

УДК 629.114

*І.І. Заліско, аспірант КНУБА***МЕТОДИКА ТА АЛГОРИТМ РОЗРАХУНКУ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ МЕТАЛОКОНСТРУКЦІЙ АВТОКРАНІВ**

Актуальність та аналіз проблеми. Металеві конструкції автокранів як правило працюють в режимі випадкового (нерегулярного) навантаження і підлягають накопиченню втомних пошкоджень в процесі експлуатації. Із спільного числа руйнувань (крихких, в'язких, від втрати місцевої або спільної непохитності, корозії та ін.) доля втомних складає більше 70%.

Основним виглядом втомленого пошкодження являється поява і розвиток тріщини. довговічність при втомленому руйнуванні визначається сумою циклічних довговічностей на стадії накопичення втомлених пошкоджень, в результаті яких утворюється видима тріщина, і стадії розвитку тріщини до критичного розміру, при досягненні якого відбувається крихке руйнування. Втомлена довговічність на стадії розвитку тріщини називається живучістю. На стадії утворення втомленої тріщини слід розрізняти дві можливі області накопичення пошкоджень: область багатоциклічної і малоциклічної втоми.

Руйнування в області багатоциклічної втоми супроводжується накопиченням мікроскопічних деформацій, розвитком мікротріщин до видимих макротріщин; при цьому число циклів навантаження до появи видимої тріщини (2-3 мм) досягає $10^4 - 10^5$, а напруга змінюється в межах упругих деформацій.

Для області малоциклічної втоми характерне накопичення втомлених пошкоджень і пластичних деформацій. Ця область розташовується в діапазоні $10^3 < N < (10^4 - 10^5)$ циклів навантажень. Руйнування відбувається за умови повторної упругої деформації. Необхідність оцінки довговічності в області малоциклічної втомленості металоконструкцій будівельних і дорожніх машин пов'язана в основному із створенням конструкцій малої питомої металоемності і збільшенням відносно їх навантажень та застосування універсальних програм для розрахунку напружено-деформованого стану.

Методика та результати рішення задач напружено-деформованого стану (НДС) при дослідженнях зводиться до формування й розв'язку матричного рівняння рівноваги системи виду:

$$[K] \cdot \{\delta\} = \{F\}, \quad (1)$$

де $[K]$ – матриця жорсткості системи; $\{\delta\}$ й $\{F\}$ – вектори вузлових переміщень та навантажень.

При розв'язуванні рівняння (1) визначають переміщення й реакції у вузлах скінченно-елементної моделі. Однак цих результатів недостатньо для формування уявлення про НДС металоконструкцій автокрану, тому результати розрахунків у подальшому обробляються вручну. Конструкції автокранів як правило є незручними для ручної підготовки даних, оскільки, по-перше, вони складаються з великого числа деталей, а по-друге, деталі, що складають металоконструкцію, довільно орієнтовані по відношенню до загальної системи координат, у котрій описується конструкція, що знаходиться наприклад, під кутом до повздовжньої вісі машини.

При пошуку раціонального конструктивного рішення металоконструкції автокрану виникає необхідність модифікувати первісну модель, додаючи чи виключаючи деякі деталі, змінюючи розміри елементів чи групові розміри моделі. Подібні дії вимагають часткової, чи повної переробки вихідних даних, що при їх ручній підготовці призводить до чисельних помилок й вимагає значних витрат праці.

Для прискорення підготовки вихідних даних й аналізу результатів розрахунків доцільно робити засоби автоматизації металоконструкцій автокранів.



Можлива послідовність дій при формуванні скінченно-елементних моделей подана на схемі. Металоконструкції автокрану розчленовано на збірні вузли й деталі. Із сукупності деталей обираються основні й похідні, котрі можуть бути отримані різноманітними перетвореннями основних деталей (змінюю деяких розмірів, додаванням елементів та ін.), після цього формуються скінченно-елементні моделі основних деталей автокрану (наприклад опорно-поворотного кругу).

