

resistant tool materials with wear-resistant coatings applied to them, which provide a high cutting ability of the blade tools. It is also possible to reduce elastic displacements during grinding by increasing the grain size of the wheel, provided that the cut-off values of the thickness of the cut to the radius of curvature of the top of the cutting grain are achieved. Significant reserves of increase of efficiency of grinding of materials which are connected with reduction of radii of rounding of tops of abrasive grains of a circle due to realization of a mode of self-sharpening of a wheel or its effective correction are opened. It is theoretically proved that in this case the components of cutting forces and conditional cutting stress are significantly reduced, and this allows to reduce the elastic displacements that occur in the technological system, and, accordingly, to increase the accuracy and quality of processing. The theoretical solutions presented in the work have been comprehensively experimentally confirmed and have been widely tested and implemented in production. Thanks to their application, it was possible to radically solve the problem of improving the accuracy and quality of processing in a number of machining operations, to make the transition from traditional to new technologies implemented using modern machines and tools with significant technological capabilities.

Keywords: *finishing, grinding, elastic movements, technological system, blade and abrasive tools, wear-resistant coatings.*

*Рекомендовано до публікації: д-р техн. наук, проф. ДВНЗ «ПДТУ» Самотугін С.С.
Стаття надійшла 19.05.2020 р.*

УДК 621.875

Сагіров Ю. Г.¹, Суглобов В. В.²

МЕТОДОЛОГІЧНІ ОСНОВИ ЗАСТОСУВАННЯМ ТОПОЛОГІЧНОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ ТА ГЕНЕРАТИВНОГО ДИЗАЙНУ ДЛЯ УДОСКОНАЛЕННЯ НЕСУЧИХ ЕЛЕМЕНТІВ ПОРТАЛЬНИХ КРАНІВ

Розроблення оптимізаційних методологій створення та удосконалення елементів порталних кранів, розвинення розрахунків на міцність є важливим науково-технічним завданням, рішення якого дозволить підвищити конкурентоспроможність на глобальному рівні, безпеку експлуатації підйомно-транспортних машин (ПТМ). Метою даної роботи є розроблення методології створення та удосконалення несучих елементів вантажопідйомних машин із застосуванням відомих інженерних методів проєктування металоконструкцій ПТМ, топологічної оптимізації та генеративного дизайну на прикладі порталного крана. Об'єктом дослідження є закономірність розподілу матеріалу в конструкції з урахуванням рівня напруженості в ньому. У статті наведено результати: моделювання навантаженого стану металоконструкцій, аналізу їхнього напружено-деформованого стану, топологічної оптимізації, генеративного дизайну.

Наведено твердотільно-деформовану модель та виконаний розрахунок методом скінченних елементів у CAD/CAM/CAE системі. Отриманий закон розподілу напружень в

¹ канд. техн. наук, доц., ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь

² д-р техн. наук, проф., ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь

Машинобудування і зварювальне виробництво

елементах металокопструкцій наочно показав, що розташування металу (елементів металокопструкцій) є неефективним та потребує оптимізації; напружено-деформований стан елементів є досить складним і вимагає додаткових досліджень; застосування топологічної оптимізації на етапі проектування дає можливість створювати оптимальні копструкції, а на стадії експлуатації удосконалювати, чи підвищувати надійність та довговічність; використання генеративного дизайну на стадії проекту дозволяє отримати металокопструкцію оптимальну, за рівнем та розподілом напружень, розташуванням матеріалу.

Ключові слова: топологічна оптимізація, гомогенізація, генеративний дизайн, еволюція, порталний кран, металокопструкція, метод скінченних елементів, критерії.

Постановка проблеми.

Передові виробничі технології, системи комп'ютерного інжинірингу та оптимізації з застосуванням біонічного дизайну стають невід'ємною частиною сучасної промисловості і дозволяють створювати глобально конкурентоспроможну продукцію в найкоротші терміни. Ефективність та технічний рівень розроблених підйомно-транспортних машин в значній мірі залежить від застосування раціональних структур і параметрів елементів металокопструкції під час проектування. Особливо актуальним це є для порталних кранів, оскільки вага корисного вантажу в них становить всього до 11 % від ваги копструкції самого крана, тоді як, наприклад, у мостових кранах ця цифра сягає 50 %.

Сучасний стан та перспективи оптимального проектування металокопструкцій невід'ємно пов'язані з використанням сучасних CAD/CAM/CAE систем, які дають змогу ще на початкових етапах проектування знаходити найкращі конструктивні рішення шляхом застосування топологічної оптимізації та генеративного дизайну.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Абстрактний еволюційний структурний метод оптимізації (Evolutionary Structural Optimisation – ESO,) досить ефективно розвивається останні десятиріччя [1-5].

Нині відомі наступні основні методи: SIMP (твердий ізотропний матеріал з пеналізацією), ESO (еволюційна структурна оптимізація) і Level-Set (метод встановлення рівня) і їх різні комбінації. Ці методи мають особливості, але в той же час тісно пов'язані між собою.

Метод ESO заснований на визначенні рівня напружень в довільній частині копструкції методом скінченних елементів. Індикатором неефективного використання матеріалу є низький рівень напружень (чи деформацій) в тій або іншій частині копструкції. У ідеалі рівень напружень в копструкції має бути однаковим, близьким до граничного, але безпечного значення.

З цієї концепції виходить принцип видалення матеріалу, згідно з яким недостатньо навантажений матеріал може бути видалений, що призводить до видалення окремих елементів звичайно-елементної моделі.

