.

Таким чином, експлуатація автомобіля за дії різного навантаження, середовища, температури тощо сприяє інтенсивному деградуванню поверхні ресорного листа, що полегшує зародження найнебезпечнішого з точки зору його міцності дефекта – втомної макротріщини.

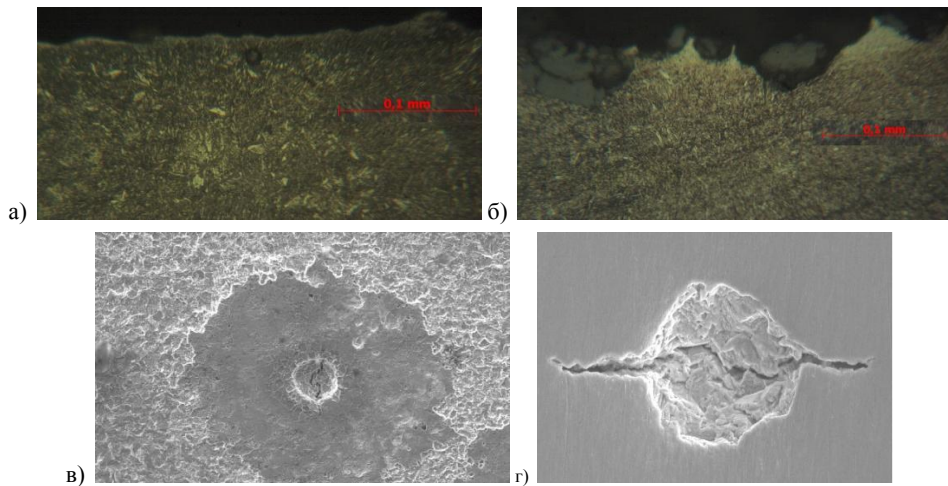


Рис. 1. Поверхня вихідного (а) та напрацьованого (б) матеріалу ресори зі сталі 50ХГ, а також пітингова тріщина у корозивній каверні (в) та її детальний вигляд (г) [1]

Дуже небезпечними з точки зору міцності є наявні на поверхні ресор ультрамікротріщини, які стають центрами зародження і розвитку мікротріщин, що мають форму клиноподібних дефектів. Рідке середовище проникає в середину цих тріщин під впливом капілярного тиску, а іони водню із високими швидкостями мігрують далі всередину тріщин по їх стінках. Причому швидкість такого проникання значно вища, ніж швидкість поступання рідкого середовища. При досягненні в локальних зонах максимальних розтягуючих напружень у вершині тріщини водень швидко дифундує туди і знижує міцність матеріалу [4, 14].

Корозія в процесі експлуатації автомобіля значно ослабляє ефект поверхневого зміцнення який проводять під час виготовлення ресорних листів.

3. Підготовка зразків до випробувань

Перед початком виготовлення зразків перевірили спектральним аналізом на скануючому мікроскопі KAMSCAN-4DV хімічний склад сталі. Він виявився відповідним до приведеного у літературних джерелах.

В експериментах визначали зміну механічних властивостей сталі 50ХГ під впливом експлуатаційних навантажень і порівнювали отримані результати з аналогічними характеристиками вихідного матеріалу та відпаленого.

Зразки для випробувань виготовляли за такою схемою. Кореневі листи (не експлуатований та експлуатований) ресори автомобіля ГАЗ-53 розрізали вздовж на дві частини та в поперек на 14 частин. Отримані заготовки відповідною механічною обробкою доводили до необхідних геометричних розмірів і чистоти поверхні. На торцевій поверхні окремих зразків були зроблені шліфи, за якими методами металографічних досліджень, що виконані з допомогою металографічного мікроскопа NU-2, отримували інформацію про структурні особливості металу у перерізі ресорного листа. Його структурною складовою до і після експлуатування є троостит (рис. 2а), а на поверхні тонкий наклепаний шар зі стрічковою структурою дещо витягнутих зерен фериту і перліту.

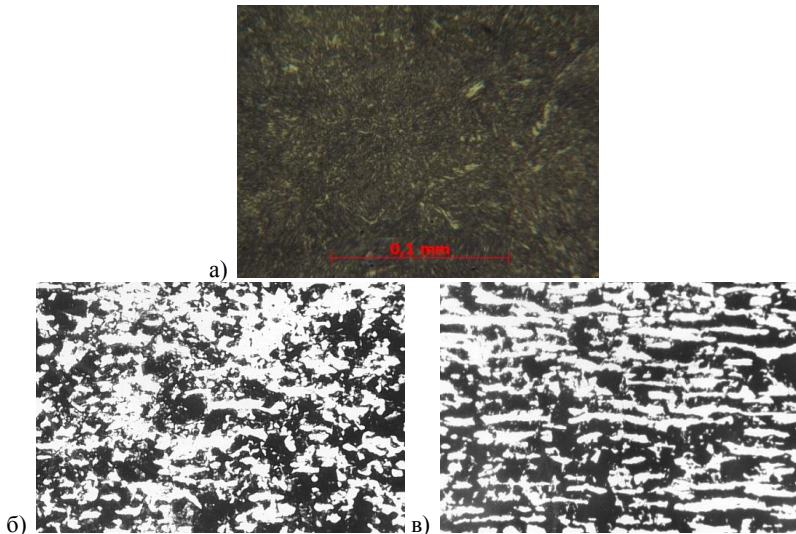


Рис. 2. Структура зерен сталі 50ХГ всередині листа у вихідному стані та нап'яченого (а), а також середини листа (б) та його верхніх шарів після відпалу

Також встановлено, що структура сталі 50ХГ є типовою структурою трооститу (рис. 2а), а після рекристалізаційного відпалу вона є неоднорідною сумішшю дрібних феритних і грубих перлітних рівновісних зерен розміром близько 30 мкм (рис. 2б, в). На порядок дрібніші зерна фериту оточують перлітні зерна несучільними, перерваними ланцюжками. Проте подекуди, найчастіше в глибині листа, спостерігаються текстуровані ділянки, в яких феритні і перлітні зерна не рівновісні.

Вони витягнуті впоперек ресорного листа. Ці ділянки свідчать про наявність попередньої стрічковості структури прокату, з якого виготовлено ресорний лист. Витримка за температури аустенізації під час відпалу не усуває стрічковості [6, 10]. Очевидно остання виникає через забруднення ресорної сталі неметалічними сульфідами, а також внаслідок ліквідації фосфору.

Для отримання точніших даних механічних характеристик, використовували метод акустичної емісії (АЕ) за методикою, що описана в працях [5, 6, 10].

Виготовляли зразки із геометрією, що показана на рис. 3. Місце для встановлення первинного перетворювача АЕ, а також зону робочої частини зразка додатково шліфували і полірували.

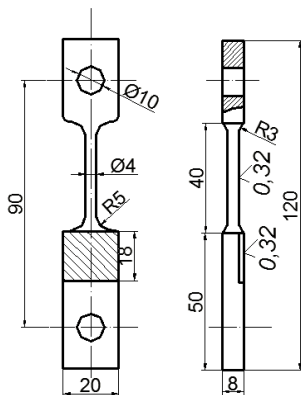


Рис. 3. Зразки для випробувань (заштрихована зона – місце становлення первинних перетворювачів акустичної емісії (ПАЕ))

4. Методика випробувань

Для експериментального визначення характеристик тріщиностійкості (в'язкості руйнування) потрібно вибрати раціональну форму та розміри зразка, створити штучну втомну тріщину, забезпечити необхідну точність реєстрації навантаження та інших величин для побудови діаграми руйнування. Після цього зразок із заздалегідь виведеною втомною тріщиною руйнують і записують необхідну інформацію.

Оскільки деякі характеристики, що визначають із експерименту і описують тріщиностійкість металевих сплавів, залежать від форми та розмірів зразка, то щоб співставити отримані результати із аналогічними літературними даними, такі дослідження повинні проводитися в рамках єдиної уніфікованої методики. Вона регламентована у [15] і поєднує відповідні стандарти провідних країн світу. Тому розміри зразків, їх форму, розрахунки необхідних силових і інших показників тощо проведено у відповідності із вимогами цього документа. У кінцевому результаті, з урахуванням реальної геометрії кореневого листа ресори, отримали призматичні зразки з розмірами: товщина – 8, ширина – 10, довжина – 150 мм (рис. 4). Інформацію про матеріал ресорного кореневого листа, схему вирізки зразків, хімічний склад матеріалу та термін його експлуатування детальніше приведено у праці [10].

Втомну тріщину у зразках із ресорної сталі виводили циклічним навантаженням. Для цього, з урахуванням раніше отриманих нами даних [10], задавали значення напружень у циклі за залежністю $\sigma_{CO} \leq 0,5\sigma_{02}$, де σ_{CO} – максимальне напруження на кінцевому етапі виведення втомної тріщини. При цьому дотримувалися вимог про те, що число циклів для створення втомної тріщини не повинно бути меншим від 5×10^4 . Дотримання цих вимог дало змогу вивести втомну тріщину із гострою вершиною, що дозволило отримати коректні дані про статичну тріщиностійкість матеріалу.

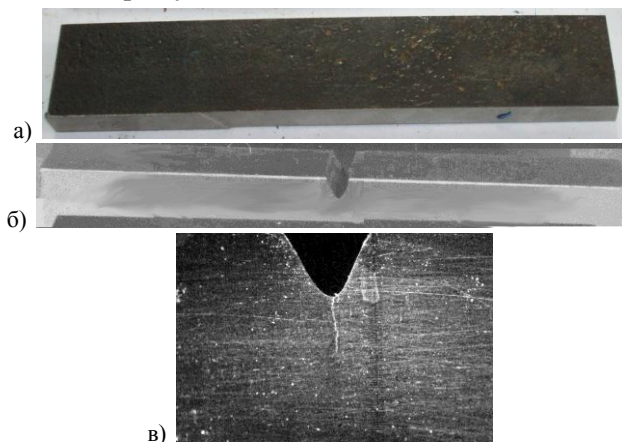


Рис. 4. Видяг заготовки для виготовлення зразків (а), зразка з нанесеним концентратором напружень (б) та виведеної у ньому втомної тріщини (в) з вершини концентратора

Із урахуванням викладеного вище, виводили втомні тріщини на установці МЦ-1, яка оснащена електронними засобами для вимірювання зусиль та деформацій і забезпечує можливість вибору необхідних параметрів навантаження чи деформування [13].

Показники виведення втомних тріщин на зразках, що використовувалися нами в експериментальних дослідженнях подані у табл. 1.

Таблиця 1. Показники виведення втомних тріщин для випробувань зразків ресорної сталі на статичну тріщиностійкість

Група зразків	1	2
Радіус концентратора ρ , мм	0,165	0,165
Довжина тріщини l , мм	3,53	3,92
Кількість циклів навантаження, N	69130	51610
Коефіцієнт асиметрії циклу R	0,18	0,19
Кінцеве напруження циклу σ_{\max} , МПа	320	270
Швидкість росту тріщини на кінцевому етапі виведення $v \times 10^{-8}$, м/цикл.	5,88	7,63

Примітка: зразки групи 1 – вихідний матеріал ресорного листа (не напрацьований), 2 – напрацьований протягом 4 років експлуатації.

Отже, під час виведення втомних тріщин режими навантаження відповідають вимогам стандарту [15].

На рис. 5 приведено структурну схему АЕ-досліджень статичної тріщиностійкості зразків із матеріалів кореневого листа ресор різного ступеню деградованості.

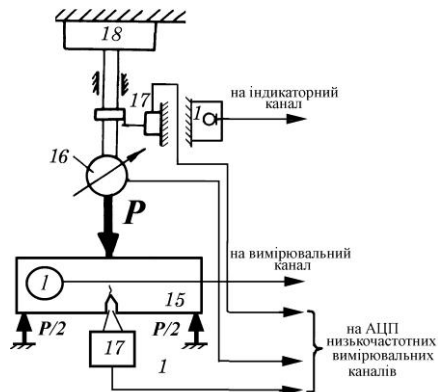


Рис. 5. Структурна схема випробувань зразків ресорної сталі

Записували також зусилля навантаження P , переміщення індентора f та розкриття берегів тріщини v у реальному масштабі часу. Навантаження здійснювали за допомогою установки типу СВР-5 [16].

Необхідно підкреслити, що з метою максимального усунення впливу завад та випадкових сигналів АЕ, які можуть генеруватися від опор та індентора під час випробувань, зразки перед їх початком зашунтовували. Після цього навантажували до величини, що переважає рівень його ймовірного максимального значення на 25%, за методикою, описаною у працях [3, 12]. Після цього, знявши шунт, проводили випробування

досліджуваних зразків із швидкістю навантаження, регламентованою вимогами [15], паралельно проводячи запис діаграми $P - v$ та параметрів сигналів АЕ. Всі випробування здійснювали із використанням відомої методики залучення паралельного каналу АЕ (канал II на рис. 5) [17].

5. Результати досліджень та їх обговорення

Як показали експерименти, кожна група зразків мала свої різні характеристики тріщиностійкості та особливості випромінювання пружних хвиль АЕ під час докритичного розвитку макротріщини. На рис. 6 показано типову діаграму руйнування, записану в координатах $P - v$ та розподіл сигналів АЕ, що детектувалася в часовому інтервалі 0,5 мс під час її запису синхронно з ходом навантаження.

Маючи діаграми руйнування та відповідні їм акустограми, за відомою [15] формулою

$$K_{IQ} = (P_Q \times L \times Y_4) / (t \times b \sqrt{b}) \quad (1)$$

визначали K_{IC} , де P_Q – навантаження, що отримують за 5% січною, L – відстань між опорами зразка, Y_4 – поправкова функція, що ураховує співвідношення довжини тріщини l до висоти зразка b , t – товщина зразка. Значення Y_4 шукали за відомою залежністю:

$$Y_4 = 1,555[1 - 5,456(l/b)] \quad (2)$$

Після цього за запропонованою вище методикою, маючи значення P_S , яке встановлювали за акустограмою, як показано на рис. 6, визначали величину K_{IS} за співвідношеннями (1) та (2).

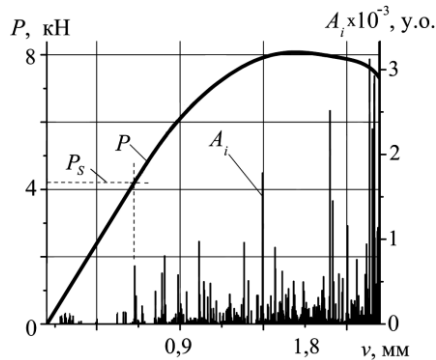


Рис. 6. Характерна діаграма руйнування $P - v$, зразків ненапруженого матеріалу, суміщена із акустограмою випробувань

На базі випробувань 5 зразків кожної групи нами отримані такі статистично усереднені результати експериментів: для зразків першої групи $K_{IC} = 93,12 \text{ МПа} \sqrt{\text{м}}$, $K_{IS} = 78,3 \text{ МПа} \sqrt{\text{м}}$, для зразків другої групи $K_{IC} = 81,13 \text{ МПа} \sqrt{\text{м}}$, $K_{IS} = 62,42 \text{ МПа} \sqrt{\text{м}}$.

6. Висновки

Експлуатація ресори вантажного автомобіля протягом 4 років в технологічному режимі перевезення вантажів в умовах впливу нерівностей дорожнього покриття, перепаду температур, робочого середовища та інших чинників, призвела до пониження характеристик статичної тріщиностійкості, визначеної як за стандартною методикою 5%-січної, так і за параметрами сигналів АЕ. Як показали результати досліджень, під впливом названих вище фізико-механічних чинників, статична в'язкість руйнування ресорного кореневого листа зменшилась в середньому на 15% для K_{IC} і на 20% для K_{IS} .

Література

- [1] Elboujdaini M., Initiation of environmentally assisted cracking in line pipe steel: 16th European on Fracture (ECF16th), Dordrecht, Springer, 2006, 1007–1008.
- [2] Карпенко Г. В., Прочность стали в коррозионной среде, Москва-Киев, Машгиз, 1963.
- [3] Назарчук З. Т., Акустико-емісійне діагностування елементів конструкцій: науково-технічний посібник, т. 3, Київ, Наук. думка, 2009.
- [4] Панасюк В. В., Андрейкив А. Е., Харин В. С., Теоретический анализ роста трещин в металлах при воздействии водорода, Физ.- хим. механика матер., № 4, 1981, 61–75.
- [5] Пичков С. М., Исследование деформирования образцов с выточками методом акустической эмисии, Физико–хим. механика материалов, № 3, 1980, 120–122.
- [6] Скальський В. Р., Акустично-емісійне дослідження чутливості до водневої деградації ресорної сталі, Фіз.-хім. механіка матеріалів, № 4, 1999, 113–119.
- [7] Скальський В. Р., Влияние водорода на растрескивание металлов и контроль таких процессов методом АЭ, Технич. диагностика и неразруш. контроль., № 1, 1995, 52–65.
- [8] Скальський В. Р., Діагностування механізмів руйнування сталі 38ХНЗМФА за вейвлет-перетворенням сигналів акустичної емісії, Техническая диагностика і неразрушающий контроль., № 3, 2011, 12–17.
- [9] Скальський В. Р., Вплив пластичної деформації конструкційної низьковуглецевої сталі на параметри сигналів магнето пружної акустичної емісії, Наукові нотатки. Міжвузівський збірник (за напрямом «Інженерна механіка»), Випуск 31, 2011, 354–358.
- [10] Скальський В. Р., Вплив тривалих експлуатаційних навантажень на зміну механічних характеристик ресорної сталі, Наукові нотатки. Міжвузівський збірник (за напрямом «Інженерна механіка»), Випуск 33, 2011, 220–226.
- [11] Скальський В. Р., Методика оцінки статичної тріщиностійкості, Технологічні комплекси, 1, 2 (5, 6), 2012, 169–175.
- [12] Скальський В. Р., Акустична емісія під час руйнування матеріалів, виробів і конструкцій. Методологічні аспекти відбору та обробки інформації, Львів, Сполом, 2005.

- [13] Скальський В. Р., Толопоко Я. Д., Великий П. П., Галан П. Я., Лясота І. М., Установа для дослідження втомного руйнування методом акустичної емісії, Фізичні методи та засоби контролю середовищ матеріалів та виробів (серія), Неруйнівний контроль матеріалів і конструкцій, вип. 14, 2009, 43–49.
- [14] Фишгойт А. В., Колачев Б. А., Распространение трещины в наводороженном металле при плоской деформации, № 4, 1981, 76–81.
- [15] ГОСТ 25.506–85. Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний металлов. Определение характеристик трещино-стойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении. Введ. в действие 27.03.1985 г., Москва, Изд. стандартов, 1985.
- [16] Скальський В. Р., Клим Б. П., Галан П. Я., Матвіїв Ю. Я., Лясота І. М., Універсальна малагабаритна навантажувальна установка для випробувань зразків конструкційних матеріалів, Патент України на корисну модель №55217. МПК (2009): G01N3/00; G01N3/20, Опубл. 10.12.2010р., Бюл. № 23.
- [17] Андрейків О. Є., Скальський В. Р., Лисак М. В., Спосіб контролю росту тріщин у зразках матеріалів, Патент України № 2914, МПК: G01N29/14, Опубл. 26.12.94р., Бюл. 5.

к.т.н. Олександр Сергійович Дубицький
e-mail: dubytskyi.olexandr@yandex.ua

Кандидат технічних наук, старший викладач кафедри автомобілів та транспортних технологій, Луцького національного технічного університету.

Олександр Сергійович Дубицький, кандидат технічних наук, старший викладач кафедри автомобілів та транспортних технологій, Луцького національного технічного університету. Сфера наукових інтересів - механіки деформівного твердого тіла, розробка методик оцінки зародження і розвитку руйнування силових елементів шасі автомобіля. Автор близько 20 наукових праць.