Перетворення координат:

$$\begin{Bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} Scx & 0 & 0 \\ 0 & Scy & 0 \\ 0 & 0 & Scz \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} x \\ y \\ z \end{Bmatrix}, \quad (2)$$

де x, y, z – координати вузла до перетворення; x', y', z' – координати вузла після перетворення; scx, scy, scz – коефіцієнти розтягу вповдовж вісей x, y, z , дозволяють змінювати розміри моделі й отримувати моделі конструкцій автокранів шляхом дзеркального відображення вихідних моделей відносно площин $хоу, хоз, уоз$.

Після того, як описані основні й отримані похідні підконструкції автокрану, здійснюється збирання моделі. Об'єднувані підконструкції можуть розміщуватись у системі координат довільно й для з'єднання їх необхідно зсунути чи повернути таким чином, щоб співпали відповідні опорні поверхні, грані та точки, які належать обом підконструкціям. Подальше перетворення координат призводить до зсуву скінченно-елементних моделей підконструкцій паралельно вісям X, Y, Z й до повороту відносно довільної точки простору:

$$\begin{Bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} c\varphi_y c\varphi_z & -s\varphi_z & s\varphi_y \\ s\varphi_z & c\varphi_x c\varphi_z & -s\varphi_x \\ -s\varphi_z & s\varphi_x & c\varphi_x c\varphi_y \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} (x - x_0) \\ (y - y_0) \\ (z - z_0) \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} (x_c + x_0) \\ (y_c + y_0) \\ (z_c + z_0) \end{Bmatrix}, \quad (3)$$

де x_c, y_c, z_c – переміщення вздовж вісей x, y, z ; x_0, y_0, z_0 – координати центру повороту; $\varphi_x, \varphi_y, \varphi_z$ – кути повороту відносно вісей, паралельних вісям x, y, z й такі, що проходять через центр повороту, тут замість \sin та \cos введені позначення s та c .

Положення підконструкцій у просторі одночасно визначається трьома точками, які називаються базовими, котрі не лежать на одній прямій й належать підконструкції. Об'єднувані базові точки є вузлами скінченно-елементних моделей підконструкцій. Для геометричного об'єднання підконструкцій необхідно і достатньо, щоб координати відповідних базових вузлів об'єднаних підконструкцій співпали. При цьому положення у просторі однієї з підконструкцій (базової) не змінюється, а координати вузлів моделі під'єднуваної підконструкції приводять до базової системи координат.

У загальному випадку число об'єднаних вузлів, що належать кожній з підконструкцій, може бути більше трьох. З них у якості базових обирають три вузла, що не належать одній прямій. Якщо всі об'єднувані вузли лежать на одній прямій, або число об'єднаних вузлів менше трьох, автоматичне обчислювання параметрів перетворення координат приєднуваної підконструкції нездійснене. У цьому випадку приведення координат об'єднаних підконструкцій до однієї системи слід виконувати вручну, за допомогою перетворення (3).

Якщо конструкція автокрану зводиться до шарнірно-зчленованого механізму замикаючими ланцюгами змінної довжини, зокрема, гідроциліндрами, такий механізм необхідно розділити на ланцюги, для кожного з котрих виконуються геометричні перетворення за допомогою рівняння (3). Після перерахування координат всіх ланцюгів збирається модель. При цьому фактично новим є тільки масив опор координат вузлів. Управління перетворення координат здійснюється автоматично або вручну. Програму перетворення координат ланцюгів розроблено для кожного конкретного механізму автокрану. Засобом контролю на всіх етапах підготовки вихідних даних є графічне зображення моделі.

Найбільш швидким способом розв'язку матричного рівняння (1) є прями метод виключення невідомих з автоматичною нумерацією вузлів скінченно-елементної моделі [1]. Аналіз існуючих методів автоматичної нумерації вузлів, проведений у роботі [2], показав, що ітераційні алгоритми хоча і є найбільш розповсюдженими, не дозволяють отримати задовільне рішення (розв'язок) для моделі пластини, яка пронумерована в подовж довгої сторони [3] – випадку, найбільш характерного для моделей автокранів. Алгоритм [4] дозволяє розв'язувати цю задачу, і є зараз найбільш ефективним для моделей металоконструкцій автокранів (рис. 1).