Рівень напруженості кожного елемента визначається порівнянням, наприклад, σ_e^M напруження Мізеса цього елемента з критичним або максимальним значенням σ_{\max}^M напруження Мізеса в копструкції. Якщо в результаті звичайно-елементного аналізу елемент задовольняє умові:

$$\frac{\sigma_e^M}{\sigma_{\max}^M} < R_{Ri}, \quad (1)$$

де R_R – граничне значення (коефіцієнт відбракування), при якому матеріал видаляється.

Функція чутливості вказує на збільшення середньої податливості в результаті видалення i -го елемента, рівної елементарної енергії деформації i -го елемента

Серед варіантів методу ESO, сходий та незалежний від сітки метод двонаправленої еволюційної структурної оптимізації (Bidirectional Evolutionary Structural Optimization – BESO) [6], який дає можливість як видаляти так і додавати матеріал у конструкції. Він став широко прийнятою методологією проектування, як для академічних досліджень, так і інженерним додатком, через його ефективність та і помилкостійкість. Значного розвитку вище названі методи отримали водночас із революційним розвитком комп'ютерної техніки та адитивних технологій, просуванням чисельних методів моделювання.

Також популярним математичним методом для оптимізації топології є метод твердого ізотропного матеріалу з пеналізацією (Solid Isotropic Material with Penalization – SIMP). Метод SIMP був спочатку запропонований Bendsøe і Kikuchi [2]. Метод SIMP прогнозує оптимальний розподіл матеріалів в межах вказаного проектного простору для представлених випадків навантажень, граничних умов, виробничих обмеження і вимог продуктивності.

Відповідно до Bendsøe [3]: «Оптимізація форми в найзагальнішому сенсі повинна включати в собі визначення для кожної точки в просторі незалежно від знаходження матеріалу в цій точці». Традиційний підхід до оптимізації топології — це розділення області на сітку скінченних елементів, яка називається ізотропною безперервною мікροструктурою. Кожен елемент заповнюється матеріалом для областей, яким потрібно матеріал, або не містить матеріалу для областей, де можна видаляти матеріал (представлення порожнеч). Розподіл щільності матеріалу у рамках проектного домену, ρ , є дискретним, а кожному елементу призначається двійкове значення:

1. $\rho_{(i)} = 1$, де потрібно залишити (додати) матеріал;
2. $\rho_{(i)} = 0$, де матеріал видалений.

Наприклад, на зображенні (рис. 1) представлений оптимізований макет частини (балка, опора та ригель) звантаженої моделі металокопструкції порталного крану (скінченно-елементний простір Ω). Тверді елементи з щільністю $\rho_{(i)} = 1$ (елементи присутні) та порожнини з $\rho_{(i)} = 0$ (елементи видалені).

Представлення постійної функції розподілу відносної щільності уникає появи двійкових помилок двопозиційної природи. Для кожного елемента призначена відносна щільність може відрізнитися між мінімальним значенням ρ_{\min} (мінімальне допустиме значення відносної щільності для порожніх елементів більше нуля) і 1, що дозволяє призначати елементам проміжну щільність (характеризуються як пористі елементи). Це значення щільності забезпечує числову стабільність аналізу скінченних елементів.

Оскільки відносна щільність матеріалу може безперервно змінюватись, модуль Юнга матеріалу на кожному елементі може також постійно змінюватись. Для кожного елемента « i » є зв'язком між коефіцієнтом відносної щільності матеріалу ρ_i і модулем Юнга для пружності, призначеній ізотропній моделі матеріалу E_0 , що обчислюється ступеневим законом [7]:

$$E_{(\rho_i)} = \rho_i^v E_0 \quad (2)$$

Поправка на втрати ρ знижує вклад елементів з проміжною щільністю до загальної жорсткості та контролює рішення оптимізації для елементів, які представлені суцільним кольором ($\rho_e = 1$) або порожнім ($\rho_e = \rho_{\min}$). Існуючий опит показує, що прийнятним є значення поправки на втрати $\rho = 3$.

Зменшення модуля еластичності матеріалу елемента веде до зменшення жорсткості елемента. З урахуванням методу SIMP глобальна жорсткість модулюється відповідно до:

$$K_{SIMP(\rho_i)} = \sum_{e=1}^N [\rho_{\min} + (1 - \rho_{\min}) \cdot \rho_e^v] K_e, \quad (3)$$

де K_e – це матриця жорсткості елемента;

ρ_{\min} – мінімальна відносна жорсткість;

ρ_e – відносна щільність елемента;

ρ – поправка на втрати;

N – кількість елементів в домені проектування.

У методі SIMP область проектування Ω дискретизується за допомогою скінченних елементів. Властивості матеріалу постійні в кожному з цих елементів і залежать від відносної щільності x_i . Відносна щільність має бути рівне 1 або 0 в розрахунковій області Ω після оптимізації. Для обмеження проміжної відносної щільності використовується чинник відбракування p .

Відношення між модулем пружності і відносною щільністю записується як:

$$E(x_i) = E_{\min} + (x_i)^p (E_0 - E_{\min}), \quad (4)$$

де E_0 – модуль пружності матеріалу,

x_i – відносна щільність i -го елемента,

p – фактор відбраковки.