ACOUSTIC EMISSION ESTIMATION OF THE CHANGES OF SPRING STEEL FRACTURE TOUGHNESS DURING VEHICLE EXPLOITATION

Abstract. *The results of a study of changes in the strength characteristics of spring steel of truck main spring leaf during its exploitation are presented in the article. It is shown that due to the particular structure of the material and technology of production spring steel changes its properties during its exploitation in small limits. Acoustic emission measure of material damage increases even more significantly.*

Keywords: *spring, acoustic emissions*

**PL-NTU TRANSGRANICZNA WYMIANA
DOŚWIADCZEŃ
(w języku polskim)**

WYKORZYSTANIE FRAKTALI DO PROJEKTOWANIA OTOCZENIA

Siergiej Homyk

Łucki Narodowy Uniwersytet Techniczny
Wydział Projektowania

***Streszczenie.** W artykule przeanalizowane zostało wykorzystanie samopodobieństwa, w postaci fraktali, do projektowania otoczenia za pomocą grafiki komputerowej. Podano przykłady praktycznego zastosowania fraktali w różnych typach projektowania, w tym również architektonicznego.*

***Słowa kluczowe:** fraktale, samopodobieństwo, grafika fraktalna*

1. Wprowadzenie

W XXI wieku – w epoce globalizacji, istnienia w złożonej przestrzeni wielowymiarowej, powstaje potrzeba określenia kierunku projektowania oraz jego rozwoju. Wewnętrzna logika i zmysł formowania miejsca życia wymagają użycia geometrii fraktalnej, jaka daje wyobrażenie istoty konstrukcji jako pojedynczego organizmu i pozwala podkreślić jego niepowtarzalne indywidualne cechy, rozwijać je i interpretować na nowo. Aby zrozumieć wzorce i trendy współczesnej architektury oraz tendencje jej integracji z projektowaniem wnętrz konieczne jest wykorzystywanie w procesie projektowania własnych struktur fraktalnych, a nie tylko po prostu fraktali.

2. Omówienie materiału podstawowego

Celem pracy jest analiza zastosowania samopodobieństwa w postaci fraktali w projektowaniu otoczenia za pomocą grafiki komputerowej.

2.1. Pojęcie fraktala i historia jego wprowadzenia

Praca naukowa B. Mandelbrota o geometrii fraktalnej wywołała dużą ilość prac naukowych na temat wzajemnych związków fraktali z nauką i sztuką, z których najbardziej przybliżona do rozwiązywania zadań estetyki technicznej jest praca I. Ewina.

Zastosowanie fraktali w rozwiązywaniu zadań projektowania miast i modelowaniu architektonicznych konstrukcji rozpoczęło się pod koniec XX wieku. Próby przeanalizowania fraktalności obiektów sztuki, architektury i projektowania ograniczają się zwykle do analizy albo architektury, albo sztuki. Problematyka grafiki komputerowej praktycznie nie jest poruszana. Projektowanie wnętrz, w szczególności syntetyzowane i takie, które ma skomplikowany wyraz przestrzenny w porównaniu z projektowaniem graficznym, pozostaje niezbadany w kontekście ogólnie rozumianych fraktali.

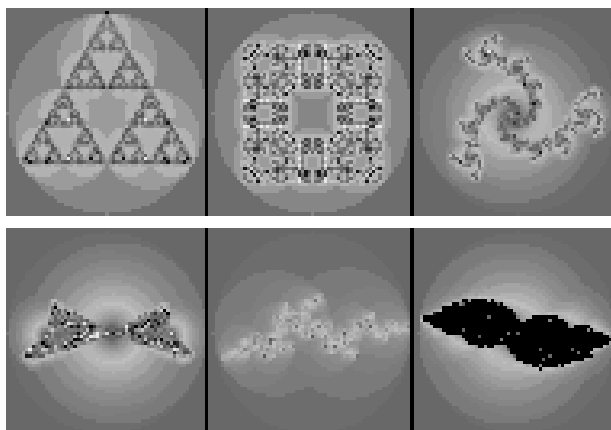
Szczegółowe badania i praktyczne zastosowanie fraktali jest dość interesującym obszarem harmonijnego modelowania otoczenia. W celu rozwiązania zadań projektowania stosuje się grafikę komputerową, która obejmuje metody i narzędzia do tworzenia i przetwarzania obrazu przy użyciu zestawów sprzętowo-programowych. W zależności od sposobu opisanego i kształtowania obrazu różniamy grafikę rastrową, wektorową oraz fraktalną. Wśród obrazów utworzonych za pomocą grafiki komputerowej, fraktale zajmują szczególne miejsce ze względu na osobliwe piękno i specyficzną strukturę.

Matematyczna analiza budowy fraktali, charakterystyka ich kompozycyjnych właściwości, ustalenie korelacji między właściwościami i matematycznym podejściem pomogą w rozwiązywaniu zadań projektowania.

Wiele procesów w przyrodzie i społeczeństwie, od kosmicznych po społeczne i fizjologiczne, charakteryzują się chaotyczną fraktalną dynamiką. Fraktalność obiektów przyrodniczych potwierdza możliwość komputerowego budowania wiarygodnych krajobrazów wirtualnego świata za pomocą nieskomplikowanych fraktalnych programów.

Grafika fraktalna, jak i wektorowa, oparta jest o obliczenia matematyczne. Podstawowym elementem grafiki fraktalnej jest formuła, za pomocą której można zbudować najprostsze regularne struktury oraz skomplikowane ilustracje, które są imitacją krajobrazów i trójwymiarowych obiektów.

W matematyce nie istnieje konkretna definicja fraktali, ale pojęcie "fraktal" jest interpretowane jako zbiór, którego części są podobne do całości. Ścisłą definicję samopodobnego zbioru zaproponował J. Hutchinson w jego klasycznej pracy z 1981. J. Hutchinson nazwał zbiór samopodobnym (rys. 1) jeśli składa się z kilku elementów podobnych do F (tzn. elementy, które otrzymujemy w procesie rotacji, kompresji i odbicia zbioru F). Należy od razu zauważyć, że definicja zbioru podana przez Hutchinsona jest nieco skomplikowana, ale przy tym coraz częściej wykorzystywana w nowoczesnych podejściach matematycznych.



Rys. 1. Przykład zbiorów samopodobnych

2.2. Wykorzystanie samopodobieństwa fraktalnego w projektowaniu ukraińskich wnętrz

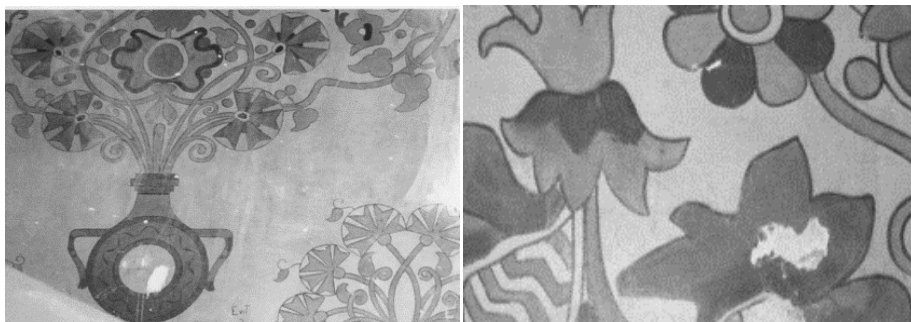
Malunki ścian ukraińskich ludowych mieszkań, dekoracje wnętrz pomieszczeń z elementami sztuki dekoracyjnej, a mianowicie haftami i ceramiki, wykorzystują samopodobne elementy fraktalne. Do dekorowania mebli (np. skrzyń) wykorzystuje wzory chmur i liści drzew, które są samopodobnymi fraktalami.

Historyczne elementy wykorzystujące samopodobieństwo fraktalne w projektowaniu wnętrz są przedstawiane na rys. 2, a mianowicie dekor wnętrza Soboru Mądrości Bożej oraz ścian przy ul. Mironowicza w Kijowie, wykonany przez znanych artystów ukraińskich na początku XX wieku.

Dekor wnętrza Sobór Mądrości Bożej w Kijowie



M. Samokysz, S. Wasilkowski, ul. Mironowicza w Kijowie, 1911 r.



Rys. 2. Historyczne wykorzystanie samopodobieństwa fraktalnego na przykładzie ukraińskich dekoracji wnętrz

Za współczesne ukraińskie wnętrza uważać będziemy te z ostatnich dwudziestu lat – lat niepodległości państwa. Na przykład, patrząc na projekt restauracji stworzony przez Lehara można zauważyć samopodobne elementy wodorostów świata podwodnego (zasłony w aranżacji wnętrz) oraz samopodobne elementy ze świata roślin, szczególnie rozkwit, co jest widoczne w kutykach elementach mostu i lampy.

Nawet w pracach wykonanych w stylu minimalizmu możemy zobaczyć elementy fraktalne, na przykład w stylizacji S. Oleksijenka i M. Małomuż płaszczyna nad łóżkiem (rys. 3) oraz dekoracyjny parawan (rys. 4).



Rys. 3. Stepan Oleksijenko, Maryna Małomuż – mieszkanie 2008 r. – płaszczyna nad łóżkiem



Rys. 4. Wykorzystanie samopodobieństwa w postaci fraktalu w nowoczesnym ukraińskim dekorze – dekoracyjny parawan

Historycznie samopodobieństwo było stosowane w projektowaniu i dekorowaniu wnętrz ukraińskich mieszkań ludowych wykonanych w stylu barokowym i modernistycznym. Samopodobieństwo jest najwyraźniej reprezentowane we współczesnej aranżacji wnętrz w pracach ukraińskich artystów epoki postimpresjonizmu.

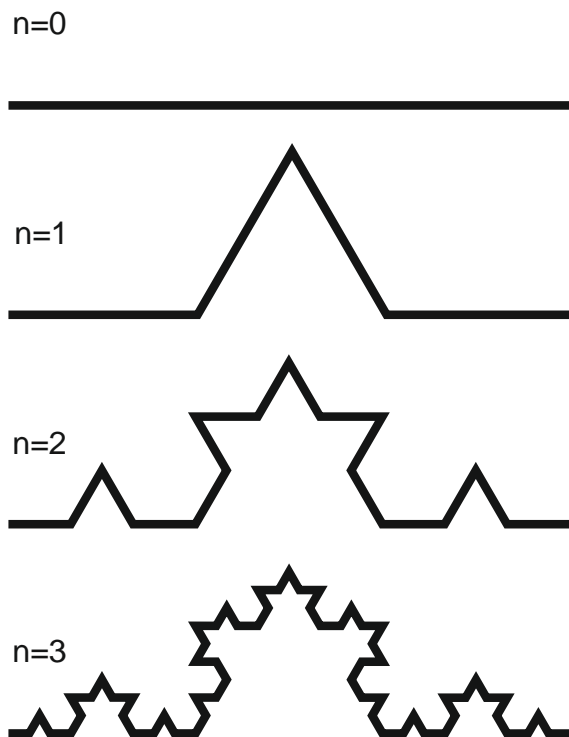
2.3. Sposoby kształtowania fraktali

Jednym z efektywnych sposobów opisanie struktur fraktalnych jest funkcja rekurencyjna, która za argument ma samą siebie:

$$f(x), f(f(x)), f(f(f(x))), \dots \quad (1)$$

Fraktale opisywane są algorytmami, które za pomocą komputera przekształcane są w geometryczne obrazy.

Fraktal tworzy się z powtarzających się wyjściowych struktur wyznaczonych zgodnie z algorytmem, to znaczy, mała część fraktala zawiera informacje o pozostałej całości. Najprostszym przykładem tworzenia fraktala jest krzywa Kocha pokazana na rys. 5 (rodzaj geometrycznych fraktali).



Rys. 5. Krzywa Kocha

Dla każdego kroku algorytmu, każdy z odcinków krzywej zastępuje się zębkiem odpowiedniej wielkości. Wskutek nieskończonej ilości powtórzeń tego procesu tworzy się fraktal geometryczny.

Innym sposobem generowania fraktali jest tworzenie ich za pomocą L-systemu (systemu Lindenmayera).

L-system – gramatyka formalna pewnego języka (raczej łatwego), która opisuje symbol i transformacje na nim wykonywane. W ten sposób, przy użyciu różnych poleceń (takich jak rotacja o dany kąt, zamiana, przesunięcie o określoną odległość) można tworzyć różne obrazy. Zestaw poleceń L-systemu może być rozszerzony do nieskończoności, osiągając imponujące rezultaty.

Zasady są następujące: każdy symbol początkowy odczytuje się i zastępuje się wyrazem o określonych zasadach zamiany (jeśli jest określone). W ten sposób uzyskujemy nową linię symboli, z którą wykonujemy te same czynności. Krok po kroku rekurencyjnie pojawia się dłuższa linia, dlatego ilość kroków zazwyczaj jest ograniczona.

Przeanalizujemy przykład działania L-systemu.

Możemy wprowadzić następującą definicję:

"f" – rysunek odcinka o określonej długości

"+" – obrót o dodatni kąt,

"-" – obrót o ujemny kąt,

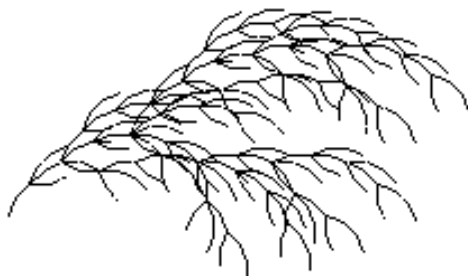
"[" – umieścić obiekt na stosie,

"]" – pobierz obiekt ze stosu.

Przeanalizujemy realizację następnego systemu:

- inicjator: F,
- kąt obrotu: $\pi/8$,
- zasada transformacji: $-F+F+[+F-F-]-[-F+F+F]$.

Wygląd systemu za pomocą kilku iteracji (rys. 6).



Rys. 6. Wzór L-systemu

2.4. Praktyczne zastosowanie fraktali

Jednym z obiecujących obszarów wykorzystania fraktali w postaci obrazu jest produkcja tkanin, tapet, tekstury do dekorowania wnętrz, czcionki, ramki i inne produkty z powtarzającym się wzorem. W czasach szybkiego rozwoju technologicznego i procesów przemysłowych głównym zadaniem w produkcji tego rodzaju produktu jest udoskonalenie metod tworzenia obrazów oraz polepszenie ich jakości. Podpatrując dzieła natury, można stworzyć bardziej skuteczną pracę projektantów i artystów, mając nieskończoną liczbę wzorów.

Obecnie przy produkcji wzorów tekstylnych nanosi się "ręczny wzór": używa się przezroczystej folii, na której wykonywany jest rysunek tuszem. Następnie jedwabna tkanina jest obrabiana polimerem, nakłada się warstwę ze wzorem i prześwietla się promieniem ultrafioletowym. W ten sposób, powstaje kształt, przez który farba jest nakładana na tkaninę. Proces ten jest uproszczony, gdy wzór tworzony jest przez komputer (rys. 7).



Rys. 7. Przykład wzorów dla tkanin lub tapet

Nie trzeba wymyślać nowych rodzajów obrazów – fraktale stworzą je same, można je tylko edytować. Następnie wywołać zdjęcia, które są zmodelowane (z dokładnością do 0,01 mm) oddzielnie dla czerwonego, zielonego i niebieskiego koloru (tzw. paleta barw RGB). Dalej odpowiednio tworzą się formy, przez które nanosi się rysunek.

Zaletą proponowanej metody w porównaniu z tradycyjnymi jest zmniejszenie zasobów ludzkich i maszynowych oraz polepszenie jakości barwienia tkanin. Metoda ta jest obiecującą dla zwiększenia wydajności produkcji oraz dalszych udoskonaleń naukowo-praktycznych.

Oprócz badań fraktali w projektowaniu i sztuce, wykorzystuje się je w teorii informacji do kompresji danych graficznych (głównie wykorzystuje się właściwość samopodobieństwa fraktali – dla tego, żeby zapamiętać mały wycinek obrazu i przekształcenie za pomocą których można otrzymać inne wycinki, potrzeba znacznie mniej pamięci niż dla zapamiętania całego pliku).

Jeśli w formule, która generuje fraktale, dodać losowe odchylenia można uzyskać fraktale stochastyczne, które bardzo wiarygodnie odzwierciedlają prawdziwe obiekty – elementy krajobrazów, wody powierzchniowe, kielki roślin. Właściwości te są z powodzeniem stosowane w fizyce, geografii i grafice kom-

puterowej w celu osiągnięcia większego podobieństwa modelowanych obiektów do rzeczywistych pierwowzorów.

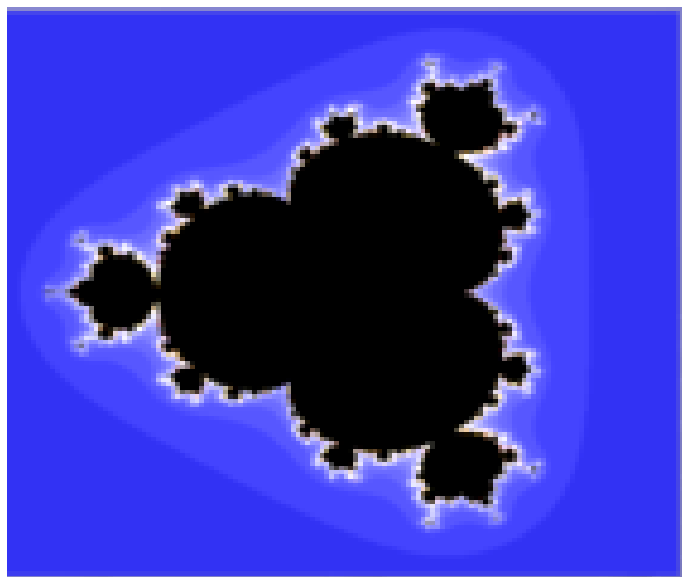
Istnieją systemy adresowania w sieciach komputerowych, które wykorzystują zasady kompresji fraktalnej informacji do tworzenia zdecentralizowanych, a więc najbardziej niezawodnych sieci.

3. Perspektywa dalszych badań

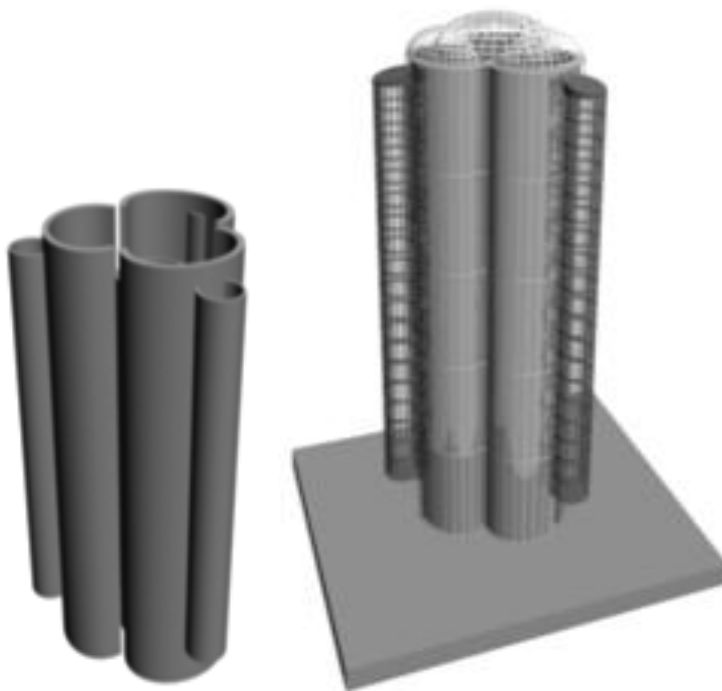
Fraktale – to geometria natury, dlatego mogą być one skutecznie wykorzystywane w architekturze.

Wiadomo, że różne formy mają różny wpływ na ludzką świadomość i podświadomość, zmieniając jej nastrój i samopoczucie. Badając, jaką energię niesie ta czy inna forma, jej wpływ na organizm, można stworzyć nową generację architektury, która będzie pozytywnie wpływać nie tylko na ludzi, ale także na środowisko.

Na przykład, używając jako podstawy słynnego fraktala Mandelbrota z pierwszym cyklem iteracji (rys. 8a) i opracowując go metodami grafiki komputerowej, można uzyskać elementy, które dalej będą szablonami wykorzystywanymi w konstrukcjach architektonicznych z fraktalnym rozmieszczeniem wewnątrz (rys. 8b). Poprzez obrót fraktali wokół osi otrzymuje się ekspozycyjne centrum z wewnętrzną panoramą, która pozwala obejrzeć całą wystawę jednocześnie.



Rys. 8a. Fraktal Mandelbrota



Rys. 8b. Makieta budowli architektonicznej z fraktalnym rozmieszczeniem pomieszczeń wewnętrznych

Budynki zbudowane według takich projektów są harmonijne, a ludzie, którzy będą znajdować się wewnątrz tych budynków odczuwają pozytywny wpływ energii. Jednak te stwierdzenia wymagają bardziej szczegółowej analizy. Wcześniejsze badania przywołują do następujących wniosków:

- naturalne obiekty są przeważnie fraktalami,
- podstawy fraktali w projektowaniu zapoczątkowano przez architektów w okresie prehistorycznym,
- grafika fraktalna – rodzaj sztuki podobnej do sztuki abstrakcyjnej,
- zasady fraktalnego kształtowania w architekturze są stosowane od czasów starożytnych, ale dopiero pod koniec dwudziestego wieku wykorzystanie algorytmów fraktalnych w morfogenezie architektonicznej uzyskało istotne znaczenie.