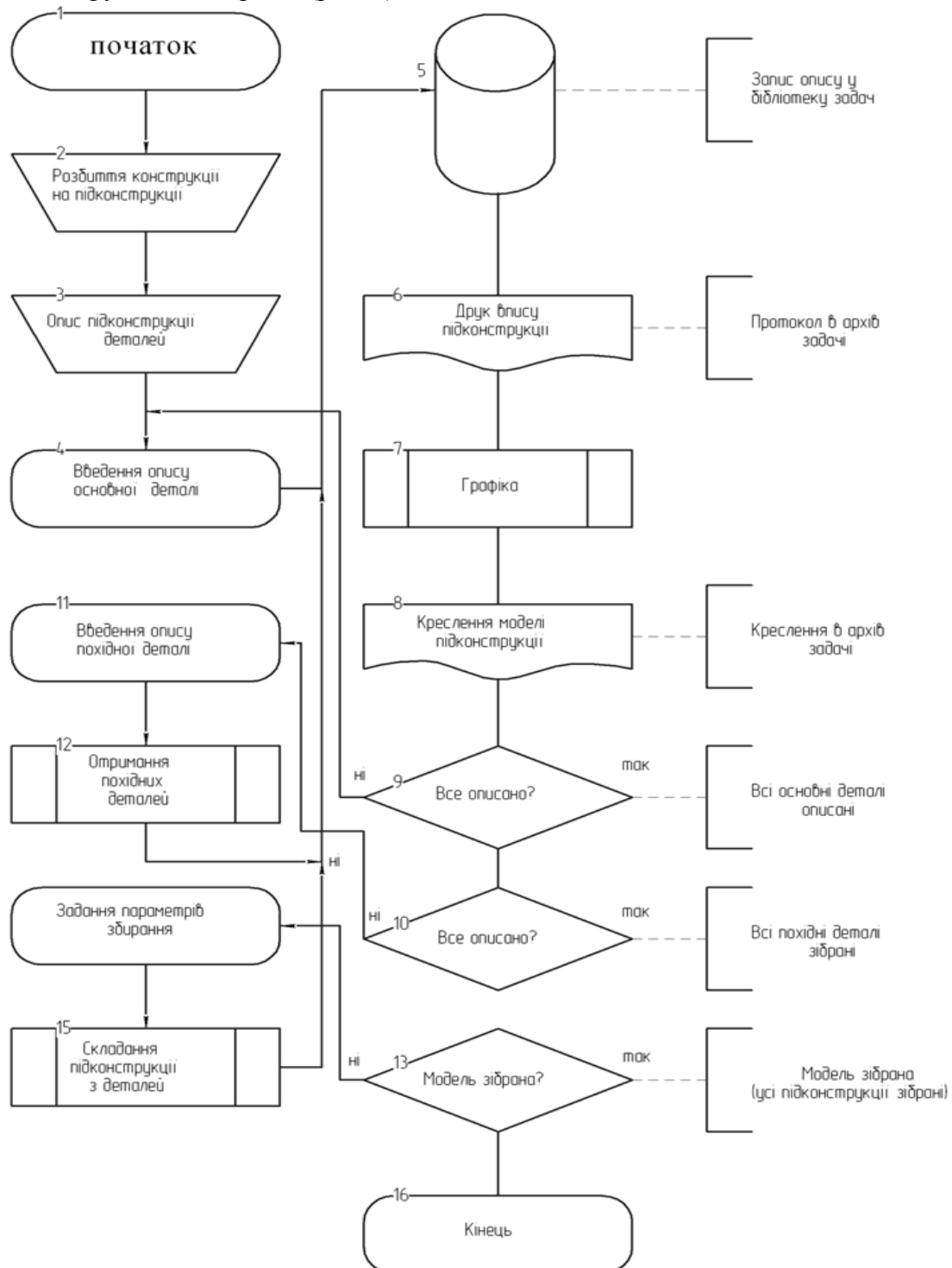


Рисунок 1. Блок-схема алгоритму формування складних скінченно-елементних моделей автокранів.



Заключним етапом розрахунку НДС металокопструкцій автокранів є аналіз результатів. На цьому етапі оцінений напружений стан у точці металокопструкцій (у даному випадку в елементі) й напружений стан всієї металокопструкції. Об'ємний напружений стан у точці копструкції визначається через еквівалентне напруження. При цьому результати розрахунків легко аналізувати.

