

Машина і обладнання технологічних процесів будівельної індустрії

УДК 629.114

I.I. Назаренко, д.т.н., проф.,

I.I. Заліско, аспірант,

С.В. Коваленко, аспірант

Київський національний університет будівництва і архітектури

МЕТОДИКА ТА АЛГОРИТМ РОЗРАХУНКУ НАПРУЖЕНО – ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ МЕТАЛОКОНСТРУКЦІЙ АВТОКРАНІВ

АНОТАЦІЯ. В роботі на основі теоретичних та експериментальних досліджень розроблена методика та алгоритм розрахунку напружено-деформованого стану металоконструкцій автокранів.

Ключові слова: методика, розрахунок, металоконструкції, автокран.

АННОТАЦИЯ. В работе на основе теоретических и экспериментальных исследований разработана методика и алгоритм расчета напряженно-деформированного состояния металлоконструкций автокранов.

Ключевые слова: методика, расчет, металлоконструкции, автокран.

SUMMARY. In this paper, based on theoretical and experimental research developed a method and algorithm for calculating the stress-strain state of metal cranes.

Key words: methods, design, metal, mobile crane.

Аналіз та актуальність проблеми. Металеві конструкції автокранів як правило працюють у 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 тріщин до критичного розміру, при досягненні якого відбувається крихке руйнування. Втомлена довговічність на стадії утворення втомленої тріщини слід розрізняти дві можливі області накопичення пошкоджень: область багатоциклічної і мало циклічної 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 пружних деформацій.

До області мало циклічної 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 пружної пластичної деформації. Необхідність оцінки довговічності в області мало циклічної втомленості металоконструкції будівельних і дорожніх машин пов'язана в основному із створенням конструкції малої питомої металоємності і збільшенням відносно їх навантажень та застосування універсальних програм для розрахунку напружено – деформованого стану.

Методика та результати. Рішення задач при дослідженні напружено – деформованого стану (НДС) 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 металокопструкцій автокрану, тому результати розрахунків у подальшому оброблюються вручну. Копструкції автокранів є як правило незручними для ручної підготовки даних, оскільки, по – перше вони складаються з великого числа деталей, а по – друге деталі, що складають металокопструкцію, довільно орієнтовані по відношенню до загальної системи координат, у котрій описується копструкція, що знаходиться, наприклад, під кутом до поздовжньої вісі машини.

При пошуку раціонального копструктивного рішення металокопструкції 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 розробити засоби автоматизації металокопструкцій автокранів.

Можлива послідовність дій при формуванні скінченно – елементних моделей подана на схемі. Металокопструкція автокрану розчленована на збірні вузли і деталі. Із сукупності деталі й збірних вузлів обираються основні й похідні, котрі можуть бути отримані різноманітними перетвореннями основних деталей (змінюючи деяких розмірів, додаванням елементів та ін.). Після цього формується скінченно – елементні моделі основних деталей автокрану (наприклад опорно - поворотного кола).

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 впродовж вісей x, y, z , дозволяють змінювати розміри моделі й отримувати моделі копструкцій автокранів шляхом дзеркального відображення вихідних моделей відносно площин xoy, xoz, yoz .

Після того, як описані основні й отримані похідні підкопструкції автокрану, здійснюється збирання моделі. Об'єднувані підкопструкції можуть розміщуватися 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 підкопструкціям. Подальше перетворення координат призводить до зсуву скінченно – елементних моделей підкопструкції 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 впродовж вісей x, y, z ; x_0, y_0, z_0 – координатам центру повороту; $\varphi_x, \varphi_y, \varphi_z$ - кут повороту відносно вісей паралельних вісям x, y, z й таким, що проходять через центр повороту, тут замість \sin та \cos введені позначення s та c .

Положення підкопструкції у просторі одночасно визначається трьома точками, які називаються базовими, котрі не лежать на одній прямій й належать підкопструкції. Об'єднувані базові точки є вузлами скінченно – елементних моделей підкопструкції. Для геометричного об'єднання підкопструкції необхідно й достатньо, щоб координати відповідних базових вузлів об'єднаних підкопструкцій співпали. При цьому положення у

просторі однієї з підконструкції (базової) не змінюється, а координати вузлів моделі приєднуваної конструкції 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 вибирають три вузла, що не лежать на одній прямій, або число об'єднаних вузлів менше трьох, автоматичне обчислювання параметрів перетворення координат приєднуваної підконструкції нездійсненне. 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 опору координат вузлів. Управління 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 прямий 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'язати цю задачу, і є зараз найбільш ефективним для моделей металоконструкцій автокранів (рис.1).

Заключним етапом розрахунку НДС металоконструкцій автокранів є аналіз результатів. На цьому етапі оцінений напружений стан у точці металоконструкції (у даному випадку в елементі) й напружений стан всієї металоконструкції. Об'ємний напружений стан у точці конструкції 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 завантаженого елемента можна використати коефіцієнт завантаження елемента щодо можливого (припустимого) напруження [5].

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

де δ_1^2, δ_2^2 - головні напруження.

Розраховані 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 елементі; $[\delta_i]$ - припустиме напруження для елемента i .



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

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

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

де n - число елементів у моделі.

Аналогічні показники введені для оцінки напруженого стану металоконструкції при декількох навантаженнях:

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

де $\bar{\delta}_e^{\max}$ - найбільше серед навантажень (всіх) напружень у елементі i ; \bar{k}_e^{\max} - найбільший серед всіх навантажень коефіцієнт завантаження елементу i .

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

З метою реалізації описаного алгоритму розроблений комплекс програм для скінченно – елементних моделей й аналізу результатів розрахунку напруженого – деформованого стану складних металоконструкцій автокранів. У комплекс входять програми, які мають наступне призначення: складання моделі з підконструкцій; розробка моделей на підконструкції; поворот – перенесення системи координат підконструкції 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 аналізу 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 з уніфікованого формату перетворюються у вхідний формат програми, а результати розрахунку – в уніфікований формат зв допомогою спеціальних програм перекодування – обміну. Цим самим досягається незалежність комплексу від конкретної програми.

Висновки.

1. Досвід експлуатації розробленого алгоритму і програм на аналізі НДС металоконструкцій автокранів «Дрогобицького заводу автокранів», показує що в процесі підготовки вихідних даних та аналізу результатів розрахунку значно пришвидшуються й спрощуються.
2. Застосування розробленої методики дозволяє суттєво скоротити ручну працю при аналізі металоконструкцій автокранів та автоматизувати їх розрахунок.

Література

1. Бате К., Вилсон Е. Численные методы анализа и метод конечных элементов. – М.: Стройкздат, 1982 – 448 с.
2. Норри Д., де Фриз Ж. Введение в метод конечных элементов. – М.: Мир, 1981 – 304 с.
3. Barlow I., Marples C.G. Comment on an automatic noderelabelling scheme for bandwidth, minimization of stiffness matrices //AIAA J. – 1969 – Vol. 7, No 2 – P. 380 – 382.
4. Gibbs N.E., Pool W.G., Stockmeyer I.K., Stockmeyer P.K. An algorithm for reducing the bandwidth and profile of sparse matrix //SIAM J. Numer. Anal.– 1976 – Vol. 19, No 2 – P. 236 – 250.
5. Писаренко Л.С., Яковлев А.П., Матвеев В.В. Справочник по сопротивлению материалов. – К.: Наукова думка, 1975 – 704 с.