Za pomocą fraktali można łatwiej opisać niestabilne systemy i procesy niż przy użyciu tradycyjnych narzędzi matematyki lub fizyki, a co najważniejsze, przewidywać zachowania obiektów.

Sama natura dostarcza odpowiedzi na wszystkie pytania, które są trudne do rozwiązania i wyjaśnienia. Być może geometria fraktalna to "okulary", przez które ludzie mogą zobaczyć istotę natury.

Literatura

- [1] Visnyk Kharkivs'koyi derzhavnoyi akademiyi dyzaynu i mystetstv, Kharkiv, Nr 7, 2011, 26–32.
- [2] Dyakyv V. A., Matkovskyy O. Y., Ontohenycheskye zakonomernosti yzmenenyya fraktal'noy razmernosti kholesternovykh dendrytov v zhelchnykh kamnyakh, Zakonomernosti évolýutsyy zemnoy kory: Tez. dokl. mezhdunar. konf. T.2, Sankt-Peterburh, 1996.
- [3] Evyn Y. A., Synerhetyka moz'ha y synerhetyka yskusstva, Moskva, HEOS, 2001.
- [4] Mandel'brot B., Fraktal'naya heometryya pryrody, Moskva, Yn-t kompyuternykh yssled., 2002.
- [5] Fomenko O., Chechel'nytskyy S., Metody fraktal'noy heometryy v pryomenenyy k yssledovanyyu harmonyy v arkhitekture. Tradytsiyi ta novatsiyi u vyshchiy arkhitekturno-khudozhniy osviti. Zb. nauk. prats'., Kharkiv, Vyp. 1, 2, 3, 2008, 257–260.

mgr Siergiej Homyk
e-mail: Homas@ukr.net

Asystent Wydziału Projektowania Łuckiego Narodowego Uniwersytetu Technicznego.

Pracuje nad rozprawą doktorancką o tematyce „Geometria fraktalna oraz jej wykorzystanie w architekturze i projektowaniu”.



USING ELEMENT OF FRACTALITY AT MODELING DESIGN ENVIRONMENT

Abstract. *The article examines the use of self similarity as element fractal in computer modeling of design environment. Examples of practical application of fractals in different types design, including – and architecturally.*

Keywords: *fractals, self-similarity, fractal graphics*

BADANIE POKRYĆ ŻELBETOWYCH

Siergiej Uzhegov

Łucki Narodowy Uniwersytet Techniczny

Katedra Inżynierii Lądowej

***Streszczenie.** Artykuł przedstawia obliczenia pokryć żelbetowych w postaci paraboloidy hiperbolicznej, o rzucie prostokątnym, modelowanie jej konstrukcji w celu przeprowadzenia badania eksperymentalnego.*

***Słowa kluczowe:** żelbet, powłoka, paraboloida hiperboliczna, model*

1. Wstęp

Żelbetonowe konstrukcje stosowane są w elementach domów i innych konstrukcji, w których ważne jest, aby zmniejszyć ciężar elementów, ograniczyć pęknięcia, zwiększyć odporność betonu na zawilgocenia. Charakterystycznymi właściwościami konstrukcji żelbetowych jest ich rozproszone zbrojenie, cienkościennosc i redukcja warstwy ochronnej betonu. Charakteryzują się one zbrojeniem z cienkich, tkanych lub spawanych siatek, dość często zbrojenie połączone jest ze zbrojeniem z pręta lub drutu.

2. Główna treść badań

Żelbet, jako materiał konstrukcyjny, posiada kilka zalet w porównaniu z betonem: ma wyższą wytrzymałość na rozciąganie, wyższą odporność na pękanie, wysoką odporność na działanie obciążeń dynamicznych; żelbetowymi konstrukcjami przestrzennymi można przekrywać znaczne powierzchnie bez podpór pośrednich.

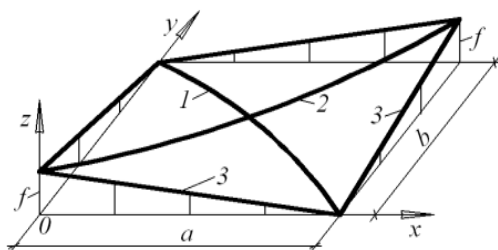
2.1. Historia powstania konstrukcji żelbetowych

Konstrukcje żelbetowe zostały wynalezione przez włoskiego architekta i inżyniera budownictwa P. L. Nervi w 1943 roku, a pierwszymi budowlami, które zostały wykonane z żelbetu są: magazyn w Rzymie (1946), ściany i pokrycie wykonane z elementów falistych o grubości 30 mm; pawilon jarmarku w Mediolanie (1953), pokrycie wykonane z żelbetowych elementów falistych; pawilon wystawowy w Turynie o rozpiętość 95 m, sklepienie faliste; pałac sportu w Rzymie z kopułą sferyczną o średnicy 59,2 m i inne obiekty. Obecnie praktyka budowy obejmuje ponad 70 typów rozmiarów powłok żelbetowych: wiązki, powłoki cylindryczne i stożkowe, łukowe, faliste, fałdowe, sklepione, jednowarstwowe i wielowarstwowe, kompozytowe, stałe lub zbudowane z pojedynczych elementów sprężonych lub konwencjonalnego zbrojenia.

Dalsze badania eksperymentalne i koncepcje projektowe potwierdzają efektywność wykorzystania konstrukcji żelbetowych do przekrywania budowli wielofunkcyjnych, dowolnego kształtu, o małych i dużych rozpiętościach, a nawet przy zagrożeniach sejsmicznych. Jedną z najlepszych opcji powierzchni żelbetowej jest powłoka w postaci paraboloidy hiperbolicznej. Pozwala to na przekrywanie dużych rozpiętości budynków i budowli – do 70 m lub więcej oraz zapewnia pokrycie jedną powierzchnią lub zespołem powierzchni ułożonych w różnych kombinacjach. Konstrukcyjne rozwiązania takiego pokrycia powinny zapewniać nośność, stabilność i niezmienność geometryczną konstrukcji w każdym przypadku, nawet przy ewentualnych lokalnych uszkodzeniach oraz zapobiegać rozpadowi z powodu ewentualnego zniszczenia drugorzędnych elementów konstrukcji, węzłów, detali, węzłów. Stabilność budynku na ewentualność rozpadu zapewnia zastosowanie odpowiedniego projektowania i materiałów, które pozwalają na odkształcenie plastyczne elementów konstrukcyjnych i ich połączeń.

2.2. Powłoka w kształcie paraboloidy hiperbolicznej

Paraboloida hiperboliczna charakteryzuje się formą liniową – jej powierzchnia stworzona jest przez system linii (rys. 1), a mianowicie, poprzez przeniesieni linii (tworzące) po skrzyżowaniu linii (prowadnice). To znacznie upraszcza produkcję szalowania, zbrojenia i obróbki powierzchniowej oraz elementów pokrycia w postaci płyt prefabrykowanych. Podczas przesunięcia linia tworząca jest równoległa do jednej ze współrzędnych pionowych płaszczyzny. Prowadnicami mogą być linie, które przechodzą przez dwie leżące na przeciw siebie strony. Pozycja wyjściowa linii tworzącej może pokrywać się z jedną z dwóch pozostałych stron. Jeśli powierzchnię paraboloidy hiperbolicznej umownie przeciąć płaszczyznami pionowymi (nie równoległymi do osi współrzędnych), to w przekroju otrzymamy parabole: jedną wypukłą ku górze, drugą wypukłą w dół.



Rys. 1. Powierzchnia paraboloidy hiperbolicznej: 1 – główny kierunek krzywizny dodatniej, 2 – główny kierunek krzywizny ujemnej, 3 – linie tworzące

Równanie powierzchni dowolnej paraboloidy hiperbolicznej jest opisane formułą:

$$z = f_1 \left(\frac{x}{a} \right)^2 - f_2 \left(\frac{y}{b} \right)^2. \quad (1)$$

Dla paraboloidy o jednej krzywej równanie środkowej powierzchni jest napisane następująco:

$$z = C_0 xy + C_1 x + C_2 y + C_3. \quad (2)$$

W szczególnym przypadku pokazanym na rys. 1, wartości stałych C_0 , C_1 , C_2 i C_3 można wyznaczyć z warunków dla czterech kątów powłoki:

1. w przypadku, gdy $x = 0$, $y = 0$, $z = f$, warunek (2) jest zapisany następująco:
 $f = C_0 \times 0 \times 0 + C_1 \times 0 + C_2 \times 0 + C_3$, więc $C_3 = f$;
2. przy $x = a$, $y = 0$, $z = 0$ i przy wyznaczonym wyżej $C_3 = f$, warunek (2) zapisuje się następująco:
 $0 = C_0 \times a \times 0 + C_1 \times a + C_2 \times 0 + f$, więc $C_1 = -f / a$;
3. przy $x = 0$, $y = b$, $z = 0$ i już znanego $C_3 = f$, warunek (2) jest zapisany:
 $0 = C_0 \times 0 \times b + C_1 \times 0 + C_2 \times b + f$, więc $C_2 = -f / b$;
4. przy $x = a$, $y = b$, $z = f$ i już znanych $C_1 = -f / a$, $C_2 = -f / b$ oraz $C_3 = f$, warunek (2) jest zapisany:

$$f = C_0 \times a \times b + (-f / a) \times a + (-f / b) \times b + f.$$

Teraz możemy napisać równanie (2) o zdefiniowanych stałych:

$$z = \frac{2f}{ab} xy - \frac{f}{a} x - \frac{f}{b} y + f \quad \text{lub} \quad z = f \left(\frac{2xy}{ab} - \frac{x}{a} - \frac{y}{b} + 1 \right). \quad (3)$$

Opracowana konstrukcja paraboloidy hiperbolicznej jest "rozpierająca". Rozporę należy zabezpieczać ściągaczem, zainstalowanym w dwóch przeciwległych dolnych węzłach. Sztynny ściągacz pomoże wzmocnić punkty ulegające przesunięciu poziomemu.

Nośność paraboloidy hiperbolicznej zależy od warunków równomiernego rozłożenia obciążenia na podstawie teorii dopuszczalnej równowagi.

Badania numeryczne wykazały, że powłoki w postaci paraboloidy hiperbolicznej mają wystarczającą sztywność i stabilność, a konstrukcja w postaci systemów sprzężonych zapewnia doskonały wyraz architektoniczny – za pomocą różnych kombinacji powłok można tworzyć różne formy pokrycia budynków o dowolnej siatce kolumn.

2.3. Materiały na pokrycia żelbetowe

Do budownictwa konstrukcji żelbetowych stosowany jest konstrukcyjny drobnziarnisty beton strukturalny A i B (klasy nie mniejszej niż C16/20, średnia gęstość nie mniejsza niż 2200 kg / m³, wielkość ziaren do 5 mm, zgodnie z ГОСТ 25192-82). Budowa jest wzmocniona zbrojeniem z drutu stalowego (ГОСТ 2715-80), spawanymi (ТУ 14-4-713-76) lub tkanymi siatkami (ГОСТ 3826-82). Tkane siatki są droższe niż spawane oraz nie posiadają one

stabilnych właściwości mechanicznych (współczynnik nierównomierności tkanej siatki zawiera się w zakresie 0,85 – 0,90), charakteryzują się prostowaniem drutu w rozciąganych obszarach konstrukcji, w wyniku czego szybciej powstają pęknięcia, dlatego bardziej korzystne są siatki zgrzewane, które są zdeformowane razem z betonem. Spawanie drutów w węzłach przecięcia zwiększa sztywność sieci, zwiększa siły wiążące siatkę z betonem, jej zakotwiczenie. Spawane siatki są zaawansowane technologiczne, łatwiejsze do mocowania, mają mocniejszą warstwę ochronną, łatwiej je ciąć – przy czym druciki nie rozpadają się, jak przypadku siatek tkanych. Odporność na pękanie w konstrukcjach żelbetowych (zbrojenie spawane) jest o wiele wyższa. Do produkcji takich siatek wykorzystuje się drut o średnicy 0,7 ... 1,0 mm, rozłożony co 8 ... 10 mm (wykorzystanie sieci o mniejszych komórkach utrudnia umieszczenie betonu). Normatywna odporność drutu w siatkach tkanych i spawanych wynosi $f_{m,ser} = 245$ MPa, co dorównuje najmniejszej umownej wartości punktu, któremu odpowiada względne trwałe wydłużenie 0,2% i 0,8 wytrzymałości czasowej na rozciąganie oka siatki drucianej. Wyliczony opór siatek dla warunków brzegowych pierwszej i drugiej grupy wyznacza się dla współczynnika 1,1. Moduł sprężystości siatek jest równy $E_m = 150000$ MPa. Charakterystyczną wielkością dla zbrojenia siatek jest współczynnik μ_m lub μ'_m , który jest zdefiniowany jako stosunek powierzchni poprzecznego przekroju siatki dla jednostkowej długości w rozciągniętej A_m i ściśniętej A'_m siatki i grubości elementu rozpatrywanego pola przekroju t .

Siła przyczepności w żelbecie wzrasta prawie proporcjonalnie do grubości przekroju i liczby siatek w przekroju, ze zmniejszeniem numeru sieci siła przyczepności również wzrasta. Wraz ze wzrostem wskaźnika wodno-cementowego obserwuje się spadek przyczepności, w górnej części przekroju to zmniejszenie wydaje się silniejsze.

Zbrojenie rozproszone zmniejsza odkształcenie betonu drobnoziarnistego o 15 ... 20%, wraz ze wzrostem współczynnika wzmocnienia ściąganie betonu maleje.

Dla żelbetu jest typowa proporcjonalna zależność pomiędzy naprężeniem i odkształceniem materiału. Rozproszone wzmocnienie zmniejsza pełzanie drobnoziarnistego betonu średnio o 30 ... 50%.

Żelbet jest często stosowany w konstrukcjach, które działają pod wpływem dynamicznych, cyklicznych lub sejsmicznych obciążeniach. Miejscowe zniszczenie zależy od siły uderzenia, grubości elementu i powstaje w wyniku tego, że wzdłuż konturu siły następuje przesunięcie, a naprężenie przekracza wytrzymałość betonu na rozerwanie. Rozproszone wzmocnienie sprzyja podwyższeniu wytrzymałości udarowej. Wraz ze zmniejszaniem czasu obciążenia wytrzymałość drobnoziarnistego betonu wzrasta dlatego, że odkształcenia plastyczne w betonie rozwijają się wolniej przy czynnikach dynamicznych niż przy obciążeniach statycznych. Granica wytrzymałości

żelbetu jest wyższa od granicy wytrzymałości betonu z powodu lepszej przyczepności przy zbrojeniu rozproszonym.

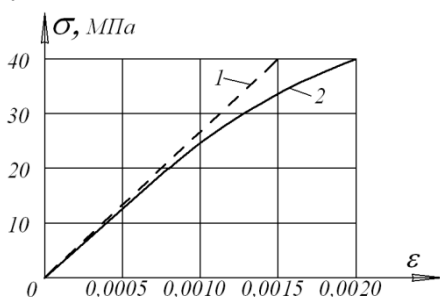
Kotwiące zbrojenie w betonie zapewnia wspólną ich pracę przez cały okres eksploatacyjny konstrukcji. Dla elementów żelbetowych, ze względu na ich niewielką grubość i właściwości zbrojenia, zagadnienie kotwiczenia zbrojenia jest istotne.

Rozproszone wzmocnienie cienką drucianą siatką z gęsto ułożonymi (6 ... 12,5 mm) drucikami poprzecznymi pozwala na zakotwiczenie podłużnych drucików siatki. W tkanych siatkach wygięcia w obszarze przecięcia podłużnych i poprzecznych drucików są rodzajem kotwicy. W siatkach spawanych kotwicą jest spaw drucików podłużnych i poprzecznych.

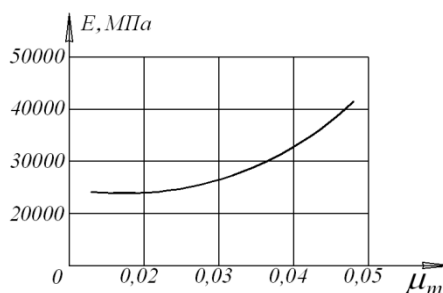
Ustalono, że wraz ze zmniejszeniem średnicy drutu oraz rosnącą liczbą drucików, siła przyczepności zbrojenia z betonem zwiększa się oraz zwiększa się jego zakotwiczenie.

Podczas zastosowania siatek w ilości 400 – 500 kg na 1 m³ betonu wzrasta wzmocnienie przylegania powierzchni betonu, dlatego beton równomiernie pracuje, co zmniejsza koncentrację naprężeń, co ma wpływ na bardziej równy rozkład sił wewnętrznych, a w rezultacie, rozciągalność żelbetu przewyższa rozciągalność betonu ponad 5 razy. To wzmocnienie zwiększa odporność na pęknięcie, odporność na wodę oraz na wpływ lokalnych i dynamicznych obciążeń.

Zależność między naprężeniem i odkształceniem żelbetu jest nieliniowa (rys. 2).



Rys. 2. Zależność odkształcenia żelbetu przy ściskaniu: 1 – odkształcenia elastyczne, 2 – odkształcenia pełne



Rys. 3. Zależność modułu sprężystości od zawartości zbrojenia

Dla $\mu_m \leq 0,02$ rozproszone wzmocnienie nie ma istotnego wpływu na wytrzymałość żelbetu na ściskanie, które zależy głównie od klasy betonu. Wraz ze spadkiem współczynnika zbrojenia siatką zwiększają się naprężenia ściskające.

Moduł sprężystości żelbetu (rys. 3) wzrasta ze wzrostem współczynnika μ_m .

Właściwości naprężeniowe i deformacyjne zbrojenia nie są w pełni wykorzystywane przy ściskaniu elementów żelbetowych ze względu na znaczną elastyczność siatki.

W zakresie optymalnych wartości współczynnika wzmocnienia siatki ($\mu_m \leq 0,04$) odkształcenia żelbetu zależą od parametrów zbrojenia z siatki i betonu, uwzględniając siłę i wiek.

Limit rozciągłości drobnoziarnistego betonu konstrukcji żelbetowych wynosi $(10 \dots 15) \times 10^{-5}$. Do momentu powstania pęknięć, moduł sprężystości przy rozciąganiu jest prawie taki sam jak przy ściskaniu, po powstaniu pęknięć gwałtownie spada. Rozproszone wzmocnienie w ilości do 2% pozytywnie wpływa na pracę żelbetu przy naprężeniach, ale zwiększenie liczby wzmocnień z siatki w elementach rozciąganych nie daje efektu – lepiej wykonywać konstrukcje rozciągane jako wcześniej ściskane.

2.4. Statyczne obliczenia pokryć

W statycznie niepewnych konstrukcjach żelbetowych siły pochodzące od zewnętrznych nacisków i wpływów oblicza się w warunkach granicznych pierwszej i drugiej grupy i ustala się z uwzględnieniem nieelastycznych deformacji prętów zbrojeniowych, betonu oraz obecności pęknięć, biorąc pod uwagę stan odkształcenia elementów. Obliczenia statyczne pokryć żelbetowych wykonuje się jak dla cienkościennych konstrukcji przestrzennych. Wygięcie pokryć musi mieścić się w dopuszczalnych granicach – do 1/400 rozpiętości, a dla konstrukcji wielkoformatowych (ponad 60 m) – do 1/500 rozpiętości.

Graniczne siły w normalnych odcinkach przekroju wyznacza się przy następujących założeniach: oporność betonu na rozciąganie jest równa zeru; opór betonu na kompresję jest równy f_c i jest równomiernie rozłożony na strefie betonu ściśniętego; naprężenia w zbrojeniu strefy ściśniętego betonu jest stała i nie jest większe niż f_{mc} ; naprężenia rozciągające w zbrojeniu są stałe po wysokości przekroju strefy naprężenia i nie większe niż f_m, f_{yd} .

