

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ФАКТОРІВ НА ДОВГОВІЧНІСТЬ ОПОРНОЇ РАМИ

Igor Zalisko

Київський національний університет будівництва і архітектури, 03680, Повітофлотський пр-кт 31, Київ, Україна

TECHNOLOGICAL FACTOR INFLUENCES ON THE SUPPORT CHASSIS DURABILITY IS RESEARCHED

Igor Zalisko

Kyiv National University of Construction and Architecture, 03680, Povitoflotsky Prospect 31, Kyiv, Ukraine

АНОТАЦІЯ. Досліджено вплив технологічних факторів на довговічність опорних рам. Отримані аналітичні залежності для визначення напружень і залишкових деформацій. Визначено вплив залишкових напружень після зварювання і коефіцієнти концентрації напружень на довговічність металокопункції опорної рами автокрана. За результатами експериментальних досліджень визначені геометричні параметри що зумовлюють неоднорідність металокопункції рами.

Ключові слова: опорна рама, напруження, залишкова деформація.

АННОТАЦИЯ. Исследовано влияние технологических факторов на долговечность опорных рам. Получены аналитические зависимости для определения напряжений и остаточных деформаций. Определено влияние остаточных напряжений после сваривания и коэффициенты концентрации напряжений на долговечность металлоконструкции опорной рамы автокрана. В результате экспериментальных исследований определены геометрические параметры, которые обуславливают неоднородность металлоконструкции рамы.

Ключевые слова: опорная рама, напряжение, остаточная деформация.

SUMMARY. Supporting frame boom crane trucks perceive significant load, which reduces their longevity. Longevity metal also depends on structural fabrication, mechanical properties of the material modes of load and operating conditions. The most significant structural and technological factors are the residual stresses after welding and stress concentration factors. **Purpose.** The investigate the influence of technological factors on the durability supporting frames. **Methodology/approach.** The problem is solved by taking into account the residual stresses and uneven distribution of stresses from external coercion in bearing steel constructions chassis frame by requiring quantitative assessment of these factors. **Findings.** Analytical equations for the strains and residual deformation determination were obtained. Residual stresses after welding and coefficients of stress concentration influence factors on durability metal supporting chassis truck crane were obtained. According to the results of experimental researches the geometry parameters that determine inhomogeneity metal chassis construction were determined. **Research limitations/implications.** The defined coefficient of stress concentration for thickness welded metal 6...18mm frame crane that is within 2,1...3,1 respectively for butt and corner welds. **Originality/value.** The results must be considered when designing the new frames cranes.

Key words: support chassis, strain, residual deformation.

Актуальність роботи. Довговічність металокопункцій залежить від конструктивного виготовлення, механічних властивостей матеріалу, режимів навантаження і умов експлуатації. Всі перераховані фактори є випадковими, і тому кількісне врахування їх при розрахунку довговічності проводиться згідно теорії ймовірності. Найбільш істотними конструктивно-технологічними чинниками є залишкові напруження після зварювання і коефіцієнти концентрації напружень.

Аналіз існуючих досліджень засвідчують, що за теоретичними, експериментальними дослідженнями, завдяки науковим школам НВО «Всеросійським науково-дослідним інститутом будівельного і дорожнього машинобудування» (м. Москва), Виробничим об'єднанням «Завод імені Січневого повстання» (м. Одеса), Придніпровської державної академії будівництва і

архітектури (м. Дніпропетровськ) та іншими [1...5], закладені основи проектування і створення опорного та опорно-поворотного пристроїв автокранів, що знайшли відображення в конструкціях вантажопідіймальної техніки.

Виклад основного матеріалу. Конструктивно опорна рама виконана з блочно-стрижневих елементів, з'єднаних між собою за допомогою зварювання, тобто жорстко. Поздовжні і поперечні балки автокрана, як правило, взаємно перпендикулярні, поперечні перерізи їх прямокутні, порожнисті, замкнуті. Оскільки з'єднання їхнє жорстке, то від стрижня (балки) до стрижня передаються осеві зусилля, а також згинальний та крутний моменти.

Конструктивна неоднорідність і зварювання металокопункцій викликає такі фактори як поява залишкових напружень і нерівномірність розподілу напружень від зов-

нішнього силового впливу в несучих металоконструкціях ходової рами. Врахування їхнього впливу на довговічність від дії циклічних навантажень і міцність вимагає кількісної оцінки цих факторів. Кількісна оцінка їх проводиться на основі експериментально-аналітичних досліджень із залученням апарату статистичної обробки результатів експериментальних досліджень.