Тоді завдання оптимізації топології для мінімальної відповідності може бути записане у вигляді:

$$Find : X = \{x_1, x_2, x_3, \dots, x_i\}^T, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (4)$$

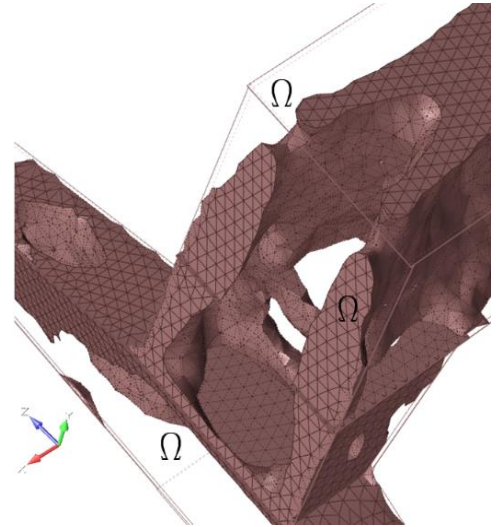


Рисунок 1 – Фрагмент оптимізованої моделі

Машинобудування і зварювальне виробництво

$$\text{Minimize: } C(X) = F^T U = U^T K U = \sum_{i=1}^n u_i^T k_i u_i = \sum_{i=1}^n (x_i) u_i^T k_0 u_i, \quad (5)$$

$$\text{Subject to: } K U = F, V = f_0 V_0 = \sum_{i=1}^n x_i v_i, \quad (6)$$

$$0 < x_{\min} \leq x_i \leq x_{\max} \leq 1, \quad (7)$$

де цільова функція C визначається як середня відповідність;
 X – вектор конструктивних змінних;

x_{\min}, x_{\max} – мінімальна та максимальна щільність елементів відповідно.

Основна ідея методу Level-Set (встановлення рівня або безлічі рівнів) полягає в тому, щоб виразити криву або поверхню в неявному виді. При цьому вони приймаються як встановлений нульовий рівень багатовимірної функції. Потім простежується їх деформація за допомогою цієї функції. Наприклад, в оптимізації топології структури криві або поверхні, межі, що зображують її, деформуються, щоб мінімізувати енергію пружної деформації.

Для заданої області Ω з гладкою межею передбачається існування неявної функції $\varphi(x)$, яка задовольняє умовам:

$$\varphi(x) \begin{cases} > 0, & x \in \Omega^+ (\text{матеріал}), \\ = 0, & x \in \partial\Omega = (\text{межа}), \\ < 0, & x \in \Omega^- (\text{порожнина}). \end{cases} \quad (8)$$

Мета дослідження.

Метою цієї роботи є розробка та обґрунтування методики створення та удосконалення несучих елементів вантажопідйомних машин із застосуванням топологічної оптимізації та генеративного дизайну на прикладі елементів порталного крану.

Основний матеріал дослідження.

Нажаль, на сьогодні відсутня методологія щодо застосування топологічної оптимізації та елементів генеративного дизайну під час проектування елементів металоконструкції ПТМ, рекомендації із вибору значень коефіцієнту відбракувань та інше. На даний час для розрахунку металевих конструкцій порталного крану з різноманітних сукупностей навантажень, що діють на кран, зазвичай виділяють три основних випадки його навантаження.

Для моделювання навантаженого стану металоконструкцій порталного крану, реалізації методу скінченних елементів, подальшого аналізу їхнього напружено-деформованого стану та застосування топологічної оптимізації, пропонується використовувати наведені вище комбінації навантажень, схеми їх дій (рис. 2), загальноприйняті інженерні аналітичні методики визначення діючих сил.

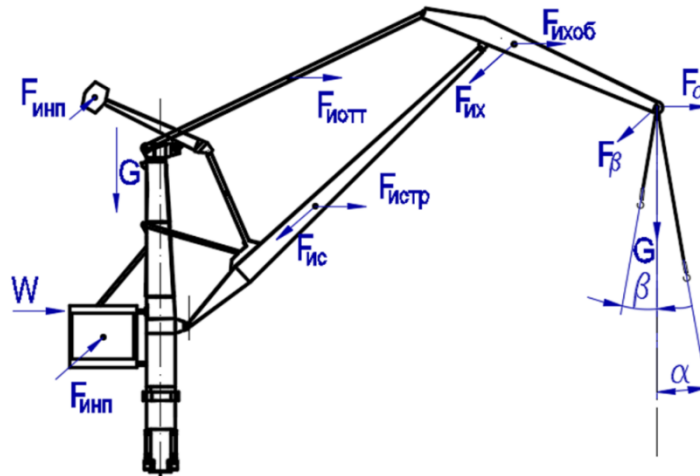


Рисунок 2 – Схема дії сил для моделювання навантаженого стану металоконструкцій порталного крана «Сокол»

Наприклад, для моделювання навантаженого стану металоконструкції крана «Сокол» розрахункові навантаження і їх комбінації приймаються і розраховуються при двох варіантах вантаження відповідно до норм розрахунку металоконструкцій порталних кранів [8].

Отримані значення сил, а також динамічного тиску вітру робочого стану при навантаженнях по варіантах I і II були використані для моделювання напружено-деформованого стану по першому і другому варіантам.

При розрахунку моделей враховувалася власна вага конструкції, а також дія навантажень, визначених раніше. Зовнішній вигляд моделей з прикладеними навантаженнями по двох варіантах показаний на рисунку 3. Після розрахунку був отриманий дуже широкий спектр результатів, що включає, у тому числі, епюри напружень і переміщень.

Аналіз рівня еквівалентного напруження на поверхні колони з боку стріли по першому і другому варіантам навантажень показав, що найбільш несприятливим (більші значення напруження) є перший варіант навантаження, який і вибраний для подальшого аналізу напружено-деформованого стану, виявлення найбільш невдалих, с точки зору навантаженості ділянок, з метою їхньої подальшої оптимізації.