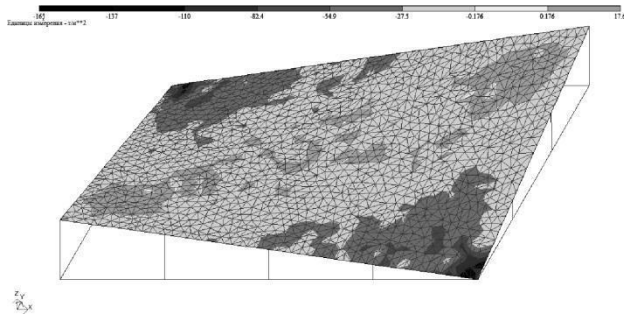
W przeprowadzonym badaniu wykonano obliczenia (rys. 4 ... 7) powierzchni w kształcie paraboloidy hiperbolicznej na planie prostokąta, o bokach $a = 3500$ mm, $b = 2250$ mm. Strzałka ugięcia $f_1 = f_2 = 500$ mm, co mieści się w rekomendowanym zakresie – od 1/10 do 1/5 rozpiętości. Największy kąt nachylenia stycznej do monolitycznej powierzchni pokrycia dla możliwości betonowania dla jednostronnego szalowania wynosi 12° , co nie przekracza zalecanego kąta 35° . Grubość powłoki $t = 30$ mm. Na obrysie płaszczyzny przewidziano elementy w postaci kratownic metalowych. Materiał konstrukcji pokrycia – żelbet z wykorzystaniem betonu klasy C16/20 z obliczoną odpornością betonu na ściskanie $f_{cd} = 11,5$ MPa. Jako zbrojenie wykorzystano zgrzewane siatki №12,5 wg TY 14-4-713-76, nominalna średnica drutu oczek 0,5 mm, wielkości nominalna boków komórki 12,5 mm, współczynnik zbrojenia A_m przy jednej warstwie siatki na 1 mm grubości przekroju elementu równy 0,0014, obliczeniowa opór siatki spawanej $f_m = 245$ MPa.

Współczynnik $\mu'_m = \frac{A'_m}{t} = \frac{0,0014}{3} = 0,00047$, wtedy wytrzymałość żelbetu przy ściskaniu wynosi:

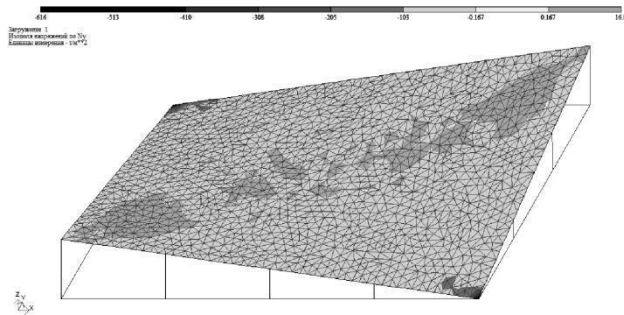
$$f_{c1} = f_{cd} + f_m \times \mu'_m = 11,5 + 245 \times 0,00047 = 11,6143 \text{ MPa}.$$

Współczynnik $\mu_m = \frac{A_m}{t} = \frac{0,0014}{3} = 0,00047$, wtedy wytrzymałość żelbetu przy rozciąganiu wynosi:

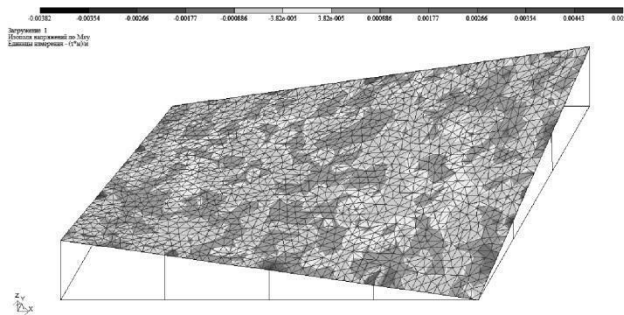
$$f_{cm} = f_m \times \mu_m = 245 \times 0,00047 = 0,1143 \text{ MPa}.$$



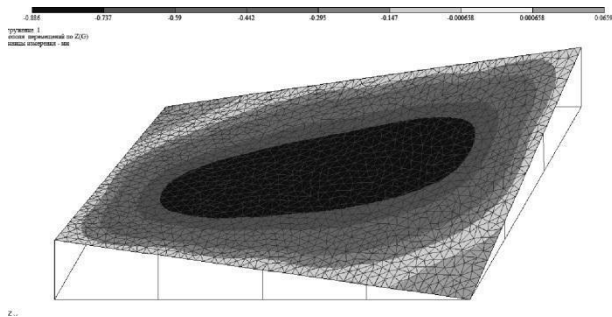
Rys. 4. Pole naprężenia dla N_x



Rys. 5. Pole naprężenia dla N_y



Rys. 6. Pole naprężenia dla M_{xy}



Rys. 7. Pole przesunięcia dla Z

Oprócz podstawowych obliczeń powłoki przy warunkach brzegowych, może być wymagane wykonanie obliczeń dla najbardziej prawdopodobnych przypadków nie-brzegowych. Po pierwsze, na podstawie obliczeń i analizy zostaną wskazane elementy, węzły, wiązania, które mają większy wpływ na cały układ konstrukcyjny. Raptowne wyłączenie tych elementów i wiązań pozwoli w sposób obliczeniowy na ujawnienie rezerw wytrzymałościowych konstrukcji. Pomoże to opracować rozwiązania konstrukcyjne w celu optymalizacji pewnych elementów konstrukcyjnych w celu zapobieżenia kaskadzie zniszczeń. Należy zwrócić szczególną uwagę na fakt, że ewentualne wykluczenie jednego z elementów, węzła lub wiązania, prowadzi do powstania brzegowych i poza brzegowych warunków w innych elementach konstrukcji. Wszystkie obliczenia wykonywane są z uwzględnieniem nieliniowości fizycznej, geometrycznej i strukturalnej. Ocena niezawodności struktury warstwy pokrycia żelbetowego może być wykonana na podstawie pełnego badania jego stanu naprężeniowo-deformacyjnego (SND) z uwzględnieniem parametrów geometrycznych. Po tych badaniach można udoskonalić metodykę obliczania konstrukcji i sformułować propozycje na temat technologii ich produkcji.

2.5. Tworzenie modelu pokrycia żelbetowego

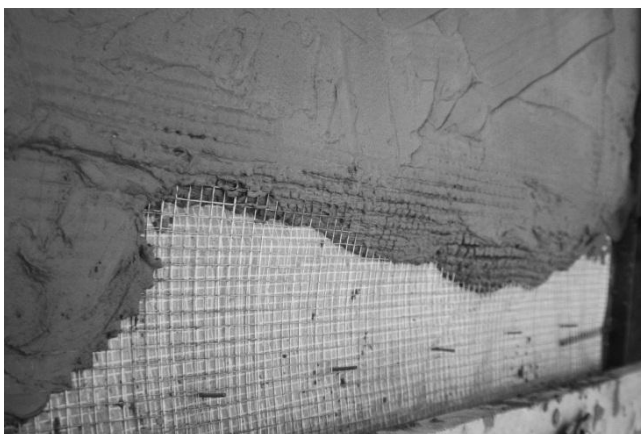
Do badań eksperymentalnych SND powłoki żelbetowej w postaci paraboloidy hiperbolicznej powstał model (rys. 8 ... 11) z parametrami przyjętymi w powyższych obliczeniach.



Rys. 8. Elementy pokrycia w postaci kratownic metalowych i desek do jednej z powłok



Rys. 9. Instalacja "markerów" do kontroli grubości pokrycia, położenia siatki spawanej



Rys. 10. Uformowany fragment pokrycia



Rys. 11. Wygładzanie powierzchni pokrycia żelbetowej

3. Perspektywy dalszych badań

Dalsze prace przewidują badania SND pokrycia żelbetowego oraz porównanie uzyskanych danych z obliczeniami. Zostaną zbadane również procesy występowania i wzrostu pęknięć w konstrukcjach cienkościennych podczas naprężeń roboczych. Naturalne badania pokrycia na pełną skalę będą dokonywane do czasu jej uszkodzenia, co pozwoli otrzymać schemat rozpadu i zniszczenia. Eksperymentalne badania naprężeniowo-deformacyjnego stanu powłoki pokrycia żelbetowego pozwoli wykorzystać doświadczalnie opracowane formuły do przeglądu wszystkich możliwych warunków brzegowych.

Dla powłoki żelbetowej ważnym jest wzrost deformacji konstrukcji w czasie, ze względu na pełzanie i możliwość stopniowego eliminowania z pracy betonu ze strefy rozciąganej. Krytyczne obciążenia cienkościennych powłok w długim czasie są zwykle znacznie niższe niż podczas krótkich testów.

Na podstawie szczegółowej analizy obliczonych wyników i ich porównaniu z danymi doświadczalnymi będą prowadzone analizy statystyczne i uogólnione metody obliczania konstrukcji cienkościennych wykonanych z żelbetu na wypadek powtórnych obciążeń.

Literatura

- [1] Pasichnyk R. V., *Skinchennoriznyitseva metodyka rozrakhunku stiykosti obolonok z vid'yemnoyu Hausovoyu kryvynoyu – dys...kand. tekh. nauk, Luts'k, 2010.*
- [2] Rasskazov A. O., *Raschet obolochek tyipa parabolycheskykh paraboloydov, Kyev, Yzd. Kyevskoho Hosunyversyteta, 1972.*
- [3] Samol'yanov Y. Y., *Prochnost', ustoychyvost' y kolebanyya hyperbolycheskoho paraboloyda, Lutsk, Lutskyy yndustrial'nyy ynstitut, 1993.*
- [4] Chernykh K. F., *Lyneynaya teoryya obolochek, Lenynhrad, Yzd. Lenynhrad. un-ta, ch. 2, 1965.*

mgr Siergiej Uzhegov
e-mail: lamerilkin@gmail.com

Asystent Katedry Inżynierii Lądowej Łuckiego Narodowego Uniwersytetu Technicznego.
Wykształcony na Uniwersytecie Glindor (UK) i na Uniwersytecie Technicznym w Lublinie (Polska).
Ukończył studia podyplomowe w 2014.



RESEARCH OF THE FERROCONCRETE SHELLS

Abstract. *The article presents the calculation of ferrocement roofing in the shape of a hyperbolic paraboloid, rectangular, modeling his designs for the experimental research.*

Keywords: *ferroconcrete, shell, hyperbolic paraboloid, model*

OBLICZANIE HIPERBOLOIDY JEDNOPOWŁOKOWEJ ZA POMOCĄ METODY RÓŻNIC SKOŃCZONYCH

Taras Gorbatyuk

Łucki Narodowy Uniwersytet Techniczny
Katedra Budownictwa Lądowego i Przemysłowego

***Streszczenie.** W pracy została opracowana metodyka obliczenia ujemnej krzywizny Gaussa za pomocą metody różnic skończonych. Opracowane zostało obliczenie hiperboloidy jednopowłokowej. Zbadano chwilowy stan naprężenia przy obciążeniu od własnej wagi. Opracowano problem wewnętrznej odpowiedniości równania.*

***Słowa kluczowe:** hiperboloida jednopowłokowa, metoda różnic skończonych, moment, powłoka*

Wstęp

Powłoki typu hiperboloidy powłokowej znalazły praktyczne zastosowanie w budownictwie znacznie później niż inne gatunki powłok, dlatego ich właściwości statyczne oraz charakterystyki sztywności były rzadziej badane i opracowywane. Według teorii momentu, obliczenia powłoki wykonywane są z reguły na podstawie metod numerycznych, takich jak metoda różnic skończonych (MRS) oraz metoda elementów skończonych (MES).

W artykule opracowane zostały obliczenia hiperboloidy jednopowłokowej przy różnych obciążeniach według teorii momentu za pomocą metody siatek.

1. Główne wyniki badań

Układ równań teorii powłoki zapisanych w przemieszczeniach jest następujący:

$$\begin{aligned}
 \nabla^4 W + \frac{12}{h^2} \left[\frac{1}{R_1} \frac{\partial U}{\partial \theta} (K_1 + \mu K_2) + \frac{1}{R_1 r} \frac{\partial r}{\partial \theta} U (K_2 + \mu K_1) + \frac{1}{r} \frac{\partial r}{\partial \theta} U (K_2 + \mu K_1) + \right. \\
 \left. + \frac{1}{r} \frac{\partial V}{\partial \varphi} (K_2 + \mu K_1) + (K_1^2 + 2\mu K_1 \times K_2 + K_2^2) \right] W = \frac{g_n}{D} \\
 \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{r}{R_1} \frac{\partial U}{\partial \theta} \right) + \frac{\partial}{\partial \theta} (r K_1 W) + \mu \left[\frac{\partial^2 V}{\partial \theta \partial \varphi} + \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{1}{R_1} \frac{\partial r}{\partial \theta} U \right) + \frac{\partial}{\partial \theta} (K_2 r W) \right] \\
 + \frac{(1-\mu) R_1}{2} \frac{1}{r} \frac{\partial^2 U}{\partial \varphi^2} + \frac{(1-\mu)}{2} r \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial V}{\partial \varphi} \right) - \frac{\partial r}{\partial \theta} \frac{1}{r} \frac{\partial V}{\partial \varphi} - \frac{1}{R_1 r} \left(\frac{\partial r}{\partial \theta} \right)^2 U \\
 - K_2 W \frac{\partial r}{\partial \theta} - \mu \left(\frac{1}{R_1} \frac{\partial U}{\partial \theta} \frac{\partial r}{\partial \theta} + K_1 W \frac{\partial r}{\partial \theta} \right) = - \frac{R_1 r}{B} g_1
 \end{aligned} \tag{1}$$

$$\frac{R_1}{r} \frac{\partial^2 V}{\partial \varphi^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial r}{\partial \theta} \frac{\partial U}{\partial \varphi} + R_1 (K_2 + \mu K_1) \frac{\partial W}{\partial \varphi} + \frac{1-\mu}{2} \times \frac{\partial^2 U}{\partial \theta \partial \varphi} + \frac{1-\mu}{2} \frac{\partial}{\partial \theta} \left[\frac{r^2}{R_1} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{V}{r} \right) \right] + \frac{1-\mu}{2} \frac{\partial r}{\partial \theta} \frac{1}{r} \frac{\partial U}{\partial \varphi} + \frac{1-\mu}{2} \frac{\partial r}{\partial \theta} \frac{r}{R_1} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{V}{r} \right) = -\frac{R_1 r}{B} g_2.$$

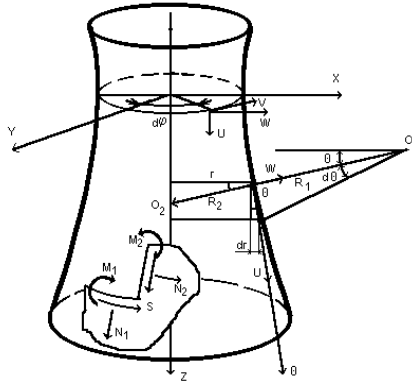
W tym artykule uwzględniono, że zmiana krzywizny i skręcenia spowodowane przez elementy wypornościowe przylegające do powierzchni środkowej, ogólnie nie są istotne. Uzasadnienie tej metody zostało wprowadzone do nauki przez H. M. Mushtari oraz L. Donellom [2] i jest szeroko stosowane w problemach stabilności powłoki obrotowej.

W (1) przyjęto oznakowanie:

$$\nabla^4 W = \frac{1}{R_1 r} \left[\frac{r}{R_1} \frac{\partial^2 (\nabla^2 W)}{\partial \theta^2} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{r}{R_1} \right) \frac{\partial (\nabla^2 W)}{\partial \theta} + \frac{R_1}{r} \frac{\partial^2 (\nabla^2 W)}{\partial \varphi^2} \right] \quad (2)$$

$$\nabla^2 W = \frac{1}{R_1 r} \left[\frac{r}{R_1} \frac{\partial^2 W}{\partial \theta^2} + \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{r}{R_1} \right) \frac{\partial W}{\partial \theta} + \frac{R_1}{r} \frac{\partial^2 W}{\partial \varphi^2} \right],$$

U, V, W – elementy wyporowe (rys. 1), h – grubość powłoki, D, B – cylindryczna sztywność na rozciąganie elementu powłoki, r, R – współczynniki pierwszej formy kwadratowej Gaussa, K_1, K_2 – krzywizny powierzchni, $\mu = 0,2$ – współczynnik Poissona, g_1, g_2 – komponenty intensywności obciążenia.



Rys. 1. Schemat wysiłku

Geometria powierzchni jest określona przez następujące parametry:

$$r = \frac{a}{c} \sqrt{z^2 + c^2} \quad a, c - \text{parametry hiperboli,}$$

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{dr}{dz} = \frac{a}{rc} \sqrt{r^2 - a^2}, \quad r = a(1 - \alpha^2 \operatorname{tg}^2 \theta)^{\frac{1}{2}}, \quad \frac{dr}{d\theta} = \frac{a\alpha^2}{\cos^2 \theta \sqrt{(1 - \alpha^2 \operatorname{tg}^2 \theta)^3}},$$

$$R_1 = \frac{\alpha}{c^2} \sqrt{\left[(1 + \alpha^2) r^2 - a^2 \right]^3}, \quad K_1 = -\frac{1}{R_1}, \quad K_2 = \frac{1}{R_2} = \frac{r}{\cos \theta}. \quad (3)$$

Wartość według Codazzii:

$$\frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{r}{R_1} \right) = -\frac{1}{R_1} \frac{\partial r}{\partial \theta}, \quad \text{albo} \quad \frac{\partial r}{\partial \theta} = R_1 \sin \theta. \quad (4)$$

Złożoność rozwiązania problemu jest spowodowana dużym wymiarem problemu, wysokim poziomem zróżnicowania równania w pochodnych cząstkowych. Współczynniki te są skomplikowaną funkcją współrzędnych na powierzchni powłoki. Dlatego rozwiązywanie zadanego problemu przechodzi do dyskretnych metod równań algebraicznych, w tym najbardziej efektywną jest metoda elementów skończonych oraz metoda siatek [1, 3].

Dla rozwiązania problemu na powierzchni środkowej są linie współrzędnych, które odpowiadają linii krzywizny powierzchni. Równania systemów ciągłych (1) przybliżone są do analogii różnic skończonych w centralnych różnicach pierwszego rzędu dokładności, wykorzystując przy tym współrzędne całkowite, które odpowiadają liczbie węzłów w siatce różnicy w kierunku θ i φ . Do określenia współczynników równania (pierwszej i drugiej formy kwadratowej) stosuje się węzły pomiędzy liniami siatki głównej.