Створення нових раціональних зварних конструкцій неможливе без знання розподілу залишкових напружень і деформацій, які з'являються в процесі зварювання металоконструкцій.

Балочні елементи рами утворюють тривимірну зварну конструкцію, в яку при аналізі напруженого стану необхідно включити згин, кручення, зсув і розтяг її елементів від впливу зовнішніх силових факторів. Деформований стан металоконструкцій ходової рами визначається тензометром деформацій $\varepsilon_i(t, \vec{r})$, що є функцією часу t і координат $\vec{r} = (x_i)$, $i = 1, 3$. Ці деформації можна розкласти на складову, внесену зовнішнім впливом і складову від технологічних факторів виготовлення:

$$\varepsilon_{i,j}(t, \vec{r}) = \varepsilon_{i,j}^{наб.}(t, \vec{r}) + \varepsilon_{i,j}^{мех.}(t, \vec{r}). \quad (1)$$

Найбільш істотно технологія виготовлення впливає на деформацію після зварювання $\varepsilon_{i,j}^{нал.}(t, \vec{r})$, яка в даному випадку відповідає $\varepsilon_{i,j}^{мех.}(t, \vec{r})$. Після попереднього перевантаження залишкові напруження релаксують, досягають визначеної величини і утворюють стаціонарне поле залишкових напружень в металоконструкції і тоді (1) можна записати:

$$\varepsilon_{i,j}(t_1, \vec{r}) = \varepsilon_{i,j}^{наб.}(t_1, \vec{r}) + \varepsilon_{i,j}^{нал.}(\vec{r}). \quad (2)$$

Зовнішній вплив утворює вектор, кожна компонента якого є однозначною функцією часу:

$$\vec{F} = \vec{F}(t). \quad (3)$$

Враховуючи те, що функція (3) є однозначною, то можна з цієї залежності отримати зворотну функцію

$$t = t(\vec{F}). \quad (4)$$

Підставляючи (4) в (1) отримуємо, що загальний деформований стан утворюється після деформації, що є функцією тільки ко-

ординат для релаксування залишкових напружень.

$$\varepsilon_{i,j}(t_1, \vec{r}) = \varepsilon_{i,j}^{наб.}(F_1, \vec{r}) + \varepsilon_{i,j}^{нал.}(\vec{r}). \quad (5)$$

Деформований стан металоконструкцій від зовнішнього навантаження залежить від зовнішнього силового впливу та конструктивного виготовлення рами. Його можна визначити експериментально або розрахунковими методами.

Залишкові деформації є результатом термопластичного впливу процесу зварювання на металоконструкцію. При зварюванні металу відбувається його нерівномірне нагрівання з наступним охолодженням, яке супроводжується структурною зміною, що призводить до деформації металу, що в свою чергу викликає напружений стан, відповідно до закону Гука.

Листовий прокат, з якого виготовлена ходова рама, можна вважати тонкою пластиною з точки зору розподілу залишкових напружень, оскільки після однопрохідного зварювання температурне поле по товщині пластини є однорідним.

Велика швидкість нагріву металу місцевим джерелом тепла і потім його інтенсивне охолодження створює в зварному вузлі нерівномірне температурне поле з великими градієнтами температур від місць зварювання до холодних ділянок.

Неоднорідність температурного поля в металі викликає місцеву пластичну деформацію стискування в процесі зварювання, а це, в свою чергу, призводить до появи залишкових деформацій (напружень) після охолодження металу.

Введемо систему координат, яка прийнята при аналізі напружено-деформованого стану після зварювання (рис.1).

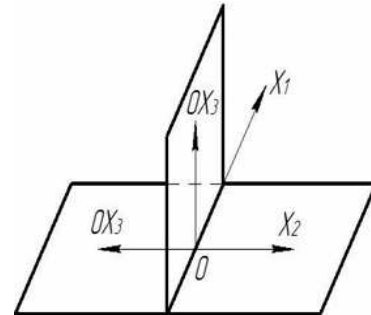


Рис. 1. Фрагмент зварювального елемента рами
Fig. 1. The welding element frame fragment