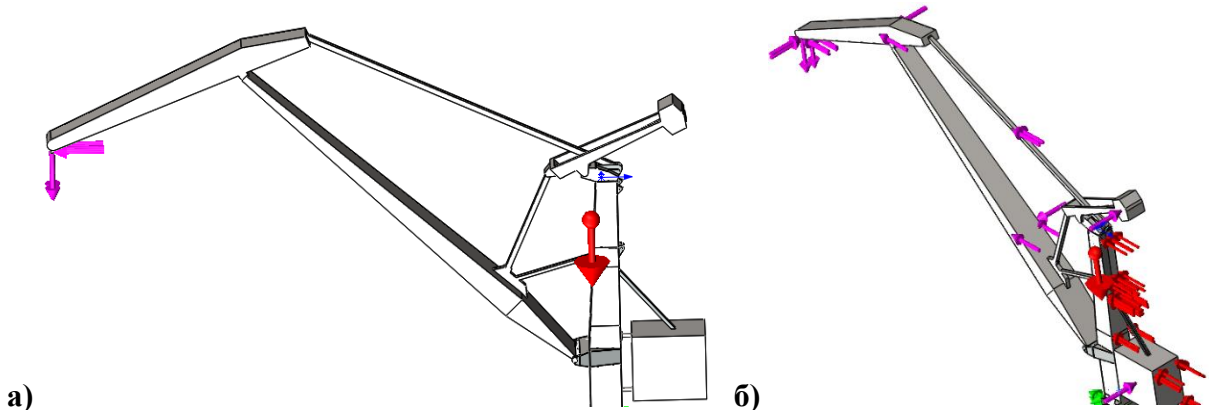


Рисунок 3 – Додаток сил: а – по першому варіанту; б – по другому варіанту

Машинобудування і зварювальне виробництво

В результаті виконання розрахунку методом скінченних елементів були побудовані:
- епюри розподілу еквівалентного напруження в металоконструкції (рисунок 4);

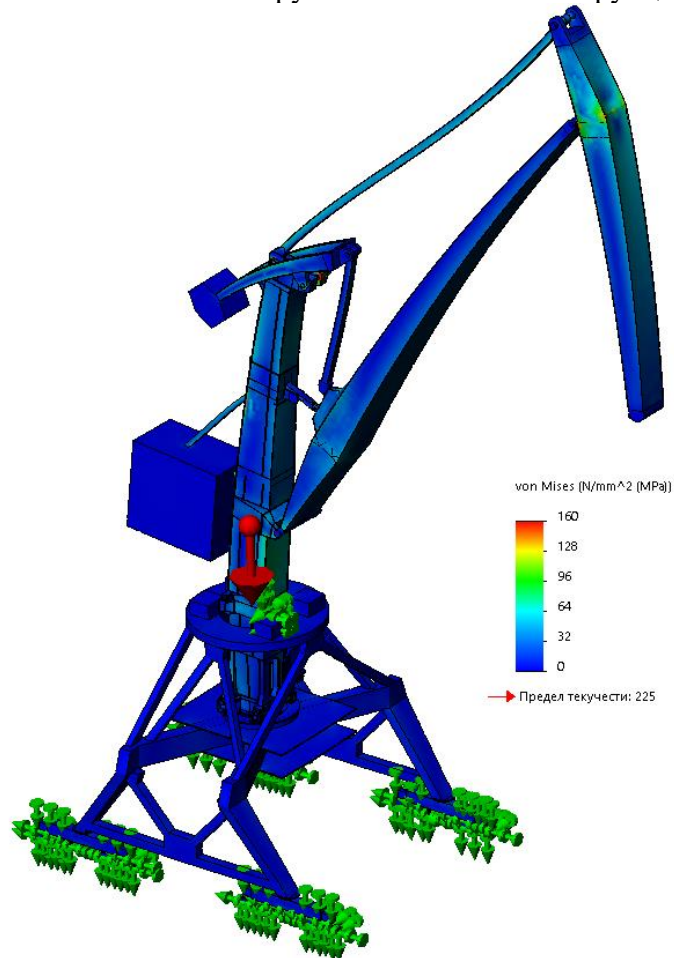


Рисунок 4 – Епюри розподілу еквівалентного напруження в металоконструкції

- епюри розподілу еквівалентного напруження в металоконструкції із застосованим параметром «Обмеження ISO» (40 МПа, 160 МПа).

Введемо поняття – «оптимальна сукупність напружень» («optimal combination of stresses»), яке буде характеризуватися мінімальним $[\sigma]_{os}^{\min}$ та максимальним $[\sigma]_{os}^{\max}$ оптимальними напруженнями (optimal stresses), оскільки, на наступному етапі необхідно виконати аналіз напружено-деформованого стану металоконструкцій та виявити ділянки, перспективні:

1. З точки зору підвищення надійності та довговічності, значення еквівалентних напружень у яких є більше максимального граничного значення $[\sigma]_{os}^{\max}$;

Машинобудування і зварювальне виробництво

2. З точки зору зниження металоемності та збереженням міцнісних характеристик, значення еквівалентних напружень у яких є менше мінімального граничного значення $[\sigma]_{os}^{\min}$

Як відомо, розрахунок на міцність за критерієм Мізеса ведеться по четвертій теорії міцності. Вона заснована на наступній гіпотезі: міцність елементу, що знаходиться в складному напруженому стані, вважається вичерпаною (тобто настає граничний напружений стан), якщо питома потенційна енергія його формозмінення досягла граничного значення, визначеного з дослідів на просте розтягування. Пропонуємо, по цій гіпотезі еквівалентне напруження, яке отримане в процесі моделювання та розрахунку, порівнювати з допустимим напруженням, яке розраховується за формулою:

$$[\sigma] = \frac{\sigma_{zp}}{n}, \text{ МПа} \quad (9)$$

де σ_{zp} - межа міцності матеріалу. У нашому випадку - матеріал пластичний, тому вибираємо межу плинності - σ_T . Для крихких матеріалів в якості σ_{zp} необхідно вибрати межу міцності - σ_B ;

n – коефіцієнт безпеки для елементів металокопструкції.