Analogi różnic skończonych równań do sieci (i, k) są we wzorze:

$$\begin{aligned} & - \left[\left(\frac{r}{R_1} \right)_{i,k+0.5} + \left(\frac{r}{R_1} \right)_{i,k-0.5} + (1-\mu)\lambda^2 \left(\frac{R_1}{r} \right)_{i,k} + \frac{\nabla \theta^2}{R_1 r} \left(\frac{\partial r}{\partial \theta} \right)_{i,k}^2 \right] U_{i,k} + \\ & + \left[\left(\frac{r}{R_1} \right)_{i,k+0.5} + \frac{\mu}{2} \Delta \theta \times \left(\frac{1}{R_1} \frac{\partial r}{\partial \theta} \right)_{i,k+1} - \frac{\mu}{2} \Delta \theta \left(\frac{1}{R_1} \frac{\partial r}{\partial \theta} \right)_{i,k} \right] U_{i,k+1} + \\ & + \left[\left(\frac{r}{R_1} \right)_{i,k-0.5} - 0.5\mu\Delta\theta \left(\frac{1}{R_1} \frac{\partial r}{\partial \theta} \right)_{i,k-1} + 0.5\mu\Delta\theta \left(\frac{1}{R_1} \frac{\partial r}{\partial \theta} \right)_{i,k} \right] U_{i,k-1} + \\ & + 0.5(1-\mu)\lambda^2 \left(\frac{R_1}{r} \right)_{i,k} \times (U_{i+1,k} + U_{i-1,k}) + 0.25\lambda \left[\mu + (1-\mu)0.5 \frac{r_{i,k}}{r_{i,k+1}} \right] \times \\ & \times (V_{i+1,k+1} + V_{i-1,k+1}) + 0.25\lambda \left[\mu + 0.5(1-\mu) \frac{r_{i,k}}{r_{i,k-1}} \right] \times (V_{i-1,k-1} - V_{i+1,k-1}) - \\ & - 0.25\lambda\Delta\theta \left(\frac{1}{r} \frac{\partial r}{\partial \theta} \right)_{i,k} (V_{i+1,k} - V_{i-1,k}) - \Delta\theta^2 \left(\frac{\partial r}{\partial \theta} \right)_{i,k} (K_2 + \mu K_1)_{i,k} W_{i,k} + \\ & + 0.5\Delta\theta r_{i,k+1} (K_1 + \mu K_2)_{i,k+1} W_{i,k+1} - 0.5\Delta\theta r_{i,k-1} \times \\ & \times (K_1 + \mu K_2)_{i,k-1} W_{i,k-1} = -\frac{\Delta\theta^2}{B} (R_1 r g)_{i,k} \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned}
& - \left[2 \left(\frac{R_1}{r} \right)_{i,k} + \frac{1-\mu}{2\lambda^2} \left(\frac{r^2}{R_1} \right)_{i,k+0.5} \left(\frac{1}{r} \right)_{i,k} + \frac{1-\mu}{2\lambda^2} \times \left(\frac{r^2}{R_1} \right)_{i,k-0.5} \left(\frac{1}{r} \right)_{i,k} \right] V_{i,k} + \left(\frac{R_1}{r} \right)_{i,k} \times \\
& \times (V_{i+1,k} + V_{i-1,k}) + \left[\frac{1-\mu}{2\lambda^2} \left(\frac{r^2}{R_1} \right)_{i,k+0.5} \left(\frac{1}{r} \right)_{i,k+1} + \frac{1-\mu}{4\lambda} \Delta\varphi \times \left(\frac{r}{R_1} \frac{\partial r}{\partial \theta} \right)_{i,k} \left(\frac{1}{r} \right)_{i,k+1} \right] \times \\
& \times V_{i,k+1} + \left[\frac{1-\mu}{2\lambda^2} \left(\frac{r^2}{R_1} \right)_{i,k-0.5} \times \left(\frac{1}{r} \right)_{i,k-1} - \frac{1-\mu}{4\lambda} \Delta\varphi \left(\frac{r}{R_1} \frac{\partial r}{\partial \theta} \right)_{i,k} \left(\frac{1}{r} \right)_{i,k-1} \right] V_{i,k-1} + \quad (6) \\
& + 0.5\Delta\varphi \left(\frac{1}{r} \frac{\partial r}{\partial \theta} \right)_{i,k} (U_{i+1,k} - U_{i-1,k}) \frac{3-\mu}{2} + \\
& + \frac{1+\mu}{8\lambda} (U_{i+1,k+1} - U_{i+1,k-1} + U_{i-1,k-1} - U_{i-1,k+1}) + \\
& + 0.5\Delta\varphi (R_1)_{i,k} (K_2 + \mu K_1)_{i,k} (W_{i+1,k} - W_{i-1,k}) = -\frac{\Delta\varphi^2}{B} (R_1 r g_2)_{i,k}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \left\{ \left[\left(\frac{r}{R_1} \right)_{i,k+0.5}^2 \left(\frac{1}{R_1 r} \right)_{i,k+1} + \rho_{i,k}^2 \left(\frac{1}{R_1 r} \right)_{i,k} + \left(\frac{r}{R_1} \right)_{i,k-0.5}^2 \left(\frac{1}{R_1 r} \right)_{i,k-1} + 2 \left(\frac{R_1}{r^3} \right)_{i,k} \lambda^4 \right] W_{i,k} - \right. \\
& - \left[\rho \left(\frac{1}{R_1 r} \right)_{i,k} \left(\frac{r}{R_1} \right)_{i,k+0.5} + \left(\frac{r}{R_1} \right)_{i,k+0.5} \left(\frac{1}{R_1 r} \right)_{i,k+1} \times \rho_{i,k+1} \right] W_{i,k+1} - \\
& - \left[\rho \left(\frac{1}{R_1 r} \right)_{i,k} \left(\frac{r}{R_1} \right)_{i,k-0.5} + \left(\frac{r}{R_1} \right)_{i,k-0.5} \left(\frac{1}{R_1 r} \right)_{i,k-1} \rho_{i,k-1} \right] W_{i,k-1} - \\
& - 2\rho \left(\frac{1}{r^2} \right)_{i,k} \lambda^2 (W_{i+1,k} + W_{i-1,k}) + \left[\left(\frac{r}{R_1} \right)_{i,k+0.5} \times \left(\frac{1}{r^2} \right)_{i,k+1} \lambda^2 + \left(\frac{r}{R_1} \right)_{i,k+0.5} \left(\frac{1}{r^2} \right)_{i,k} \lambda^2 \right] \times \\
& \times (W_{i+1,k+1} + W_{i-1,k-1}) + \left[\left(\frac{r}{R_1} \right)_{i,k-0.5} \left(\frac{1}{r^2} \right)_{i,k-1} \times \lambda^2 + \left(\frac{r}{R_1} \right)_{i,k-0.5} \left(\frac{1}{r^2} \right)_{i,k} \lambda^2 \right] \times \\
& \times (W_{i+1,k-1} + W_{i-1,k-1}) + \left(\frac{r}{R_1} \right)_{i,k+0.5} \left(\frac{1}{R_1 r} \right)_{i,k+1} \left(\frac{r}{R_1} \right)_{i,k+1.5} \times W_{i,k+2} + \\
& + \left(\frac{r}{R_1} \right)_{i,k-0.5} \left(\frac{1}{R_1 r} \right)_{i,k-1} \left(\frac{r}{R_1} \right)_{i,k-1.5} \times W_{i,k-2} + \left(\frac{R_1}{r^3} \right)_{i,k} \lambda^4 (W_{i+2,k} + W_{i-2,k}) \left. \right\} + \\
& + \frac{12}{h^2} (K_1^2 + 2\mu K_1 K_2 + K_2^2)_{i,k} (r R_1)_{i,k} \Delta\theta^4 W_{i,k} + \frac{6}{h^2} \Delta\theta^3 \times \\
& \times r_{i,k} (U_{i,k+1} - U_{i,k-1}) (K_1 + \mu K_2)_{i,k} + \frac{12}{h^2} \Delta\theta^4 \times \left(\frac{\partial r}{\partial \theta} \right)_{i,k} (K_2 + \mu K_1)_{i,k} U_{i,k} + \quad (7) \\
& + \frac{6}{h^2} \Delta\theta^4 (K_2 + \mu K_1)_{i,k} (R_1)_{i,k} \frac{V_{i+1,k} - V_{i-1,k}}{\Delta\varphi} = \left(\frac{R_1 r g_n}{D} \right)_{i,k} \Delta\theta^4
\end{aligned}$$

Opracowywane zostały obliczenia chłodni kominowej (rys. 1) o następujących parametrach: $a = 35\text{m}$, $c = 82,4\text{ m}$, $h = 0,18\text{m}$, przy różnym układzie siatki n . Przyjęte obciążenia od wagi G_i ciśnienia wewnętrzznego $g_n - const$.

Warunki graniczne: górny przekrój powłoki przy $\theta_{\min} = -8.626^\circ$ wolne od wiązków zagłuszania $S = 0$, $N_1 = 0$, $R_1 = 0$, $M_1 = 0$. $\theta = 18,6^\circ$ (dolna krawędź powłoki) całkowite zagłuszanie $a = V = W = \frac{\partial W}{\partial \theta} = 0$.

Do określenia funkcji wartości przemieszczenia w obwodzie i poza obwodem stosowane są następujące analogie różnic (8, 9, 10, 11).

Funkcja V dla krawędzi $\varphi = \varphi_{\min}$

$$\begin{aligned}
 & -2\left(\frac{R_1}{r}\right)_{i,k} + \frac{1-\mu}{2\lambda^2}\left(\frac{r^2}{R_1}\right)_{i,k+0.5}\left(\frac{1}{r}\right)_{i,k} + \frac{1-\mu}{2\lambda^2}\times\left(\frac{r^2}{R_1}\right)_{i,k-0.5}\left(\frac{1}{r}\right)_{i,k}\left]V_{i,k} + \right. \\
 & + 2\left(\frac{R_1}{r}\right)_{i,k}V_{i+1,k} + \frac{\Delta\varphi}{2}(1+\mu)\left(\frac{1}{r}\frac{\partial r}{\partial\theta}\right)_{i,k}U_{i,k} + \frac{1}{\lambda}\left(\frac{1-3\mu}{4}\right)\times(U_{i,k-1}+U_{i,k+1})+ \\
 & + [\Delta\varphi(R_1)_{i,k}(K_2+\mu K_1)_{i,k}]\times(W_{i,k}+W_{i+1,k}) + \frac{1+\mu}{4\lambda}(U_{i+1,k+1}-U_{i+1,k-1})+ \\
 & \frac{3-\mu}{2}\Delta\varphi\left(\frac{\partial r}{\partial\theta}\frac{1}{r}\right)_{i,k}U_{i+1,k} + \frac{1-\mu}{2\lambda^2}\left[\left(\frac{r^2}{R_1}\right)_{i,k+0.5} + \frac{\Delta\theta}{2}\left(\frac{\partial r}{\partial\theta}\frac{r}{R_1}\right)_{i,k}\right]\left(\frac{V}{r}\right)_{i,k} + \\
 & + \frac{1-\mu}{2\lambda^2}\left(\frac{r^2}{R_1}\right)_{i,k-0.5} - \frac{\Delta\theta}{2}\left(\frac{\partial r}{\partial\theta}\frac{r}{R_1}\right)_{i,k}\left]\left(\frac{V}{r}\right)_{i,k-1} = -\frac{\Delta\varphi^2}{B}(R_1rg_2)_{i,k} + 2\frac{\Delta\varphi}{B}(R_1)_{i,k}(N_2)_{i,k}
 \end{aligned} \tag{8}$$

Funkcja U dla krawędzi θ_{\min}

$$\begin{aligned}
 & -\left[\left(\frac{r}{R_1}\right)_{i,k+0.5} + \left(\frac{r}{R_1}\right)_{i,k-0.5} + (1-\mu)\lambda^2\left(\frac{R_1}{r}\right)_{i,k} \times \Delta\theta^2\left(\frac{1}{R_1r}\right)_{i,k}\left(\frac{\partial r}{\partial\theta}\right)_{i,k}^2 + 2\mu\Delta\theta\left(\frac{r}{R_1}\right)_{i,k-0.5} \times \right. \\
 & \times\left(\frac{\partial r}{\partial\theta}\frac{1}{r}\right)_{i,k}\left]U_{i,k} + \left[\left(\frac{r}{R_1}\right)_{i,k+0.5} + \left(\frac{r}{R_1}\right)_{i,k-0.5} + \mu\Delta\theta\left(\left(\frac{1}{R_1}\frac{\partial r}{\partial\theta}\right)_{i,k+1} - \left(\frac{1}{R_1}\frac{\partial r}{\partial\theta}\right)_{i,k}\right)\right]U_{i,k+1} + \\
 & + \frac{1-\mu}{2}\lambda^2\left(\frac{R_1}{r}\right)_{i,k}(U_{i+1,k}+U_{i-1,k}) + \Delta\theta r_{i,k+1}\times(K_1+\mu K_2)_{i,k+1}W_{i,k+1} - \Delta\theta(K_1+\mu K_2)_{i,k}\times \\
 & \times\left[r_{i,k} - 2(R_1)_{i,k}\left(\frac{r}{R_1}\right)_{i,k-0.5}\right]W_{i,k} - \Delta\theta^2\left(\frac{\partial r}{\partial\theta}\right)_{i,k}\times(K_2+\mu K_1)_{i,k}W_{i,k} + \left(\lambda\frac{\mu}{2} + \frac{1-\mu}{4}\lambda\frac{r_{i,k}}{r_{i,k+1}}\right)\times \\
 & \times(V_{i+1,k+1}-V_{i-1,k+1}) - \left[\frac{1+\mu}{4}\lambda + \frac{\Delta\theta}{r}\lambda\left(\frac{\partial r}{\partial\theta}\frac{1}{r}\right)_{i,k} - \left(\frac{r}{R_1}\right)_{i,k-0.5}\mu\lambda\left(\frac{R_1}{r}\right)_{i,k}\right](V_{i+1,k}-V_{i-1,k}) = \\
 & = 2\Delta\theta\frac{(R_1)_{i,k}}{B}\left(\frac{r}{R_1}\right)_{i,k-0.5}(N_1)_{i,k} - \frac{\Delta\theta^2}{B}(R_1rg_1)_{i,k}
 \end{aligned} \tag{9}$$

Funkcja W dla krawędzi θ_{\min}

$$\begin{aligned}
& \left[\left(\frac{r}{R_1} \right)_{i,k+0.5} \left(\frac{1}{R_1 r} \right)_{i,k+1} \left(\left(\frac{r}{R_1} \right)_{i,k+0.5} + \left(\frac{r}{R_1} \right)_{i,k-0.5} \right) + \rho_{i,k}^2 \left(\frac{1}{R_1 r} \right)_{i,k} + 2 \left(\frac{R_1}{r^3} \right)_{i,k} \lambda^4 + \right. \\
& + 4(1-\mu)\lambda^2 \left(\frac{1}{r^3} \right)_{i,k} \times \left(\frac{\partial r}{\partial \theta} \right)_{i,k} \left(\frac{r}{R_1} \right)_{i,k-0.5} \Delta\theta + 12 \frac{\Delta\theta^4}{h^2} (rR_1)_{i,k} \times \\
& \times \left(K_1^2 + 2\mu K_1 K_2 + K_2^2 \right)_{i,k} \left. \right] W_{i,k} - \left[\rho_{i,k} \left(\frac{1}{R_1 r} \right)_{i,k} \left(\frac{r}{R_1} \right)_{i,k+0.5} + \right. \\
& + \rho_{i,k+1} \left(\frac{1}{R_1 r} \right)_{i,k+1} \left(\left(\frac{r}{R_1} \right)_{i,k-0.5} + \left(\frac{r}{R_1} \right)_{i,k+0.5} \right) + 2(1-\mu)\lambda^2 \left(\frac{1}{r^2} \right)_{i,k} \left(\frac{r}{R_1} \right)_{i,k-0.5} \left. \right] W_{i,k+1} - \\
& - \left[\rho_{i,k} \times \left(\frac{1}{R_1 r} \right)_{i,k} \left(\frac{r}{R_1} \right)_{i,k-0.5} - 2(1-\mu)\lambda^2 \left(\frac{1}{r^2} \right)_{i,k} \times \right. \\
& \times \left. \left(\frac{r}{R_1} \right)_{i,k-0.5} \right] W_{i,k-1} - 2\lambda^2 \left[\rho_{i,k} \left(\frac{1}{r^2} \right)_{i,k} + (1-\mu) \times \left(\frac{1}{r^3} \right)_{i,k} \left(\frac{\partial r}{\partial \theta} \right)_{i,k} \left(\frac{r}{R_1} \right)_{i,k-0.5} \Delta\theta \right] \times \\
& \times (W_{i+1,k} + W_{i-1,k}) + \left[\lambda^2 \left(\frac{1}{r^2} \right)_{i,k+1} \left(\left(\frac{r}{R_1} \right)_{i,k+0.5} + \left(\frac{r}{R_1} \right)_{i,k-0.5} \right) + \left(\frac{1}{r^2} \right)_{i,k} \left(\frac{r}{R_1} \right)_{i,k+0.5} + \right. \\
& + (1-\mu) \left(\frac{1}{r^2} \right)_{i,k} \left(\frac{r}{R_1} \right)_{i,k-0.5} \left. \right] \times (W_{i+1,k+1} + W_{i-1,k+1}) + \lambda^2 \left[\left(\frac{r}{R_1} \right)_{i,k-0.5} \left(\frac{1}{r^2} \right)_{i,k} - \right. \\
& - (1-\mu) \left(\frac{1}{r^2} \right)_{i,k} \left(\frac{r}{R_1} \right)_{i,k-0.5} \left. \right] (W_{i+1,k-1} + W_{i-1,k-1}) + \left(\frac{1}{R_1 r} \right)_{i,k+1} \left(\frac{r}{R_1} \right)_{i,k+1.5} \times \\
& \times \left(\left(\frac{r}{R_1} \right)_{i,k+0.5} + \left(\frac{r}{R_1} \right)_{i,k-0.5} \right) \times W_{i,k+2} + \left(\frac{R_1}{r^3} \right)_{i,k} \lambda^4 (W_{i+2,k} + W_{i-2,k}) + \frac{12}{h^2} \Delta\theta^3 \times \quad (10) \\
& \times r_{i,k} (K_1 + \mu K_2)_{i,k} (U_{i,k+1} - U_{i,k}) + \frac{12}{h^2} \Delta\theta^4 \left(\frac{\partial r}{\partial \theta} \right)_{i,k} \times (K_2 + \mu K_1)_{i,k} U_{i,k} + \\
& + \frac{6}{h^2} \lambda \Delta\theta^3 (K_2 + \mu K_1)_{i,k} (R_1)_{i,k} \times (V_{i+1,k} - V_{i-1,k}) = \frac{\Delta\theta^4}{D} (R_1 r g_n)_{i,k} - \\
& - 2 \frac{\Delta\theta^3}{D} (R_1)_{i,k} \times \left(\frac{r}{R_1} \right)_{i,k-0.5} (\mathcal{Q}_1^*)_{i,k}
\end{aligned}$$

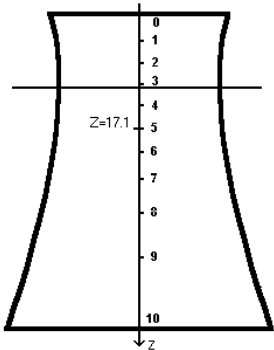
Ogólny moment na krawędziach: $\theta_{\min} - const$, $\theta_{\max} - const$

$$\begin{aligned}
 -\frac{\Delta\theta^2}{D}(M_1)_{i,k} &= \left[\left(\frac{1}{R_1}\right)_{i,k} \left(\frac{1}{R_1}\right)_{i,k+0.5} + \mu \frac{\Delta\theta}{2} \times \left(\frac{1}{R_1^2 r} \frac{\partial r}{\partial \theta}\right)_{i,k} \right] W_{i,k+1} - \\
 &- \left(\frac{1}{R_1}\right)_{i,k} \left[\left(\frac{1}{R_1}\right)_{i,k+0.5} + \left(\frac{1}{R_1}\right)_{i,k-0.5} \right] + 2\mu\lambda^2 \left(\frac{1}{r^2}\right)_{i,k} W_{i,k} + \\
 &+ \left[\left(\frac{1}{R_1}\right)_{i,k} \times \left(\frac{1}{R_1}\right)_{i,k-0.5} - \mu \frac{\Delta\theta}{2} \left(\frac{1}{R_1^2 r} \frac{\partial r}{\partial \theta}\right)_{i,k} \right] W_{i,k-1} + \\
 &+ \mu\lambda^2 \times \left(\frac{1}{r^2}\right)_{i,k} (W_{i+1,k} + W_{i-1,k})
 \end{aligned} \tag{11}$$

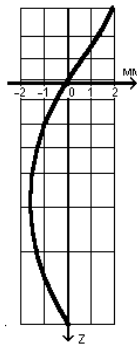
Biorąc pod uwagę symetrie problemu, stan naprężenia jest opracowywany tylko w kierunku współrzędnych θ z siatką przy $n = 10$. Przy tym krok $\Delta\theta = 0,04762$ rad jest stały.

Dla węzłów wewnętrznych siatki są zapisywane analogie różnicowe (5, 6, 7), odpowiednie równania konturu (9, 10, 11).

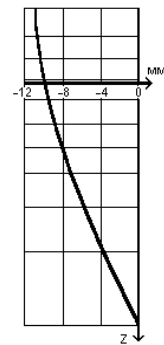
Wyniki tego rozwiązania pokazano na rys. 3–6 w postaci schematów przemieszczania i wysiłku.



Rys. 2. Schemat obliczeniowy chłodni kominowej

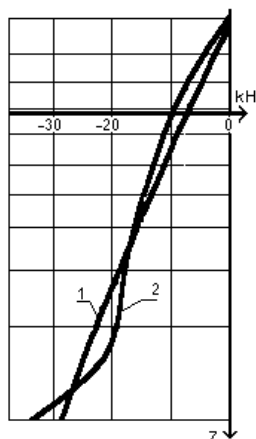


Rys. 3. Schemat W (własna waga)

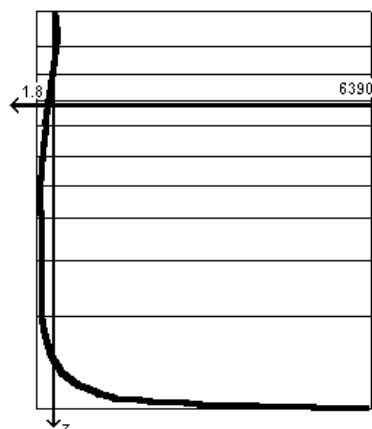


Rys. 4. Schemat U (własna waga)

Z rozwiązania wynika, że odkształcenia pod własnym ciężarem W i V są w tej samej kolejności. Porównując, wysiłki N_1 uzyskane zostały według teorii bezmomentowej, a z naszego rozwiązania wynika, że największa różnica występuje przy dolnej krawędzi zagłuszania. Ta rozbieżność może być wyjaśniona przez znaczący wpływ efektu granicznego. M_1 po całej wysokości i wielkości chłodni kominowej jest bardzo mała. Wyjątek stanowią punkty, które znajdują się w bliskiej odległości od dolnej krawędzi zagłuszania, gdzie spostrzega się gwałtowny wzrost znaczenia momentów, osiągając ekstremum zagłuszania w wyniku znaczącego efektu granicznego.