Вісь OX_1 - спрямована вздовж зварного шва, OX_2 - поперек шва в площині пластини, OX_3 - поперек шва в напрямку товщини. У зв'язку з цим тензор напружень буде:

$$\sigma_{i,j}^{зал.} = \begin{vmatrix} \sigma_{11}^{зал.} & \sigma_{12}^{зал.} & \sigma_{13}^{зал.} \\ \tau_{21}^{зал.} & \tau_{22}^{зал.} & \tau_{23}^{зал.} \\ \tau_{31}^{зал.} & \tau_{32}^{зал.} & \tau_{33}^{зал.} \end{vmatrix}, \quad (6)$$

а тензор деформації відповідно

$$\varepsilon_{i,j}^{зал.} = \begin{vmatrix} \varepsilon_{11}^{зал.} & \varepsilon_{12}^{зал.} & \varepsilon_{13}^{зал.} \\ \gamma_{21}^{зал.} & \gamma_{22}^{зал.} & \gamma_{23}^{зал.} \\ \gamma_{31}^{зал.} & \gamma_{32}^{зал.} & \gamma_{33}^{зал.} \end{vmatrix}. \quad (7)$$

Для металокопункцій ходової рами тензора $\varepsilon_{i,j}^{зал.}$ і $\sigma_{i,j}^{зал.}$ є симетричними, тобто:

$$\varepsilon_{i,j}^{зал.} = \varepsilon_{j,i}^{зал.} \quad \text{і} \quad \sigma_{i,j}^{зал.} = \sigma_{j,i}^{зал.}, \quad (8)$$

і всі моменти, у яких $i=3$ або $j=3$ дорівнюють нулю.

Температурні деформації, викликані зміною розміру частинок тіла при зміні температури

$$\varepsilon_{i,j}^{зал.} = \alpha_{i,j} \Delta T, \quad (9)$$

де $\alpha_{i,j}$ – середній коефіцієнт лінійного розширення в інтервалі зміни температури від 0 до T , що включає в собі і вплив структурних перетворень, $^{\circ}C^{-1}$; ΔT - зміна температури в будь-якій точці тіла, $^{\circ}C$.

Температура T ($^{\circ}C$) в будь-якій точці (x_1, x_2) пластини товщиною (см) при нагріванні її рухомим зі швидкістю v (см/с) джерелом тепла

$$q = \eta \cdot 0,24 \cdot I \cdot U, \quad (10)$$

визначається за формулою

$$T(x_1, x_2) = \frac{q}{2\pi\lambda\delta} e^{\frac{vx_1}{2a}} k_0 \left(\sqrt{(x_1^2 + x_2^2) \left(\frac{v^2}{2a^2} + \frac{b}{a} \right)} \right), \quad (11)$$

де I, U – струм і напруга зварювальної дуги, А і В; η – коефіцієнт використання тепла (при зварюванні відкритою дугою металевим електродом 0,7...0,8 і при зварюванні під флюсом 0,75...0,90); λ – коефіцієнт теплопровідності, ккал/(см.с.град); a – коефіцієнт температуропровідності, см²/с; b – коефіцієнт температуропередачі, 1/с; $k_0(u)$ – Бесселева функція нульового порядку другого роду від уявного аргументу.

Після досягнення максимального значення температура металу починає змен-

шуватися. Швидкість зменшення температури визначається за формулою:

$$W = \frac{2\pi\lambda c \gamma (T - T_c)^3}{(q/v\delta)}, \quad (12)$$

де $c\gamma$ – об'ємна теплоємність, ккал/см³ град; T_c – початкова температура металу.

Знаючи температурне поле (11), швидкість його зміни (12), а також залежність (9) можна визначити тензор деформації (7). Використовуючи зв'язок між напруженням і деформацією можна обчислити і залишкові напруження після зварювання.

Але аналітичний розрахунок для складних зварних вузлів надто складний і неврахування деяких факторів знижує вірогідність розрахунку. Тому в даній роботі дослідження та оцінка величини залишкових напружень проведена експериментально. В якості експериментального методу був обраний метод деструкції із застосуванням електричного тензометрування. При технологічному виготовленні опорної рами зустрічаються різноманітні зварні вузли (стикові, напущені, кутові, таврові).

Для аналізу напружено-деформованого стану були виділені характерні для опорної рами типові вузли і для них були визначені залишкові напруження. Результати експериментальних досліджень зведені в таблицю 1. З аналізу цих результатів видно, що напружений стан після зварювання металокопункцій може досягати межі текучості матеріалу і носить подвійний характер, оскільки модуль відносних головних напружень може досягати 1.