Нагадаємо, що межа плинності – в прикладній механіці визначається як напруження σ_T в матеріалі, при якому він починає деформуватися пластично. Спочатку, при менших навантаженнях, матеріал деформується пружно, тобто він може відновлювати свою форму після зняття навантаження. При збільшенні навантаження і перевищенні межі плинності в матеріалі з'являються безповоротні деформації.

Межа міцності або тимчасовий опір руйнуванню – умовне механічне напруження σ_B , відповідає найбільшому зусиллю, яке досягається в процесі деформації зразка матеріалу, отриманому до розділення зразка на частини, яке відповідає максимуму на діаграмі деформації.

На основі виконаного моделювання виконаний розрахунок довговічності елементів металокопструкції. Якщо для матеріалу відомі межа обмеженої витривалості $(\sigma)_n$ при числі циклів n і напруження $(\sigma)_N$, що викликає руйнування після N циклів, то визначити число циклів до руйнування стає можливим по формулі:

$$(\sigma)_n^k \cdot n = (\sigma)_N^k \cdot N. \quad (10)$$

Для сталей межа обмеженої витривалості, визначена на базі $N_{\sigma}=10^7$ циклів можна прийняти за межу витривалості, оскільки якщо сталевий зразок витримав 10^7 циклів, то він може витримати практично необмежене число циклів.

Можливе число циклів N вантаження при відомому, такому, що перевищує межу витривалості, максимальному напруженні $(\sigma)_N$ циклу:

$$N = \frac{(\sigma)_n^k \cdot n}{(\sigma)_N^k} = n \cdot \left(\frac{(\sigma)_n}{(\sigma)_N} \right)^k. \quad (11)$$

Використовуючи моделювання напруженого стану металоконструкції крану, залежність, зведення про фізичні властивості матеріалу металоконструкції, а також інформацію про навантаженість металоконструкції в процесі експлуатації можна визначити залишковий ресурс металоконструкції.

Знаючи число циклів вантаження крану в добу (рік) і використовуючи методику можна визначити термін служби крану в днях (роках).

Коефіцієнт запасу міцності для розрахункових випадків I і II рекомендують приймати $n = 1,4$.

Межа плинності матеріалу металоконструкції, з урахуванням товщини металу, складає $\sigma_T = 225$ МПа. Тоді, максимальне граничне значення оптимальної сукупності напружень буде складати:

$$[\sigma]_{os}^{max} = \frac{\sigma_T}{n_{II}} = \frac{225}{1,4} = 161 \text{ МПа}. \quad (12)$$

Значення коефіцієнтів динамічності для порталних кранів при розрахункових випадках I і II становлять: у кроковому режимі $k_d = 1,3$ і $k_d = 1,5$, у грейферному режимі $k_d = 1,4$ і $k_d = 1,6$.

Враховуючі, що доля допустимих напружень від статичного навантаження складає:

$$[\sigma]_{cn} = \frac{[\sigma]}{k_d}, \quad (13)$$

доля динамічної складової напруження буде рівнятись:

$$[\sigma]_d = [\sigma] - [\sigma]_{cn} \quad (14)$$

Або

$$[\sigma]_{cn} = [\sigma] \left(1 - \frac{1}{k_d} \right). \quad (15)$$

Для розглянутого випадку роботи крана у грейферному режимі, мінімальне граничне значення оптимальної сукупності напружень буде складати:

$$[\sigma]_{os}^{min} = [\sigma]_d = 60,4 \text{ МПа}. \quad (16)$$

Такий підхід до оцінювання напруженості недовантажених та перевантажених ділянок металевої конструкції порталного крану дозволить виявляти ділянки, перспективні с точки зору застосування топологічної оптимізації.

Для наочного виявлення найменш навантажених елементів металоконструкції (вони є прозорими на рисунку) з рівнем напружень до 60 МПа застосовний інструмент «Обмеження ISO», з прийняттям значення еквівалентного напруження 40 МПа (рисунок 5).

Для наочного виявлення найнебезпечніших місць металоконструкцій, збільшимо рівень напружень при застосуванні інструменту «Обмеження ISO» до 160 МПа (рисунок 6).

Аналізуючи епюру розподілу еквівалентних напружень (рисунок 6) можна виділити найнебезпечніших місця металоконструкцій, максимальні значення напружень у яких наближаються до 160 МПа.