Rys. 5. Schemat N_1 : 1 – teoria bezmomentowa, 2 – metoda siatek



Rys. 6. Schemat M_1 ($kH \cdot m \cdot 10^8$)

W celu ustalenia precyzyjności rozwiązania, problem został rozwiązany przy różnych odstępach siatki dla $n = 6, 10, 12, 18, 24, 48$, podziału. Wyniki badania przedstawiono w tabeli.

Tabela 1. Konwergencja rozwiązania przy różnych krokach siatki.

Liczba podziałów	Odcinek $Z = -17,10$ m		Odcinek $Z = -103,99$ m	
	W [mm]	U [mm]	N [kH]	M [$10 \cdot kH \cdot m$]
6	-0,85	8,90	120	3,05
12	-0,92	9,64	139	1,27
18	-0,93	9,84	148	1,93
24	-0,94	9,93	157	2,50
48	-0,95	9,99	161	2,82

2. Wnioski

MRS jest bardziej ekonomiczne w porównaniu z MES, pozwala to na bardziej bezpośrednie podejście do numerycznego rozwiązywania równań różniczkowych zagadnienia brzegowego oraz umożliwia uzyskanie lepszej stabilności rozwiązania i spójność w obliczeniach konstrukcji stosunkowo do prostej geometrii.

Literatura

- [1] Gulyayev V. I., Bazhenov V. A., Gotsulyak Ye. A., Gaydachuk V. V., Raschet obolochek slozhnoy formy, Kiïv, Budivel'nik, 1990.
- [2] Mushtari KH. M., Galimov K. Z., Nelineynaya teoriya obolochek, Kazan', Tatknigoizdat, 1957.
- [3] Pasichnik R. V., Rozrakhunok gradimí na stýkíst'. Naukoví notatki. Mízhvuzívs'kiy zbirnik za napryamom „Ínzhenerna mekhaníka”, Luts'k, Vipusk 19, 2007, 115–120.

mgr Taras Gorbatyuk
e-mail: gorbatyukt@gmail.com

Gorbatyuk Taras urodził się w 1993 roku w Łucku. W 2010 roku rozpoczął studia w Łuckim Narodowym Uniwersytecie Technicznym, specjalność "Budownictwo Łądowe i Przemysłowe". Magister Katedry Budownictwa Łądowego i Przemysłowego w Łuckim Narodowym Uniwersytecie Technicznym. Ma doświadczenie pracy w obliczeniach konstrukcji budowlanych. Jego zainteresowania badawcze obejmują mechanikę budowli, konstrukcji oraz modelowanie komputerowe.



CALCULATION OF THE ONE SHEET HYPERBOLOID USING THE FINITE-DIFFERENCE METHOD

Abstract. *The method of calculating the Gaussian curvature shells negative is used by finite difference method. One sheet hyperboloid calculation is considered. The stress state of moment under load from its own weights studied. The question of internal convergence solution is discovered.*

Keywords: *one sheet hyperboloid, finite-difference method, moment, shell*

OBLICZENIA GŁÓWNYCH PARAMETRÓW SYSTEMU PRĘTÓW

Illia Kozachuk

Łucki Narodowy Uniwersytet Techniczny
Katedra Samochodów i Technologii Transportowych

***Streszczenie.** W artykule przedstawiono główne cechy obliczania parametrów elementów konstrukcyjnych z prętów przy różnych systemach mocowania. Przedstawiono algorytm do określania podstawowych parametrów prętów dla obliczeń statycznych i dynamicznych. Podstawą obliczeń są podstawowe równania dynamicznego gięcia cienkich prętów. Podano wyniki obliczeń. Zaproponowana metoda może być użyta do określenia zmian parametrów konstrukcyjnych dla podobnych zagadnień.*

***Słowa kluczowe:** obliczenia dynamiczne, konstrukcja prętowa, scenariusz uszkodzenia*

Wprowadzenie

W praktyce krajowego i zagranicznego budownictwa przemysłowego, cywilnego i transportowego powszechnie stosowane są konstrukcje, elementy nośne które są wykonane w postaci przestrzennych układów prętowych [3]. Ogólnie wiadomo, że bezpieczeństwo nowoczesnych budynków podczas budowy, jak również w trakcie ich dalszej eksploatacji (szczególnie w przypadku starych budynków mieszkalnych) obecnie zajmuje ważne miejsce w branży budowlanej. To wynika ze względu na szybki wzrost budownictwa w miastach i towarzyszącego jemu wzrostu obciążeń antropogenicznych na projekty budowlane, a także powstania nagłych sytuacji o różnym charakterze. Równie ważna jest chęć klientów do zminimalizowania kosztów otrzymania znaczącego efektu ekonomicznego, co wpływa na oszczędność materiałów wznoszonych konstrukcji. W związku z tym, zapewnienie bezpieczeństwa konstrukcji budowlanych na wszystkich etapach ich cyklu życia od projektu do usunięcia jest obecnie jednym z najważniejszych i najbardziej pilnych zadań [7, 8].

Nowoczesne metody projektowania obejmują początkowe badania możliwości stosowania klasycznych technik i, a w razie potrzeby, opracowanie nowych kryteriów uszkodzenia elementów nośnych konstrukcji w warunkach niestacjonarnego odkształcenia, badanie scenariuszy rozwoju sytuacji awaryjnych, uzyskania ilościowych danych szacunkowych trajektorii ryzyka różnych scenariuszy [1, 2].

Powyżej wymienione pozwala wyodrębnić na tym etapie następujący problem. Dla konstrukcji podczas projektowania oraz w czasie eksploatacji niezbędne jest przeprowadzenie symulacyjnego modelu obliczeń prawdopodobieństwa częściowego lub całkowitego niebezpiecznego upadku budowli w razie powstania sytuacji krytycznej. Mianowicie sytuacji, w której jedna podpora (mocowanie) lub więcej elementów nośnych są uszkodzone lub będą uszkodzo-

ne w krótkim czasie. To znaczy trzeba obniżyć zagrożenia, które pojawiają się w trakcie tworzenia i funkcjonowania konstrukcji. W celu odpowiedniej oceny konstrukcji warto znać parametry na każdym etapie, gdy zachodzi zmiana jej stanu.

1. Kluczowe wnioski badawcze

Badania wykazują, że tylko z obliczeń statycznych nie zawsze jest możliwe ustalenie rzeczywistej wartości napięcia, które może pojawić się w procesie eksploatacji konstrukcji [10]. Ponadto, udowodniono, że wartości naprężenia wyznaczonych przez dynamiczne obliczenie, są wyższe niż wartości uzyskane podczas obliczeń statycznych [11, 12]. Proponuje się zatem, aby obliczyć współczynniki siły konstrukcji zgodnie z następującym algorytmem:

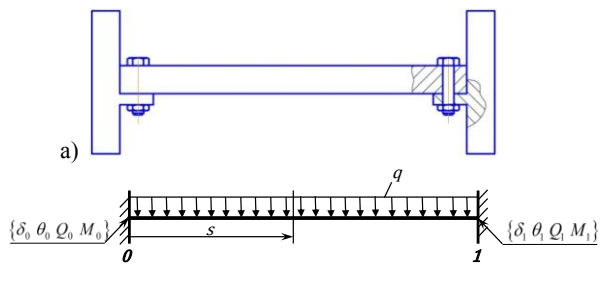
1. Określenie parametrów początkowych konstrukcji w stanie początkowym ($Y(0, x) = Y(x)$).
2. Określenie formy i częstotliwości swobodnych drgań dla nowego schematu konstrukcji, który uzyskuje się po zmianie pierwotnego stanu konstrukcji.
3. Rozkładanie początkowego stanu na formy otrzymanych swobodnych drgań.
4. Rozwiązanie statycznego problemu w nowym schemacie $\rightarrow Y_{cm}(x)$.
5. Wyszukiwanie trybów dla dynamicznych zadań w nowym schemacie $\rightarrow Y_{om}(x)$.

W ten sposób rozwiązanie problemu określania parametrów konstrukcji w całości, w wymaganym momencie czasu, będzie reprezentowane superpozycją (podsumowaniem) wyników obliczeń dynamicznych i statycznych. $Y = Y_{cm}(x) + Y_{om}(x, t)$

Algorytm ten jest realizowany dla trzech schematów wybranych z najczęstszych opcji modyfikacji warunków mocowanie węzłów prostych prętów konstrukcji [9]. Zatem, w oparciu o obecną analizę, jest konieczne obliczenie parametrów konstrukcji dla trzech zadań.

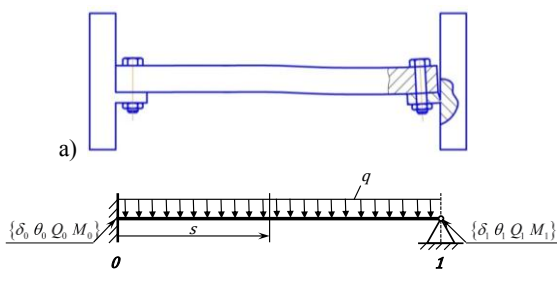
Posiadamy pręt, który sztywnie zamocowany jest na obu stronach. Podana opcja mocowania najczęściej występuje w rzeczywistych warunkach [4]. W użytku codziennym – jest to analog spawanego, sztywnego śrubowego lub nitowego połączenia. Konstrukcja ta ma swe własne częstotliwości i formy drgań [6]. Element prętowy w tym przypadku, nawet jeżeli nie jest obciążony dodatkowo, przebywa pod wpływem grawitacji, co można symulować poprzez wymianę masy równomiernym rozłożeniem obciążenia, jak pokazano na rys. 1.

Przy obliczeniu przewidziano węzeł i sposób jego uszkodzenia, w tym opracowano trzy możliwe scenariusze.



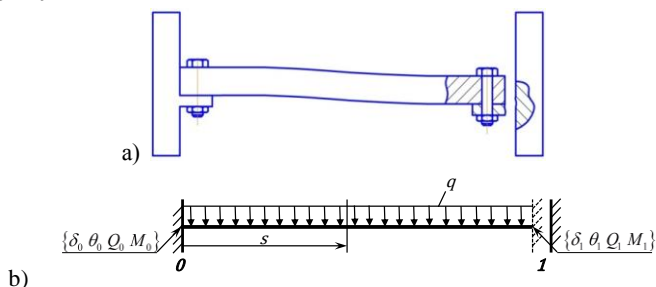
Rys. 1. Początkowy schemat obciążenia pręta: a) schemat mocowania, b) schemat obliczeniowy

Opcja 1 - modelowanie cięcia jednego z połączeń na końcu pręta. W ten sposób prawa podpora uzyskuje nowe stopnie swobody, które są charakterystyczne dla zawiasu (np. w skutek ucięcia wszystkich śrub mocowania z wyjątkiem jednej, lub nie całkowitego uszkodzenia podpory). Zatem przedstawiony wcześniej schemat przechodzi do nowego stanu (rys. 2) i otrzymuje nowe formy i częstości drgań.



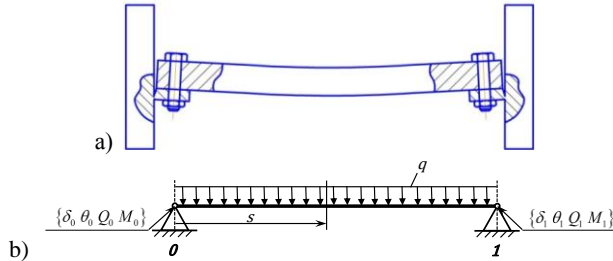
Rys. 2. Modyfikowany schemat obciążenia pręta: a) schemat mocowania, b) schemat obliczeniowy

Opcja 2 – modelowanie zachowania pręta po uszkodzeniu wszystkich połączeń na jednym końcu. W przeciwieństwie do poprzedniego etapu, na drugim końcu pręta uszkodzone zostały wszystkie połączenia, to znaczy pręt nie jest zamocowany (rys. 3).



Rys. 3. Schemat drugiej opcji mocowania pręta po uszkodzeniu: a) schemat mocowania, b) schemat obliczeniowy

Opcja 3 – modelowanie zachowania pręta po przejściu do zawiasów na obu końcach. W ten sposób na końcach pręta utracone jest jedno połączenie, co można symulować poprzez zamianę mocowania na podpory obu stron zawiasu (rys. 4).



Rys. 4. Opcja mocowania pręta po częściowym uszkodzeniu podpory:
a) schemat mocowania, b) schemat obliczeniowy

Użycie algorytmu przedstawionego powyżej pozwala wdrożyć rozwiązania opisanych problemów w pakiecie oprogramowania MathCAD.

Obliczenie określone przez dynamiczną macierz wpływu reprezentowaną przez funkcje Kryłowa [5]

$$\delta_0(\xi, \lambda, \alpha, j, d) = \begin{pmatrix} S(\lambda\xi) & \frac{T(\lambda\xi)}{\lambda} & \dots & -\frac{U(\lambda\xi)}{d\lambda^2 j} & -\frac{V(\lambda\xi)}{d\lambda^3 j} \\ \frac{\lambda}{2}V(\lambda, \xi) & S(\lambda\xi) & \dots & -\frac{T(\lambda\xi)}{d\lambda j} & -\frac{U(\lambda\xi)}{d\lambda^2 j} \\ -d\lambda^2 jU(\lambda\xi) & -d\lambda jV(\lambda\xi) & \dots & S(\lambda\xi) & \frac{T(\lambda\xi)}{d\lambda} \\ -d\lambda^3 jT(\lambda\xi) & -d\lambda^2 jU(\lambda\xi) & \dots & d\lambda V(\lambda\xi) & S(\lambda\xi) \end{pmatrix}. \quad (1)$$

Najpierw zostały zidentyfikowane parametry początkowe konstrukcji w stanie pierwotnym.

W wyniku mnożenia wektora stanu konstrukcji na początku (węzeł 0) na dynamiczną macierz wpływu (1) uzyskane zostało wyrażenie, które w rzeczywistości stanowi wektor stanu na końcu pręta (węzeł 1) dla każdej z rozważanych opcji (rys. 1–4). Zgodnie z warunkami brzegowymi na końcu pręta znamy parametry o wartości zero. To wystarczy, aby skompilować układ równań do wyznaczania nieznanymi parametrów konstrukcji.

Otrzymane równania częstotliwości dla odmiennych stanów pręta pierwszej (rys. 2), drugiej (rys. 3) i trzeciej (rys. 4) opcji (2) umożliwiają określenie częstotliwość swobodnych drgań dla zmodyfikowanych schematów konstrukcji:

- dla opcji 1: $\frac{Q_0(\text{ch}(\lambda) \cdot \sin(\lambda) - \text{sh}(\lambda) \cdot \cos(\lambda))}{\text{ch}(\lambda)} = 0$;

- dla opcji 2: $\frac{Q_0(\operatorname{ch}(\lambda) \cdot \cos(\lambda) + 1)}{\operatorname{ch}(\lambda) + \cos(\lambda)} = 0$, (2)
- dla opcji 3: $\frac{2Q_0 \cdot \operatorname{sh}(\lambda) \cdot \sin(\lambda)}{\operatorname{sh}(\lambda) + \sin(\lambda)} = 0$.

Równanie (2) może być traktowane jako częstotliwość, ponieważ wartość λ odpowiada częstotliwości swobodnych drgań konstrukcji.

Wartość równa się:

$$\lambda = \frac{\sqrt{\omega \cdot \sqrt{\frac{a}{j}}}}{d}$$

gdzie d – średnica bezwymiarowa, a – bezwymiarowe pole przekroju poprzecznego, j – bezwymiarowy moment bezwładności, ω – bezwymiarowa częstotliwość swobodnych drgań.

Następnie znormalizowane zostały własne formy drgań, po czym odbywa się natychmiastowa zmiana warunków brzegowych oraz symulacja całkowitego lub częściowego, w zależności od schematu, uszkodzenia mocowania według nowego stanu konstrukcji w zadaniu (rys. 2 – 4). Należy zauważyć, że za formą swobodnych drgań zgodnie z nowymi warunkami brzegowymi rozkładane są tylko przemieszczenia. Pozostałe znaczenia normalizujących czynników dla kątowników, momentów i siły otrzymane są za pomocą rozróżnienia (pierwsze, drugie, trzecie pochodne) uzyskanych wartości przemieszczenia. Następnie zostały wymienione tryby dynamicznych zadań nowego schematu:

- przemieszczenie bezwymiarowe

$$\delta \text{Lsq}(\xi, \lambda, a, j, d, C) = \sum_{k=0}^{\text{rows}(C)-1} (C_k \cdot \text{Eig } F_n(\xi, \lambda_k, a, j, d)_0)$$

- kątownik bezwymiarowy

$$\theta \text{Lsq}(\xi, \lambda, a, j, d, C) = \sum_{k=0}^{\text{rows}(C)-1} (C_k \cdot \text{Eig } F_n(\xi, \lambda_k, a, j, d)_1)$$

- moment bezwymiarowy

$$M \text{Lsq}(\xi, \lambda, a, j, d, C) = \sum_{k=0}^{\text{rows}(C)-1} (C_k \cdot \text{Eig } F_n(\xi, \lambda_k, a, j, d)_2)$$

- bezwymiarowa siła przekroju

$$Q \text{Lsq}(\xi, \lambda, a, j, d, C) = \sum_{k=0}^{\text{rows}(C)-1} (C_k \cdot \text{Eig } F_n(\xi, \lambda_k, a, j, d)_3)$$

W wyniku rozkładu wyjściowego stanu za formą otrzymanych swobodnych drgań zostały uzyskane wykresy wykazujące formy normalizowania swobodnych drgań konstrukcji dla trzech opcji. Umieszczając je na podobnych wykresach ale dla statycznego sformułowania problemu w nowym stanie uzyskano

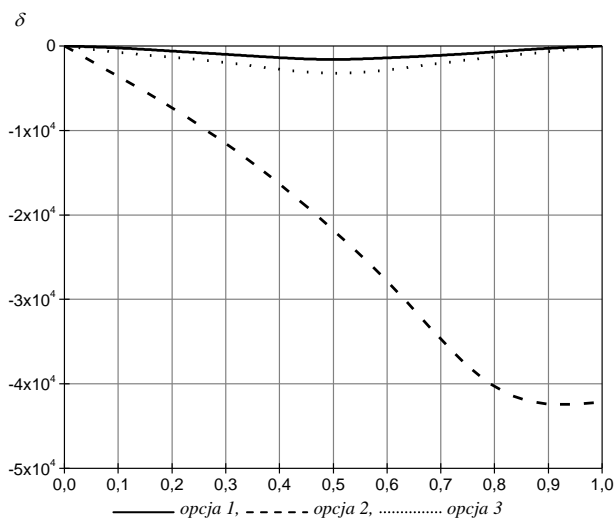
bezwymiarowe wykresy podstawowych parametrów konstrukcji na współrzędnej bezwymiarowej dla nowego stanu konstrukcji (rys. 5 – 9).

Wyniki obliczeń oraz zaproponowany algorytm mogą być stosowane do opisu zmian warunków mocowania typowych konstrukcji i dla obliczenia podobnych systemów pręta.

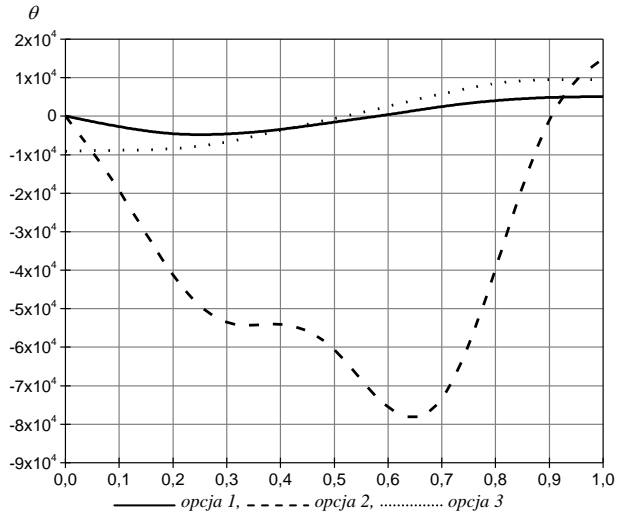
Należy zauważyć, że proces uszkodzenia z reguły składa się z następujących etapów: stan początkowy (rys. 1a), strata jednego z łączy w punkcie zamocowania (rys. 2a), całkowity brak połączenia z węzłem (rys. 3a).

Istnieją inne scenariusze uszkodzenia, gdy jest przyspieszony rozwój procesu uszkodzenia, i biorąc pod uwagę zwięzłość zachodzących procesów w konstrukcji drugi etap znika, po pierwszym etapie następuje od razu trzeci. W wyniku nowego rozkładu naprężeń po etapie „b” (rys. 2) w konstrukcji zachodzi zanik połączenia w lewym węźle mocowania co w rezultacie doprowadzi do redukcji wartości opisanego wcześniej schematu przedstawionego na rys. 4, a następnie do całkowitego uszkodzenia. Z tego powodu zostały wybrane i opracowane przykłady wymienionych powyżej zadań.