Іншим найбільш істотним конструктивно-технологічним фактором, що впливає на довговічність металокопункцій рами автокрана, є коефіцієнт концентрації напружень, викликаний геометричною неоднорідністю її металокопункцій. Вплив іррегулярних конструктивного виконання опорної рами на нерівномірність розподілу напружено-деформованого стану доцільно розділити на локальну і повузлову.

Локальна зміна напруг викликана місцевими змінами геометричних параметрів. Цю зміну можна врахувати за допомогою коефіцієнтів концентрації напружень.

Згідно з принципом Сен-Венана, чим більше градієнт зміни геометричного параметра, тим на меншу зону металоконструкцій він впливає.

Так, коефіцієнт концентрації напружень для стикового зварного з'єднання можна визначити за формулою:

$$a = 1 + \frac{2}{\pi A} \left(R \ln \frac{l + \rho}{\rho} - R_0 + rR_1 - r_1^2 R_2 + T_0 \right), \quad (13)$$

$$\Delta e \quad A = \frac{a_1(cha_1 - 1)}{k} + \frac{a^2}{2} rsha_1;$$

$$R = a_1 + 0,167a_1^2 + 0,008a_1^5; \quad T_0 = sha_1;$$

$$R_0 = a_1 + 0,305a_1^3 + 0,019a_1^5; \quad k = 0,9 \left(\frac{\delta}{\delta + h} \right)^2;$$

$$a_1 = a \cdot l; \quad R_1 = 0,33a_1^2 + 0,033a_1^5; \quad r = \rho/l;$$

$$R_2 = 0,167a_1^3 + 0,038a_1^5; \quad a = \sqrt{\frac{k(\delta + 2h)}{hl\delta}}, \quad (14)$$

ρ – радіус переходу до основного металу; a – половина ширини виступу; δ – товщина зварюваного листа; h – висота виступу; $l = 2a$.

Ця формула добре узгоджується з експериментом за умови $h/l < 0,35$ і дією нормальних напружень по перерізу виступу можна знехтувати. Тоді формулу (13) можна представити у вигляді:

$$a = \left[1 + \frac{1}{\sqrt{\rho \left(\frac{14}{l} + \frac{1,7}{h} + \frac{5}{\delta} \right)}} \right] \left(1 + 0,58 \sqrt{\frac{t}{r}} \right), \quad (15)$$

де t і r – глибина і радіус спряження підризу.

Коефіцієнт концентрації в напущених і таврових з'єднаннях розраховується за формулою

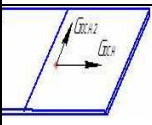
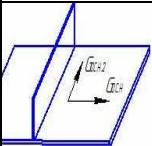
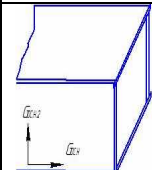
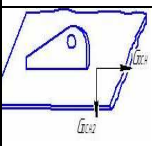
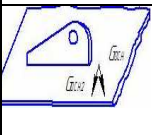
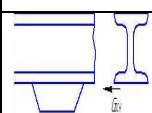
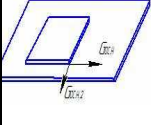
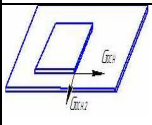
$$a = 1 + 0,18(\delta/\rho)^{0,66}. \quad (16)$$

У формули (14), (15) і (16) входять геометричні параметри: ρ , l , h , t , r , які, в свою чергу, залежать від багатьох чинників і є випадковими величинами. Таким чином, коефіцієнт концентрації напружень a визначається через детерміновану функцію від випадкових аргументів і тому сам є випадковою величиною.

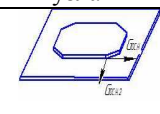
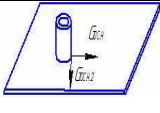
Експериментальні дослідження дозволили визначити геометричні параметри і тим самим розрахувати теоретичні коефіцієнти концентрації напружень. Статистична обробка дозволила встановити, що щільність ймовірності розподілу значень теоретичних коефіцієнтів концентрації підпорядковується нормальному закону розподілу.