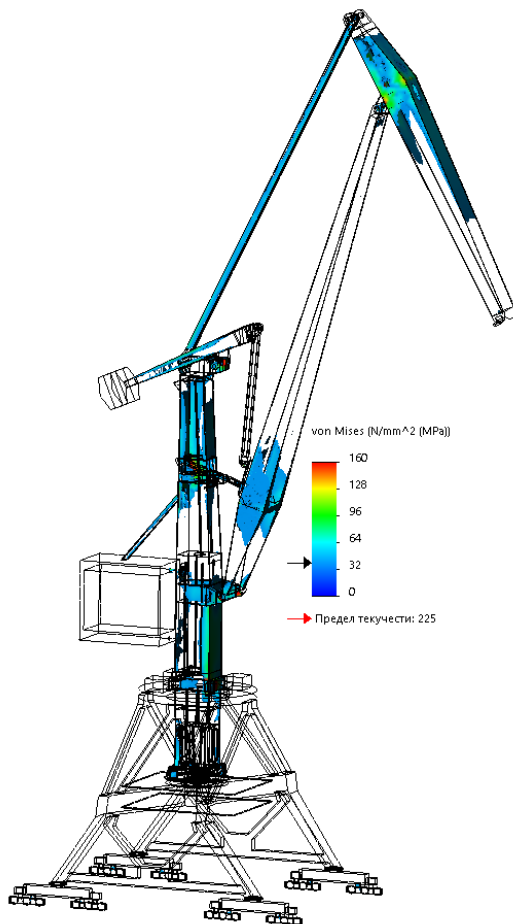


Рисунок 5 – Навантажені ділянки металоконструкції застосування інструменту «Обмеження ISO» (40 МПа)

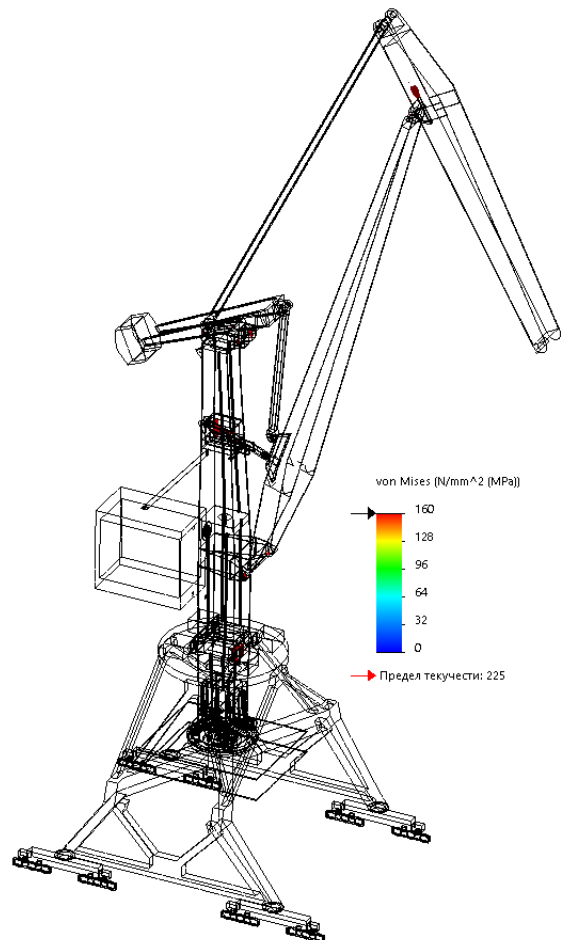


Рисунок 6 – Найнебезпечніші місця металоконструкцій при застосуванні інструменту «Обмеження ISO» (160 МПа)

Виявлені таким чином елементи металоконструкцій порталного крану потребують застосування топологічної оптимізації, до досягнення в них значень напружень з оптимальної сукупності, а конструкція у цілому – генеративного дизайну. Приклад застосування даних

підходів та наведеної методології під час проєктування елементів металоконструкцій та пристроїв ПТМ наведено на рисунках 1, 7 та у попередніх працях авторів [9].