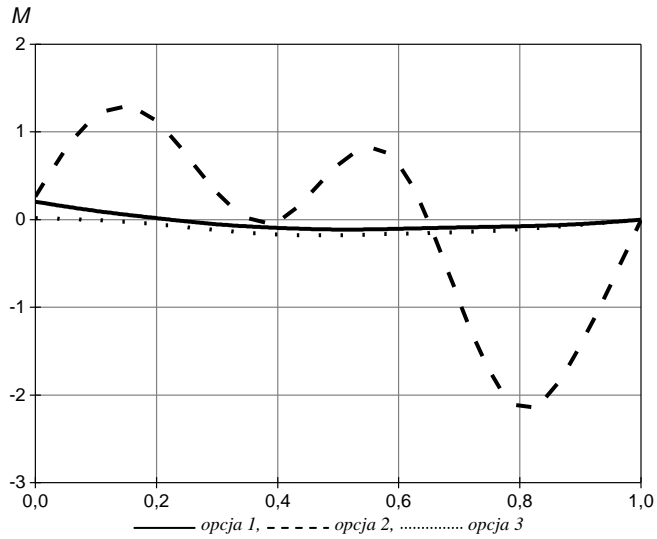
Bezwymiarowa prezentacja danych w programie obliczeniowym pozwala na wykorzystanie go do rozwiązywania problemów o różnych parametrach początkowych.



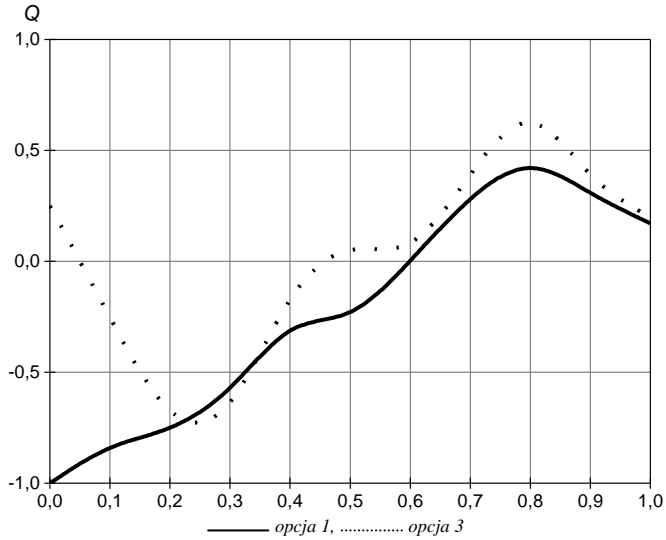
Rys. 5. Podział przemieszczeń konstrukcji pręta relatywnie do bezwymiarowej współrzędnej dla trzech opcji uszkodzenia



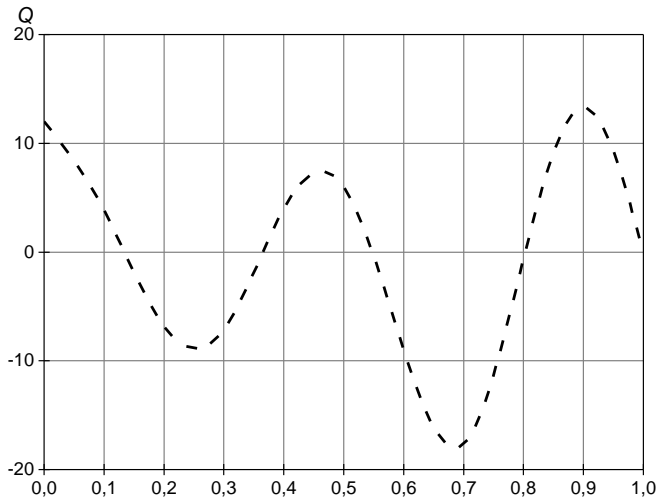
Rys. 6. Podział kątów relatywnie do współrzędnej bezwymiarowej dla trzech opcji uszkodzenia



Rys. 7. Podział momentów relatywnie do bezwymiarowej współrzędnej dla trzech opcji uszkodzenia



Rys. 8. Podział siły relatywnie do bezwymiarowej współrzędnej dla pierwszej i trzeciej opcji uszkodzenia



Rys. 9. Podział sił relatywnie do bezwymiarowej współrzędnej dla drugiej opcji uszkodzenia

Wykresy te pokazują wyraźnie, że w wyniku obliczenia dynamicznego odbywa się istotne określenie momentów oraz sił przekroju w porównaniu do obliczeń statycznych. Ważne jest również to, że dynamiczne sformułowanie problemu pozwala na ustalenie niebezpiecznego odcinka przekroju oraz określenie jego lokalizacji.

2. Wnioski

Według danych przedstawionych obliczeń graficznych (rys. 5 – 9), najbardziej niebezpieczny jest drugi schemat, ponieważ w nim powstaje największy maksymalny moment w przekroju o współrzędnej 0,81, moduł którego wynosi 2,2 (rys. 7). Niebezpieczeństwo tego schematu polega na tym, że występuje kilka punktów krytycznych przy dużych różnicach wartości momentu.

Następny niebezpieczny schemat to schemat jeden z ściskaniem pręta i zawiasu. Mocowanie na początku współrzędnych spowodowało powstanie w konstrukcji maksymalnego momentu z wartością zbliżoną do 0,25.

Najmniej niebezpieczny jest rozwój scenariusza w schemacie trzy z przejściem do podpór przegubowych. Prawie równa wartość momentu w konstrukcji znajduje się na współrzędnych 0,4 i 0,6, co zmniejszyło jego wartość maksymalną. Zatem maksymalny moment w tym przypadku jest w skali 0,16.

Zatem, najbardziej niebezpiecznym rozwiązaniem dla badanego obwodu pręta jest uszkodzenie za scenariuszem zgodnie z którym odbywa się natychmiastowy zanik od razu dwóch wiązań w jednym z węzłów bez etapów pośrednich.

Literatura

- [1] Kwon M., Spacone E., Three-dimensional finite element analyses of reinforced concrete columns, *Computers and Structures*, Vol. 80, 2002, 199–212.
- [2] Meyer C., Roufaiel S. L., Arzoumanidis S. G., Analysis of damaged concrete frames for cyclic loads, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 11, No. 2, 1983, 207–228.
- [3] Art'omov, V. Ye., Sterzhnevi budivel'ni konstruktsiyi: osnovni typy, klasyfikatsiya, navantazhennya, Diahnostyka, dovhovichnist' ta rekonstruktsiya mostiv i budivel'nykh konstruktsiy: zbirnyk nauk. prats', NAN Ukrainy Fyzyko-mekhanichnyy in-t im. H. V. Karpenka, Dnipropetr. nats. un-t zalizn. transp. im. akad. V. Lazaryana, Kamenyar, Vyp. 11, 2009.
- [4] Bazhenov V. A., Shyshov O. V., Budivel'na mekhanika. Elektronnyy pidruchnyk, 2008: <http://www.knuba.edu.ua/ua/facultes/10/38>.
- [5] Byderman V. L., Teoryya mekhanicheskikh kolebanyy, Mockva, Vysshaya shkola, 1980.
- [6] Bozhydarnyk V. V., Sulym H. T., Elementy teoriiy pruzhnosti, L'viv, Svit, 1994.
- [7] Bolotyn V. V., Statystycheskoe modelyrovanye v raschetakh na seysmostoykost', Stroytel'naya mekhanika y raschet sooruzhenyy, № 1, 1981, 60–64.
- [8] Husev A. S., Svetlytskiy V. A., Raschet konstruktsyy pry sluchaynykh vozdeystviyakh, Mockva, Mashynostroenye, 1984.
- [9] Klaf R., Penzyen Dzh., Dynamyka sooruzhenyy, Mockva, Stroyzdat, 1979.
- [10] Nykolaenko N. A., Ul'yanov S. V., Statystycheskaya dynamyka mashynostroytel'nykh konstruktsyy, Mockva, Mashynostroenye, 1977.
- [11] Raspopov O. S., Rusu S. P., Art'omov V. YE., Doslidzhennya dynamichnoyi roboty metalevoyi prohonovoyi budovy mosta pid vplyvom rukhomoho navantazhennya, Problemy mekhaniky zaliznychnoho transportu: Bezpeka rukhu, dynamika, mitsnist'

rukhomoho skladu ta enerhozberezhennya: KHII Mizhnarodna konferentsiya, Mintrans Ukrayiny. DNUZHT im. akademika V. Lazaryana, Dnipropetrovs'k, DNUZHT, 2008.

- [12] Raspopov O. S., Art'omov V. YE., Rusu S. P., Udoskonalennya dynamichnykh rozra-khunkiv sterzhnevyykh system na osnovi metodiv skinchenykh elementiv ta dynamiky tverdoho tila, Problemy ta perspektyvy rozvytku zaliznychnoho transportu: tezy dop. 70-y Mizhnar. nauk.-prakt. konf., DNUZHT. Ckhid. nauk. tsentr transp. akad. Ukrayiny, Dnipropetrovs'k, DIIT, 2010, 220-221.

doc. dr inż. Illia Kozachuk

e-mail: illyakozachuk@gmail.com

Kozachuk Illia urodził się w 1981 roku w mieście Koretz. W 2003 roku ukończył studia na Politechnice w Łucku, uzyskał tytuł magistra.

W 2008 roku obronił pracę na stopień kandydata nauk technicznych.

Naukowe zainteresowania: badania parametrów siły i sztywności konstrukcji technicznych, modelowanie komputerowe i matematyczne.



ABOUT THE CALCULATION OF BASIC CHARACTERISTICS OF ROD SYSTEMS

Abstract. *The paper presents the features of the calculation of basic characteristics of rod elements of construction under various schemes of their fixing. The algorithm of definition of the basic characteristics of rod elements is offered. Dynamic and static calculations were combined in this algorithm. Basic equations of dynamic bend of thin bars are used in calculations. Results of calculations are shown. The offered method can be used for the determining of parameters variation of the construction in similar tasks.*

Keywords: *dynamic calculation, rod construction, destruction scenario*

AKUSTYCZNA I EMISYJNA OCENA ZMIANY WIĄZKOŚCI USZKODZENIA STALI RESOROWEJ PODCZAS EKSPLOATACJI POJAZDU

Oleksander Dubyckij

Łucki Narodowy Uniwersytet Techniczny
Wydział Samochodów i Maszyn Roboczych

***Streszczenie.** W artykule przedstawiono wyniki badań, dotyczące zmian właściwości wytrzymałościowych stali resorowej listwy głównej, w trakcie eksploatacji samochodu ciężarowego. Na podstawie uzyskanych wyników stwierdzono, że ze względu na charakterystyczne właściwości struktury materiału i technologii produkcji, stal resorowa wzmacnia swoje właściwości w czasie eksploatacji w niewielkim stopniu. Przy tym stopień akustycznej emisji uszkodzonego materiału wzrasta.*

***Słowa kluczowe:** resor, emisja akustyczna*

1. Wstęp

W technice powszechnie stosowane zasady obliczania części, w oparciu o uzyskane podczas badania rozciąganiem charakterystyczne właściwości wytrzymałościowe i plastyczność materiałów. Bardzo często takie obliczenia nie zapewniają wystarczającej niezawodności, w skutek czego powstaje uszkodzenie.

Aby zapobiec katastrofalnej kruchości uszkodzenia, zostały opracowane koncepcje temperatury transformacji oraz koncepcje mechaniki uszkodzenia. Koncepcja mechaniki uszkodzenia wynika z tego, że w stałych materiałach istnieją pęknięcia, które mogą być postrzegane jako ostre cięcia. Pod wpływem obciążeń zewnętrznych na górnej powierzchni pęknięcia tworzy się koncentracja naprężeniowa. W wyniku tego (zwłaszcza przy niskiej temperaturze) może wystąpić kruche pęknięcie materiału konstrukcyjnego, które powoduje przedwczesne uszkodzenie elementów konstrukcyjnych. Dotyczy to w największym stopniu i resorów, a mianowicie ich listwy, a przede wszystkim listwy głównej.

W celu zapewnienia niezawodności poprzez zapobieganie zniszczenia, w mechanice zostały wprowadzone parametry, które opisują wpływ naprężenia oraz wielkość pęknięć na strukturę materiału: krytyczne znaczenie kryteriów mocy, deformacji lub energii. To pozwala na zdefiniowanie warunków rozwoju istniejących pęknięć materiału, które rozwijają się na dwa sposoby: stabilny wzrost, co odbywa się poprzez wzmocnienie naprężenia w okolicy przekroju próbki, i niestabilny, który przechodzi bez wzmocnienia naprężenia.

Ten artykuł analizuje zmiany charakterystyki statycznej odporności materiałów listwy resorowej na pęknięcia pod wpływem czynników eksploatacyjnych. Główne wyniki badań przedstawione w pracach [8–10].

2. Przedstawienie problemu badawczego

Resor jest sprężynowym i prowadzącym elementem zawieszenia pojazdu. Jego stosowanie ułatwia konstrukcję i remont maszyn. Resor jest prosty w konstrukcji i w naprawie, ale przy tym ma wiele znaczących wad. Najważniejsze z nich to: wysokie tarcie występujące pomiędzy poszczególnymi listwami, które może poważnie obniżyć płynność ruchu na dobrej drodze, a także duża pojemność materiałów w połączeniu z technologiczną złożonością produkcji listew. Resory mogą mieć takie wady: korozja listew, utrata elastyczności, ucięcie centralnej śruby, zużywanie nakrętek ucha resoru i konsoli i uszkodzenie samych konsoli.

Trwałość tego ważnego węzła spowodowana jest naprężeniem początkowym, złożonym stanem naprężenia oraz dynamicznym działaniem różnych cyklicznych obciążeń. W porównaniu z drążkiem skrętnym i sprężynami, resor pracuje w mniej korzystnych warunkach; wytrzymałość na zmęczenie materiału jest w 4 razy mniejsza niż u drążka skrętnego. Obecnie, podczas zastosowania w dobrych warunkach drogowych (asfaltowe pokrycie) trwałość eksploatacji resoru ciężarówki wynosi 100–150 tys. km przebiegu autostradą, ale w złych warunkach (drogi gruntowe, praca na budowach, w kamieniołomach, itp.) – spada o połowę, a nawet dochodzi do 10–15 tys. km.

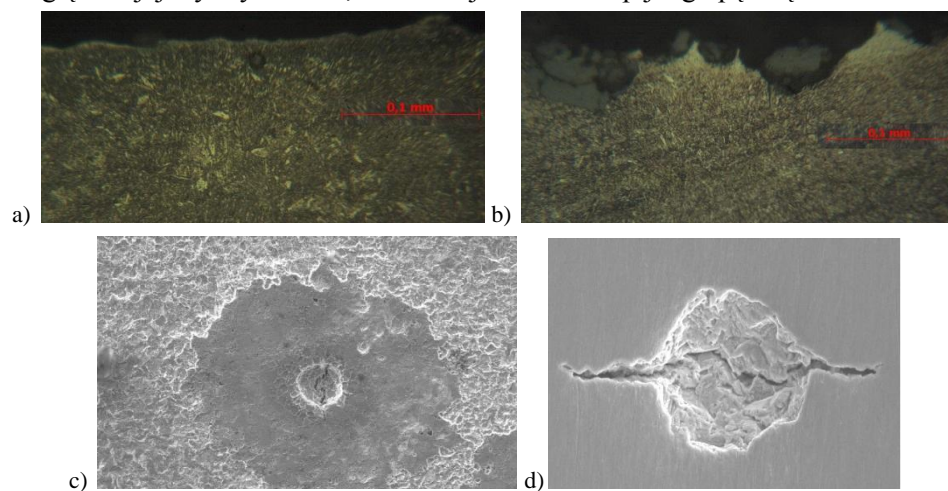
Wilgotne powietrze i woda to są środowiska korozyjne dla pracy resor. Woda lub wodne roztwory soli, kwasów i alkalia tworzą silne środowisko elektrolityczne. Powierzchnia stali w elektrolicie występuje w postaci asynchronicznego wieloelektronowego elementu ogniwa galwanicznego, składającego się z dużej liczby elementów śladowych [2]. Ich pojawienie się jest związane z niejednorodnością fazy metalicznej, która powstała w wyniku termicznej i mechanicznej obróbki, folii tlenków i zanieczyszczeń na powierzchni metalu, oraz z fazą ciekką, ze względu na różnicę stężeń jonów metali w elektrolicie i rozpuszczalności jonów w substancjach i gazach. Procesy elektrolityczne sprzyjają absorpcji uwodnionych jonów wodoru z powierzchni katody, gdzie są wyłączone z cząsteczek wody. Przy tym część jonów uwalnia się w postaci pęcherzyków gazu w elektrolicie, inna część w postaci protonów H^+ oraz wchodzi w sieć krystaliczną stali. Potem odbywa się uwodornienie niskiej temperatury [6]. Pod wpływem deformacji pojawiają się dodatkowe warunki, które przyczyniają się do powstania procesów fizycznych i chemicznych, w tym korozji i dyfuzji (deformacja plastyczna silnie aktywuje wpływ środowiska na metal). Następuje znaczne zmniejszenie oporu deformacji i uszkodzenia – wpływ adsorpcji osłabienia (efekt Rebintera) [7].

Na rysunku 1 pokazano zmianę powierzchni listwy głównej resoru samochodu GAZ-53A, przebywającego w eksploatacji od 4 lat. Również pokazany jest wygląd korozji wżerowej, która występuje pod wpływem interakcji kontaktu (tarcia). Jak widać, powierzchnia listwy przed użyciem nie ma żadnych pęknięć i jest stosunkowo gładka (rys. 1a), ale w trakcie eksploatacji w wyniku czynni-

ków korozji mechanicznej uległa istotnym zmianom. Pojawiła się korozyjna wnęka, przykryta produktem korozji, wśród których są ostre cienkie mosty (rys. 1b). W pustych miejscach widoczne są pęknięcia zmęczeniowe, które wrastają w listwę o strukturze troostytu jak i materiał w stanie wyjściowym. Taka topografia powierzchni przyczynia się do jej intensywnej kruchości (obejmującej uwodornienie), a razem z tym powstawaniu wyżej wspomnianych zarodków uszkodzenia zmęczeniowego, które następnie łączy się w mikroskopijne pęknięcia.

Rysunek 1c, d przedstawia powstanie korozji wżerowej mikroskopijnego pęknięcia.

W ten sposób, eksploatacja pojazdu pod wpływem różnego rodzaju obciążenia, środowiska, temperatury, i tak dalej, sprzyja intensywnej degradacji powierzchni sprężyny, co ułatwia powstanie najbardziej niebezpiecznej, pod względem jej wytrzymałości, deformacji - mikroskopijnego pęknięcia.



Rys. 1. Powierzchnia wyjściowego (a) i skumulowanego (b) materiału resoru (stal 50XG), a także korozja wżerowa pęknięcia (c) oraz jej szczegółowy wygląd (d) [1]

Bardzo niebezpieczne z punktu widzenia wytrzymałości są ultra mikroskopijne pęknięcia, powstałe na powierzchni resoru i które są centrum powstawania i rozwoju pęknięć. Ciekłe środowisko przechodzi do tych pęknięć pod wpływem ciśnienia kapilarnego, a jony wodorowe migrują z wysokimi prędkościami wгłęb pęknięć. W tym, szybkość tej migracji jest znacznie wyższa niż szybkość środowiska ciekłego. Po osiągnięciu w lokalnych obszarach wierzchołka pęknięcia maksymalnego naprężenia rozciągających, wodór dyfunduje bardzo szybko i ogranicza wytrzymałość materiału [4, 14].

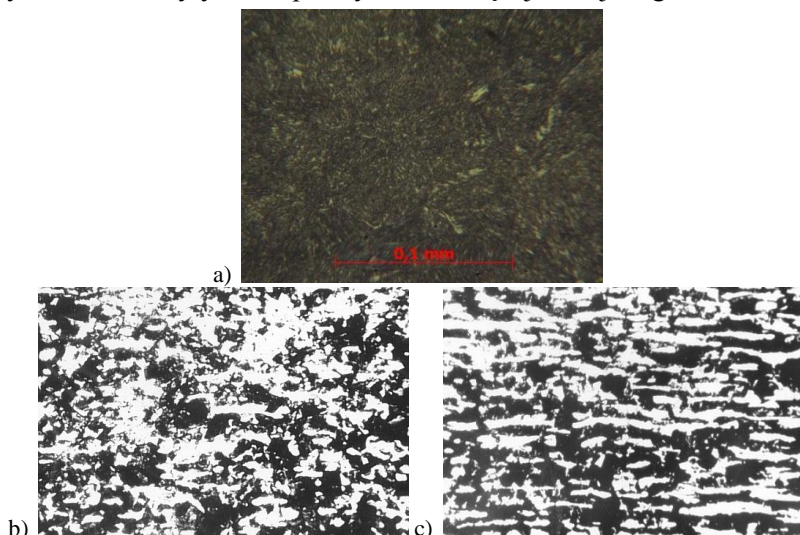
Korozja w trakcie eksploatacji pojazdu znacznie osłabia efekt utwardzania powierzchni, który odbywa się podczas produkcji listew resorowych.