Таблиця 1. Відносні значення початкових залишкових напруг

Table 1. Relative values of initial residual stresses

Конструкція зварного вузла	Характеристика вузла	$\sigma_{oc.n}$	$\sigma_{oc.n2}$	$B = \frac{\sigma_{oc.n}}{\sigma_{oc.n2}}$
		σ_1	σ_1	
	Стикове з'єднання однакової або різної товщини будь-якого типу	0,4	0,8	2
	Таврове з'єднання з будь-яким виконанням швів	0,4	0,8	2
	Кутове з'єднання з будь-яким виконанням швів	0,3	0,1	0,12
	Приварювання провусин до листа (в тому числі в різних провусин)	0,6	0,1	0,16
	Приварювання провусин до листа з виносом зварних швів за межі їх заснування	0,8	0,1	0,12
	Приварювання косинки до двотавра	0,6	0,1	0,16
	Приварювання прямокутних накладок фланговими швами	0,6	0,1	0,15
	Приварювання прямокутних накладок по периметру	0,6	0,6	1

Продовження таблиці 1
Continued Table 1

Конструкція зварного вузла	Характеристика вузла	$\frac{\sigma_{ос.н}}{\sigma_1}$	$\frac{\sigma_{ос.н2}}{\sigma_1}$	$B = \frac{\sigma_{ос.н}}{\sigma_{ос.н2}}$
	Приварювання накладок зі скосами	0,4	0,8	2
	Приварювання чи варіння втулок	0,4	0,6	1,5

Знаючи медіанне значення коефіцієнта концентрації та коефіцієнт його варіації v_α , можна визначити значення теоретичного коефіцієнта концентрації напружень з будь-якою заданою ймовірністю P за залежністю

$$a(P) = a(P = 0,5) [1 - u_p v_k], \quad (17)$$

де u_p – квантіль нормального розподілу.

Значення коефіцієнтів концентрації напруги і коефіцієнтів їх варіації наведено в таблиці 2.

Таблиця 2. Експериментальні значення коефіцієнтів концентрації напружень a та коефіцієнтів їх варіацій v_α (товщина зварюваного металу $\delta = 6...18$ мм)

Table 2. Experimental stress concentration coefficients a and coefficients of variation of v_α (thickness welded on steel $\delta = 6...18$ mm)

Вид зварного шва	a	v_α
Стиковий	2,1	0,22
Кутовий	3,1	0,28

Висновки

- Досліджено вплив технологічних факторів на довговічність опорних рам та здійснена оцінка коефіцієнтів концентрації, викликані геометричною неоднорідністю металоконструкції опорної рами.
- Отримано аналітичні залежності для визначення залишкових деформацій та напружень в елементах конструкції опорної рами.

Література

- Андриєнко Н. Н., Хасилев П. В. Пути оптимизации проектирования опорных металлоконструкций самоходных кранов // Строительные и дорожные машины, 1986. № 2. С. 24.
- Андриєнко Н. Н., Хасилев П. В., Сергеев С. Т. Нагрузки на четырехопорный контур крана и влияние на них податливости рамы // Строительные и дорожные машины, 1989. № 11. С. 22 – 23.
- Казанский А. М. Особенности установки и соединения опорно-поворотных кругов с рамами строительных машин. – Сб. «Строительные и дорожные машины». Вып. 4. М., ЦНИИТЭстроймаш, 1971. С. 9 – 15.
- Kunststoffunterfütterung für Grobwalz-lager. Rothe Erde Grobwalzlager, Information Technic, 1971, N 2.
- Bargmann E. Einrichtung bei einer zweireihigen, zur Aufnahme von Kippkräften bestimmten Kugeldrehverbindung für Bagger und Krane. Патент ФРГ №1708558, 1968.

References

- Andrienko N. N., Hasilev P. V., 1986. Puti optimizacii proektirovanija opornyh metallokonstrukcij samohodnyh kranov [Means of optimization of designing of supporting metal mobile cranes]. Stroitelnye i dorozhnye mashiny [Building and road machines], no. 2, 24.
- Andrienko N. N., Hasilev P. V., Sergeev S. T., 1989. Nagruzki na chetyrehopornyj kontur kрана i vlijanie na nih podatlivosti ramy [The loads on the four supporting contour crane and the influence of frame compliance]. Stroitelnye i dorozhnye mashiny [Building and road machines], no. 11, 22 – 23.
- Kazanskij A. M., 1971. Osobennosti ustanovki i soedinenija oporno-povorotnyh krugov s ramami stroitelnyh mashin [Mounting and connection support-slewing frame construction machinery]. Stroitelnye i dorozhnye mashiny [Building and road machines], Vol. 4, 9 – 15.
- Kunststoffunterfütterung für Grobwalz-lager. Rothe Erde Grobwalzlager, Information Technic. 1971, N 2.
- Bargmann E., 1968. Einrichtung bei einer zweireihigen, zur Aufnahme von Kippkräften bestimmten Kugeldrehverbindung für Bagger und Krane. Patent FRG, no. 1708558.