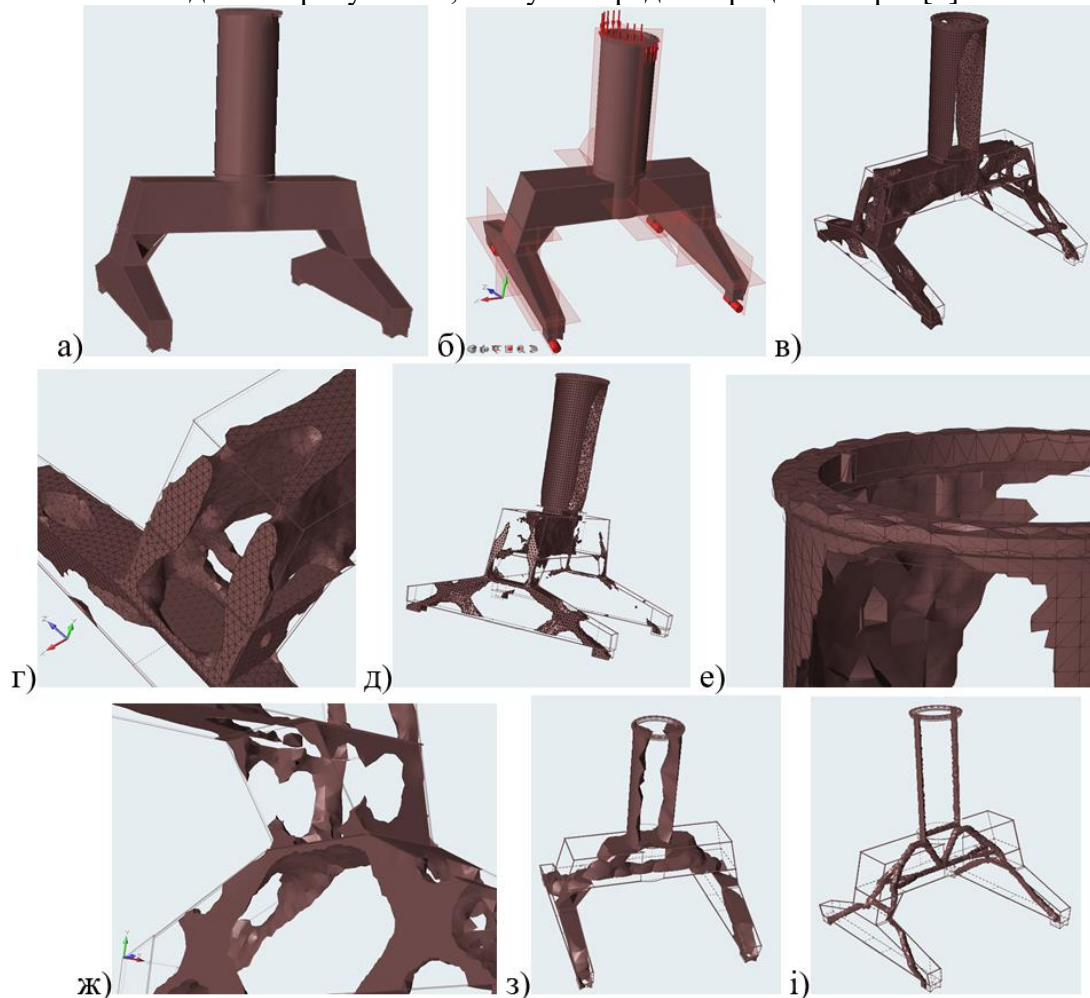


Рисунок 7 – Приклади результату застосування генеративного дизайну при проєктуванні металоконструкції порталного крану: а-б – еволюція конструкції

ВИСНОВКИ

1. Методи проєктування металоконструкцій, які є прийнятими на сьогодні, потребують подальшого розвитку та уточнень, оскільки вони не завжди дозволяють у повній мірі використовувати сучасний інструментарій. Розробка методології проєктування металоконструкцій порталних кранів з використанням елементів топологічної оптимізації та генеративного дизайну є актуальним науково-технічним завданням.

2. Перспективи оптимального проєктування металоконструкцій невід’ємно пов’язані з використанням сучасних CAD/CAM/CAE систем, для використання яких розроблені методики:

- встановлення параметрів та структури елементів металоконструкцій на основі структурно-параметричного синтезу та топологічної оптимізації;

- застосування генеративного дизайну для винайдення оптимальних параметрів елементів металоконструкції ПТМ, які забезпечують рівномірний розподіл напружень, плавну передачу силового потоку між ними, та, тим самим, довговічність та надійність під час експлуатації.

3. Застосування запропонованої методології дозволяє:

- за рахунок отримання законів розподілу напружень в металоконструкціях виявляти найбільш навантажені ділянки та під час діагностування стану металоконструкцій приділяти ним особливу увагу, тим самим підвищуючи подальшу небезпечну експлуатацію;

- для ПТМ які вже експлуатуються і в елементах металоконструкцій яких винайдено дефекти, за рахунок структурно-параметричного синтезу запропоновувати оптимальні, з точки зору рівномірності розподілу напружень та забезпечення плавності силового потоку, конструктивні рішення з ремонту та підсиленню;

- значно підвищити якість міцністних розрахунків за рахунок застосування не плоских, а 3D моделей та сучасних CAD/CAM/CAE комплексів;

- досягти мінімальних витрат енергії та об'єму матеріалу під час проведення ремонтів

4. Залишаються ще багато завдань з уточнення оптимальної сукупності напружень («optimal combination of stresses»), значень $[\sigma]_{os}^{\min}$ та $[\sigma]_{os}^{\max}$ для металоконструкцій інших типів ПТМ.

Перелік використаних джерел:

1. Xie, Y. M. A simple evolutionary procedure for structural optimization / Y. M. Xie, G. P. Steven // Computers and Structures. – 1993. – Vol. 49, N 5 (3).– P. 885–896.
2. Bendsoe, M. P. Generating optimal topologies in structural design using a homogenization method / M. P. Bendsoe, N. Kikuchi // Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. – 1988. – Vol. 71, N 2, November. – P. 197–224.
3. Bendsoe, M. P. Optimal shape design as a material distribution problem / M. P. Bendsoe // Structural optimization. – 1989. – Vol. 1, December. – P. 193–202.
4. Bendsoe, M. P. Material interpolation schemes in topology optimization / M. P. Bendsoe, O. Sigmund // Archive of Applied Mechanics. – 1999. – Vol. 69, November. – P. 635–654.
5. Bendsoe, M. P. Topology Optimization - Theory, Methods, and Applications / M. P. Bendsoe, O. Sigmund. – Berlin Heidelberg : Springer Verlag, 2003. – 384 p.
6. Huang, X. Convergent and mesh-independent solutions for the bi-directional evolutionary structural optimization method / X. Huang, Y. M. Xie // Finite Elements in Analysis and Design. – 2007. – Vol. 43, N 14, October. – P. 1039–1049.
7. Метод SIMP для оптимизации топологии [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://help.solidworks.com/2019/russian/SolidWorks/cworks/c_simp_method_topology.htm?format=P&value=1
8. Справочник по кранам : в 2 т. Т. 1. / под общ. ред. М. М. Гохберга. – М. : Машиностроение, 1988. – 536 с.
9. Сагіров, Ю. Г. Застосування топологічної оптимізації на прикладі елементів підвіски ливарного крану / Ю. Г. Сагіров, В. В. Суглобов // Наука та виробництво : міжвуз. темат. зб. наук. праць / ДВНЗ «ПДТУ». – Маріуполь, 2019. – Вип. 21. – С. 98–109. – Режим доступу: <http://eir.pstu.edu/handle/123456789/24915>

Сагиров Ю. Г., Суглобов В. В.

МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ТОПОЛОГИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ И ГЕНЕРАТИВНОГО ДИЗАЙНА ДЛЯ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ НЕСУЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ ПОРТАЛЬНЫХ КРАНОВ

Современное состояние и перспективы оптимального проектирования металлоконструкций неотъемлемо связаны с использованием современных CAD/CAM/CAE систем, позволяющих еще на начальных этапах проектирования находить лучшие конструктивные решения путем применения топологической оптимизации и генеративного дизайна. Разработка оптимизационных методологий создания и совершенствования элементов порталных кранов, разложения расчетов на прочность является важным научно-техническим задачей, решение которой позволит повысить конкурентоспособность на глобальном уровне, безопасность эксплуатации подъемно-транспортных машин (ПТМ). Целью данной работы является разработка методологии создания и совершенствования несущих элементов грузоподъемных машин с применением известных инженерных методов проектирования металлоконструкций ПТМ, топологической оптимизации и генеративного дизайна на примере порталного крана. Объектом исследования является закономерность распределения материала в конструкции с учетом уровня напряженности в нем. В статье приведены результаты: моделирование нагруженного состояния металлоконструкций, анализа их напряженно-деформированного состояния, топологической оптимизации, генеративного дизайна.

Приведены твердоотно-деформированная модель и выполнен расчет методом конечных элементов в CAD/CAM/CAE системе. Полученный закон распределения напряжений в элементах металлоконструкций наглядно показал, что расположение металла (элементов металлоконструкций) является неэффективным и нуждается в оптимизации; напряженно-деформированное состояние элементов является достаточно сложным и требует дополнительных исследований; применение топологической оптимизации на этапе проектирования позволяет создавать оптимальные конструкции, а на стадии эксплуатации совершенствовать, повышать надежность и долговечность; использование генеративного дизайна на стадии проектирования позволяет получить оптимальную металлоконструкцию, по уровню и распределению напряжений, расположением материала.

Ключевые слова: *топологическая оптимизация, гомогенизация, генеративный дизайн, эволюция, порталный кран, металлоконструкция, метод конечных элементов, критерии.*

Sahirov Yu. G., Suglobov V. V.

METHODOLOGICAL FUNDAMENTALS OF APPLICATION OF TOPOLOGICAL OPTIMIZATION AND GENERATIVE DESIGN FOR IMPROVEMENT OF ELEMENTS OF PORTAL CRANE

Advanced manufacturing technologies, computer engineering and optimization systems using bionic design are becoming an integral part of modern industry and allow you to create globally competitive products in the shortest possible time. The efficiency and technical level of the

developed hoisting and transport machines largely depends on the use of rational structures and parameters of the elements of the metal structure during design. This is especially true for gantry cranes, as the weight of the payload in them is only up to 11 % of the weight of the structure of the crane, while, for example, in bridge cranes, this figure reaches 50 %.

Traditional strength calculations of metal structures of cranes and their elements are based on the assumption of a flat scheme of their work, while their elements work as spatial systems. This approach is traditionally due to the fact that calculation methods have evolved, relying on a manual method of calculation using simple calculating devices and installations. In difficult cases, it is difficult to assess the accuracy of such calculations without experimental verification on computer 3D models and products.

Currently, in connection with the development of computer technology, including in connection with the development of special programs for calculating spatial structures, the need for breaking metal structures into flat elements is gradually disappearing. Almost all modern strength calculations are carried out using volumetric computer models and the finite element method. In recent decades, it has taken a leading position and has become widespread.

The current state and prospects of optimal design of metal structures are inextricably linked with the use of modern CAD / CAM / CAE systems, which allow in the initial stages of design to find the best design solutions through the use of topological optimization and generative design. Development of optimization methodologies for the creation and improvement of gantry cranes, development of strength calculations is an important scientific and technical task, the solution of which will increase global competitiveness, safety of hoisting machines (PTM). The purpose of this work is to develop a methodology for creating and improving the load-bearing elements of hoisting machines using known engineering methods of designing metal structures PTM, topological optimization and generative design on the example of a gantry crane. The object of study is the pattern of distribution of the material in the structure, taking into account the level of stress in it. The article presents the results: modeling of the loaded state of metal structures (plots of equivalent stress distribution in metal structures, plots of equivalent stress distribution in metal structures with the applied parameter "ISO Restriction"), analysis of their stress-strain state, topological optimization, generative design.

The solid-deformed model is given and the calculation is performed by the finite element method in the CAD / CAM / CAE system. The obtained law of stress distribution in the elements of metal structures clearly showed that the location of the metal (elements of metal structures) is inefficient and needs to be optimized; the stress-strain state of the elements is quite complex and requires additional research; the application of topological optimization at the design stage makes it possible to create optimal structures, and at the stage of operation to improve or increase reliability and durability; the use of generative design at the project stage allows to obtain an optimal metal structure, according to the level and distribution of stresses, the location of the material. A new concept of "optimal combination of stresses" for the evaluation of the structure is formulated and introduced.

Keywords: *topological optimization, homogenization, generative design, evolution, gantry crane, metal construction, finite element method, criteria.*

*Рекомендовано до публікації: д-р техн. наук, проф. ДВНЗ «ПДТУ» Іщенко А. О.
Стаття надійшла 19.07.2020 р.*