3. Przygotowanie próbek do badania

Przed rozpoczęciem produkcji próbek, dokonano spektralnej analizy składu chemicznego stali za pomocą mikroskopu skaningowego KAMSCAN-4DV. Według źródeł literatury ten mikroskop jest najbardziej odpowiedni do badań. W doświadczeniach określono zmianę właściwości mechanicznych stali 50 XG pod wpływem obciążeń eksploatacyjnych i porównano otrzymane wyniki z właściwościami podobnego materiału źródłowego oraz materiału po wyżarzaniu.

Próbki do badania klinicznego zostały przygotowywane w następujący sposób: główne listwy resorowe (nie eksploatowane oraz eksploatowane) samochodu GAZ-53 zostały rozcięte wzdłuż na dwie części oraz w poprzek na 14 części. Otrzymane fragmenty zostały dostosowane do potrzebnych geometrycznych rozmiarów i czystości powierzchni za pomocą odpowiedniej obróbki mechanicznej. Na wstępnej powierzchni niektórych próbek zostały wykonane szlifowania, na podstawie których metodą badania metalograficznego za pomocą mikroskopu metalograficznego NU-2 otrzymano informację o właściwościach strukturalnych metalu w okolicy przekroju listwy resorowej. Jej elementem konstrukcyjnym przed i po użyciu jest troostyt (rys. 2a), oraz na powierzchni widoczna cienka warstwa paska wydłużonej struktury ziaren ferrytu i perlitu.

Ponadto stwierdzono, iż struktura stali 50XG ma typową strukturę troostytu (rys. 2a) i po rekrytalizacji wyżarzania jest jednorodną mieszaniną drobnych ziaren ferrytu i grubych ziaren perlitycznych rozmiaru około 30 mikronów (rys. 2b, c). Drobniejsze ziarna ferrytu otaczają ziarna perlityczne niejednorodnym rozbitym łańcuchem. Jednak czasami, najczęściej głęboko w listwie, są obszary, w których ziarna ferrytyczne i perlityczne nie są tej samej wagi.

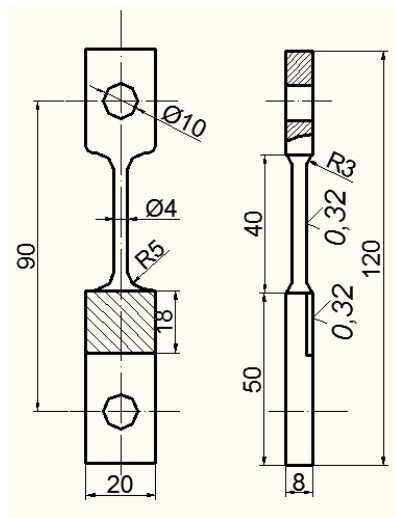


Rys. 2. Struktura ziaren stali 50 XG w stanie początkowym i skumulowanym (a), a także środek listwy (b) i jej górne warstwy po wyżarzaniu

Rozciągają się one poprzecznie na listwie resorowej. Obszary te wskazują na obecność poprzedniej struktury produktów, z których wykonane są listwy resorowe. Utrzymanie w temperaturze austenizacji podczas wyżarzania nie wyklucza formy liniowej [6, 10]. Oczywiście ten fakt wynika z zanieczyszczenia stali resorowej przez siarczki, a także w wyniku topnienia fosforu.

W celu uzyskania bardziej dokładnych danych na temat właściwości mechanicznych, stosowana jest metoda emisji akustycznej (AE) zgodnie z metodyką, która jest opisana w pracach [5, 6, 10].

Próbki są wyprodukowane z geometrii, co przedstawiono na rys. 3. Miejsce dla instalacji przetwornika podstawowego AE oraz obszar pracy części próbki zostały poddane dodatkowemu szlifowaniu i polerowaniu.



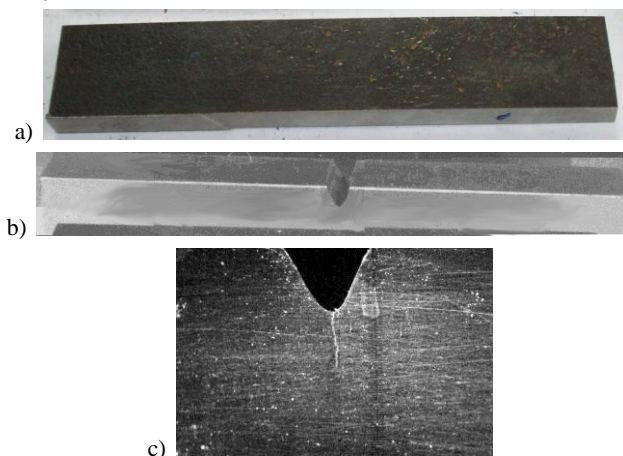
Rys. 3. Próbki do badań (obszar zakreskowany jest miejscem formacji podstawowej przetworników emisji akustycznej (PAE))

4. Metodyka badań

Dla eksperymentalnego wyznaczenia charakterystyki pęknięcia (wiązości pęknięcia) należy wybrać próbkę o racjonalnym kształcie i wymiarze, dokonać utworzenia sztucznego pęknięcia zmęczeniowego, zapewnić wymaganą dokładność obliczenia obciążenia i innych parametrów aby zbudować wykres uszkodzenia. Następnie próbka z wcześniej stworzonym pęknięciem zmęczeniowym niszczy się, a niezbędna informacja zostaje zarejestrowana.

Ponieważ niektóre z właściwości które definiuje i opisuje eksperyment zależą od kształtu i wielkości próbki, badania te powinny być prowadzone w ramach jednej ujednoliconej metodologii w celu porównania wyników. Taka metodyka jest uregulowana w [15] i łączy odpowiednie normy wiodących krajów świata. Dlatego wielkość próbek, ich kształt, obliczenia niezbędnych wskaźników mocy

i inne wskaźniki, podane są zgodnie z wymogami niniejszego dokumentu. Ostatecznie, biorąc pod uwagę rzeczywistą geometrię źródłowej listwy resoru, otrzymano pryzmatyczne próbki o wymiarach: grubość 8, szerokość – 10, długość – 150 mm (rys. 4). Informacja o materiale listwy resorowej, schemat cięcia próbek, skład chemiczny materiału oraz jego stosowanie szczegółowo pokazano w pracy [10].



Rys. 4. Wygląd półproduktu do przygotowania próbek (a), próbka koncentratorów naprężenia (b), otrzymane zmęczenie pęknięcia (c) z górnej części koncentratora

Pęknięcie zmęczeniowe pobranych próbek stali sprężynowej zostało przeanalizowane pod względem obciążeń cyklicznych. Biorąc pod uwagę nasze dane wcześniejsze [10], zadaliśmy wartość naprężenia cyklu z uzależnieniem $\sigma_{co} \leq 0,5\sigma_{02}$, gdzie σ_{co} – maksymalne naprężenie na końcowym etapie pęknięć zmęczeniowych. Przy tym liczba cykli, aby utworzyć pęknięcia zmęczeniowe, nie powinna być mniejsza niż $5 \cdot 10^4$. Spełnienie tych wymagań pozwoliło obliczyć pęknięcia zmęczeniowe z ostrym szczytem, co z kolei pozwoliło nam na uzyskanie poprawnych danych statycznej odporności na pęknięcie materiału.

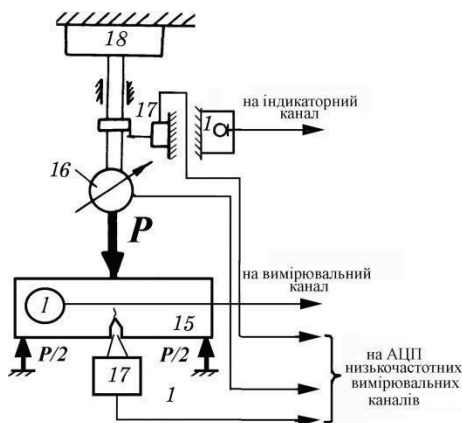
Zgodnie z powyższym, opracowywaliśmy pęknięcia zmęczeniowe w instalacji MC-1, która wyposażona jest w zasoby elektroniczne do pomiaru siły i odkształcenia oraz zapewnia możliwość wyboru odpowiednich parametrów obciążenia lub odkształceń [13].

Wskaźniki pęknięć zmęczeniowych próbek, zastosowane w badaniach doświadczalnych są przedstawione w tabeli 1.

Uwaga. Próbki grupy 1 – wyjściowy materiał listwy resorowej (nie skumulowany); 2 – w stanie ponad 4 lat eksploatacji. Tak więc, tryby obciążenia odpowiadają wymogom standardowym [15]. Rys. 5 przedstawia strukturalny schemat AE-statycznych badań pęknięcia próbek materiałów listwy resorowej o różnym stopniu degradacji.

Tabela 1. Wskaźniki pęknięć zmęczeniowych do badania próbek stali sprężynowej w odniesieniu do odporności statycznej pęknięcia

grupa próbek	1	2
Promień koncentratora ρ , mm	0,165	0,165
Długość pęknięcia l , mm	3,53	3,92
Ilość cykli obciążenia, N	6913	5161
	0	0
Współczynnik asymetrii, R	0,18	0,19
Końcowe naprężenie cyklu σ_{max} , MPa	320	270
Szybkość rozwoju pęknięć na etapie końcowym $v \times 10^{-8}$, m/cykl	5,88	7,63



Rys. 5. Strukturalny schemat badania próbek stali resorowej

Rejestrowane zostały również siła obciążenia P , przemieszczenie indykatora F oraz otwarcie pęknięcia v w czasie rzeczywistym. Dokonano obciążenia za pomocą ustawienia typu *CBP-5* [16]. Należy podkreślić, że w celu maksymalnej eliminacji wpływu przypadkowych sygnałów AE, które mogą być generowane z opory i indykatora podczas badania, próbki przed rozpoczęciem były przetaczane. Następnie doprowadzone do wielkości dominującej nad prawdopodobną maksymalną wartością o 25%, zgodnie z metodyką opisaną w pracach [3, 12].

Następnie, po usunięciu przetoki, przeprowadziliśmy testowanie badanych próbek z prędkością wymaganego obciążenia, reglamentowanych w [15]. Równolegle prowadziliśmy zapis wykresu $P-v$ oraz parametrów sygnałów EA. Wszystkie badania zostały przeprowadzone za pomocą znanej metodyki załączenia równoległego kanału AE (kanał II na rys. 5) [17].

5. Wyniki badań i ich omówienie

Jak wynika z doświadczeń, każda grupa próbek miała różne cechy i funkcje odporności na pęknięcia oraz właściwości promieniowania elastycznych fal AE w czasie rozwoju *makro* pęknięcia. Na rys. 6 pokazany typowy wykres uszkodzenia, zapisanego o współrzędnych P - v i podziału sygnałów AE (uwzględniony interwał w czasie 0,5 milisekund, synchronie z zapisem obciążenia).

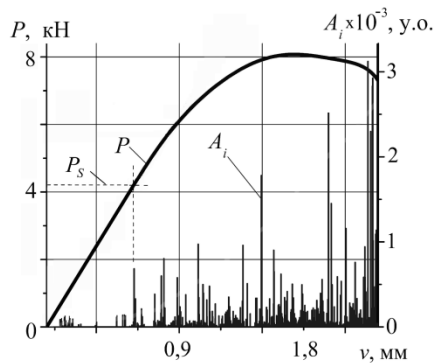
Według wykresu uszkodzenia oraz akustogramu, za pomocą znanej [15] formuły

$$K_{IQ} = (P_Q \times L \times Y_4) / (t \times b \sqrt{b}) \quad (1)$$

zostały zdefiniowane K_{IC} , gdzie P_Q jest obciążenie, które otrzymują 5% cięcia, L – to odległość między oporą próbki, Y_4 – funkcja, w której bierze się pod uwagę stosunek długości pęknięcia l do wysokości próbki b , t – grubość próbki. Wartości Y_4 szukaliśmy przez znane uzależnienie:

$$Y_4 = 1,555[1 - 5,456(l/b)] \quad (2)$$

Po tym, za pomocą zaproponowanej metodyki powyżej, posiadając już wartość P_S , wyznaczyliśmy wielkość K_{IS} w proporcji (1) do (2) jak pokazano na rys. 6.



Rys. 6. Charakterystyczny wykres uszkodzenia P - v , próbek nienapracowanych materiałów, połączony z akustogramem badań

Na podstawie badania 5 próbek dla każdej grupy, możemy uzyskać takie uśrednione statystyczne wyniki eksperymentów: dla próbek z pierwszej grupy $K_{IC} = 93,12 \text{ MPa}\sqrt{\text{M}}$, $K_{IS} = 78,3 \text{ MPa}\sqrt{\text{M}}$, dla próbek drugiej grupy $K_{IC} = 81,13 \text{ MPa}\sqrt{\text{M}}$, $K_{IS} = 62,42 \text{ MPa}\sqrt{\text{M}}$.

6. Wnioski

Eksploatacja od 4 lat resoru samochodu ciężarowego w trybie technologicznym przewozu towarów w warunkach nierówności nawierzchni, zmiany temperatury, środowiska pracy i innych czynników, doprowadziła do degradacji charakterystyki statycznej odporności na pęknięcia (zdefiniowane jako standardowe

metody 5% cięcia i według parametrów sygnałów AE). Jak wynika z wyników badań, pod wpływem wyżej wymienionych czynników fizycznych i mechanicznych, statyczna wiążkość uszkodzenia listwy resorowej zmniejszyła się średnio o 15% K_{Ic} i o 20% dla K_{IS}.

Literatura

- [1] Elboudjaini M., Initiation of environmentally assisted cracking in line pipe steel: 16th European on Fracture (ECF16th), Dordrecht, Springer, 2006, 1007–1008.
- [2] Karpenko H. V., Prochnost' staly v korrozionnoy srede, Moskva-Kyev, Mashhyz, 1963.
- [3] Nazarchuk Z. T., Akustyko-emisyjne diahnostuvannya elementiv konstruktsiy: naukovo-tekhnichnyy posibnyk, t. 3, Kyiv, Nauk. dumka, 2009.
- [4] Panasyuk V. V., Andreykyv A. E., Kharyn V. S., Teoretycheskyy analiz rosta treshchyn v metallakh pry vozdeystvyy vodoroda, Fyz.- khym. mekhanyka mater., № 4, 1981, 61–75.
- [5] Pychkov S. M., Yssledovanye deformyrovanyya obraztsov s vytochkamy metodom akustycheskoy émysyy, Fyzyko–khym. mekhanyka materialov, № 3, 1980, 120–122.
- [6] Skal's'kyy V. R., Akustychno-emisyjne doslidzhennya chutlyvosti do vodnevoyi dehradatsiyi resornoyi stali, Fiz.-khim. mekhanika materialiv, № 4, 1999, 113–119.
- [7] Skal's'kyy V. R., Vlyyanye vodoroda na rastreskyvanye metallov y kontrol' takykh protsessov metodom AÉ, Tekhnich. dyahnostyka y nerazrush. kontrol', № 1, 1995, 52–65.
- [8] Skal's'kyy V. R., Diahnostuvannya mekhanizmiv ruynuvannya stali 38KHN3MFA za veyvlet-peretvorennyam syhnaliv akustychnoyi emisiiyi, Tekhnicheskaya diahnostyka i nerazrushayushchyy kontrol', № 3, 2011, 12–17.
- [9] Skal's'kyy V. R., Vplyv plastychnoyi deformatsiyi konstruktsiynoyi nyz'kovuhletsevoyi stali na parametry syhnaliv mahneto pruzhnoyi akustychnoyi emisiiyi, Naukovi notatky. Mizhvuzivs'kyy zbirnyk (za napryamom «Inzhenerna mekhanika»), Vypusk 31, 2011, 354–358.
- [10] Skal's'kyy V. R., Vplyv tryvalykh ekspluatatsiynykh navantazhen' na zminu mekhanichnykh kharakterystyk resornoyi stali, Naukovi notatky. Mizhvuzivs'kyy zbirnyk (za napryamom «Inzhenerna mekhanika»), Vypusk 33, 2011, 220–226.
- [11] Skal's'kyy V. R., Metodyka otsinky statychnoyi trishchynostiystki, Tekhnolohichni komplekxy, 1, 2 (5, 6), 2012, 169–175.
- [12] Skal's'kyy V. R., Akustychna emisiya pid chas ruynuvannya materialiv, vyrobiv i konstruktsiy. Metodolohichni aspekty vidboru ta obrobky informatsiyi, L'viv, Spolom, 2005.
- [13] Skal's'kyy V. R., Tolopko YA. D., Velykyy P. P., Halan P. YA., Lyasota I. M., Ustanovka dlya doslidzhennya vtomnoho ruynuvannya metodom akustychnoyi emisiiyi, Fizychni metody ta zasoby kontrolyu seredovyshch materialiv ta vyrobiv (seriya), Neruynivnyy kontrol' materialiv i konstruktsiy, vyp. 14, 2009, 43–49.
- [14] Fyshhoyt A. V., Kolachev B. A., Rasprostraneniye treshchyn v navodorozhennom metalle pry ploskoy deformatsyy, № 4, 1981, 76 – 81.

- [15] HOST 25.506–85. Raschety y yspytaniya na prochnost'. Metody mekhanicheskikh yspytaniy metallov. Opredeleniye kharakterystyk treshchyno-stoykosti (vyazkosti razrusheniya) pry statycheskom nahruzhenni. Vved. v deystviye 27.03.1985 h., Moskva, Yzd. ctandartov, 1985.
- [16] Skal's'kyy V. R., Klym B. P., Halan P. YA., Matviyiv YU. YA., Lyasota I. M., Universal'na malohabarytna navantazhuval'na ustanovka dlya vyprobuvan' zrazkiv konstruktsiynikh materialiv, Patent Ukrayiny na korysnu model' №55217. MPK (2009): G01N3/00; G01N3/20, Opubl. 10.12.2010r., Byul. № 23.
- [17] Andreykiv O. YE., Skal's'kyy V. R., Lysak M. V., Sposib kontrolyu rostu trishchyn u zrazkakh materialiv, Patent Ukrayiny № 2914, MPK: G01N29/14, Opubl. 26.12.94r., Byul. 5.

dr inż. Oleksander Dubyckij
e-mail: dubytskyi.olexandr@yandex.ua

Oleksander Dubyckij, doktor nauk technicznych, starszy wykładowca na Wydziale Samochodów i Maszyn Roboczych na Łuckim Narodowym Uniwersytecie Technicznym. Zakres zainteresowań naukowych to mechanika twardego materiału odkształcalnego, opracowanie metody pochodzenia i rozwoju zniszczenia elementów podwozia samochodu. Autor około 20 prac naukowych.



ACOUSTIC EMISSION ESTIMATION OF THE CHANGES OF SPRING STEEL FRACTURE TOUGHNESS DURING VEHICLE EXPLOITATION

Abstract. *The results of a study of changes in the strength characteristics of spring steel of truck main spring leaf during its exploitation are presented in the article. It is shown that due to the particular structure of the material and technology of production spring steel changes its properties during its exploitation in small limits. Acoustic emission measure of material damage increases even more significantly.*

Keywords: *spring, acoustic emissions*



Видання розповсюджується безкоштовно.

Проект IPBU.03.01.00-06-386/11-00

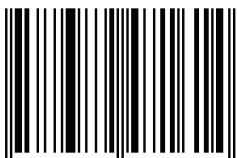
ПЛ-НТУ Транскордонний обмін досвідом є співфінансований
в рамках Програми транскордонного співробітництва
Польща – Білорусь – Україна 2007–2013
фінансованого за рахунок коштів Європейського Союзу в рамках
Європейського Інструменту Сусідства та Партнерства

Publikacja dystrybuowana bezpłatnie.

Projekt IPBU.03.01.00-06-386/11-00

PL-NTU Transgraniczna wymiana doświadczeń jest współfinansowany
w ramach Programu Współpracy Transgranicznej
Polska – Białoruś – Ukraina 2007–2013
finansowanego ze środków Unii Europejskiej w ramach
Europejskiego Instrumentu Sąsiedztwa i Partnerstwa

ISBN: 978-83-7947-161-4



9 788379 471614