Еквівалентні напруження у стрижнях типових перерізів (прямокутних та трикутних, суцільних або тонкостінних замкнених) за четвертою теорією міцності [5] обчислюють за допомогою формули:

$$\delta_e = \sqrt{\delta^2 + 3\tau^2}. \quad (4)$$

Спочатку визначаємо напруження у кількох точках, які лежать по зовнішньому периметру перерізів на початку й кінці стрижня. З отриманих значень обирають найбільше.

Для оцінки напруженого стану пластин використовуємо приведене октаєдричне напруження [5]:

$$\delta_e = \sqrt{\delta_1^2 + \delta_2^2 - \delta_1 \cdot \delta_2}, \quad (5)$$

де δ_1, δ_2 – головні напруження.

Розрахункові напруження, діючі у центрі маси пластини на верхній та нижній гранях. З отриманих значень обирають найбільше.

Для оцінки завантаженого елемента можна використати коефіцієнт завантаження елемента щодо можливого (припустимого) напруження:

$$k_{ei} = \frac{\delta_{ei}}{[\delta_i]}, \quad (6)$$

де δ_{ei} – максимальне напруження, діюче в елементах; $[\delta_i]$ – припустиме напруження для елемента i .

Середнє напруження у моделі ($\bar{\delta}_e$) й середній коефіцієнт завантаження моделі металокопструкції (\bar{k}_e) дозволяють оцінити завантаженість металокопструкції в цілому для одного навантаження:

$$\bar{\delta}_e = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \delta_{ei}; \bar{k}_e = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n k_{ei}, \quad (7)$$

де n – число елементів у моделі.

Аналогічно показники введені для оцінки напруженого стану металокопструкції при декількох навантаженнях:

$$\bar{\delta}_e^{\max} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \delta_{ei}^{\max}; \bar{k}_e^{\max} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n k_{ei}^{\max}, \quad (8)$$

де δ_{ei}^{\max} – найбільше серед навантажень (всіх) напружень у елементі i ; k_{ei}^{\max} – найбільший серед всіх навантажень коефіцієнт завантаження елемента i :

$$k_{ei}^{\max} = \frac{\delta_{ei}^{\max}}{[\delta_i]}. \quad (9)$$

Креслення моделі у деформованому стані з виділенням на ньому «перевантажених» й «малонавантажуваних» елементів є найбільш природною формою представлення результатів аналізу НДС металокопструкцій автокранів. Гістограми розподілу числа елементів по інтервалам завантаження δ_e, k_e дозволяють визначити характер навантажень металокопструкцій (рівномірна вона чи ні і т.п.).

З метою реалізації описаного алгоритму розроблений комплекс програм для скінченно-елементних моделей й аналізу результатів розрахунку напружено-деформованого стану складних металокопструкцій автокранів. У комплекс входять програми, які мають наступне призначення: складання моделі з під копструкцій; розбірка моделей на під копструкції; поворот – перенесення системи координат під копструкцію чи

моделі в цілому; розтяг – стиснення підконструкції чи всієї моделі впродовж вісей x, y, z (отримання дзеркальних відображень); розрахунок маси моделі; розрахунок напружень у елементах; аналіз напружень; графічне зображення моделі та результатів НДС.

Зв'язок між програмами комплексу здійснюється через набори даних. Для всіх наборів даних (вхідних і вихідних) і, зокрема, для опису скінченно-елементної моделі, прийнятий єдиний (уніфікований) формат. Для зв'язку з програмою дані уніфікованого формату перетворюються у вхідний формат програми, а результати розрахунку – в уніфікований формат за допомогою спеціальних програм перекодування – обміну. Цим самим досягається незалежність комплексу від конкретної програми.

Висновки.

1. Досвід експлуатації металоконструкцій автокранів при аналізі НДС показує адекватність результатів отриманих при розрахунках і в реальних конструкціях.
2. Застосування розробленої методики дозволяє здійснювати аналіз металоконструкцій автокранів та автоматизувати їх розрахунок.

Література

1. Ряхин В.А. Прогнозирование ресурса металлических конструкций строительных и дорожных машин. «Строительные и дорожные машины», М., Стройиздат, 1994, №4 с. 24-27.
2. Писаренко Г.С., Яковлев А.П., Матвеев В.В. Справочник по сопротивлению материалов. – К.: Наукова думка, 1988. – 736с.