

## ОБЛАДНАННЯ ТА РЕМОНТИ

УДК 621.6.072:621.762

© Карпенко Т.М.<sup>1</sup>, Іщенко А.О.<sup>2</sup>, Бондаренко О.В.<sup>3</sup>

### ВІДНОВЛЕННЯ ФУНДАМЕНТНИХ РАМ ДВИГУНІВ ТА ГЕНЕРАТОРІВ ЗА ДОПОМОГОЮ КОМПОЗИТНОГО МАТЕРІАЛУ «MULTIMETAL STAHL 1018»

У статті розглянуто питання використання сучасного композитного матеріалу «Multimetal Stahl 1018» для відновлення фундаментних рам під турбогенератори теплових електростанцій. Досліджено напружено-деформований стан полімерних зразків, вмонтованих у фундаментні рами циліндрів низького тиску ТЕС. Використовуючи результати розв'язку задачі теорії пружності Мічелла, отримані величини нормальних і дотичних головних напружень, які виникають у зразку під дією рівномірно розподіленого навантаження. Чисельний аналіз задачі проводився при варіюванні конструктивними параметрами зразка і величин заглиблень його в пази фундаменту. Запропоновано алгоритм розрахунку, який реалізований за допомогою програми Microsoft Excel і Solid Works.

**Ключові слова:** напруження, турбоагрегат, етюра, фундаментні рами, «Multimetal Stahl 1018», алгоритм, Microsoft Excel, Solid Works.

**Карпенко Т.Н., Ищенко А.А., Бондаренко А.В. Восстановление фундаментных рам двигателей и генераторов с помощью композитного материала «Multimetal Stahl 1018».** В статье рассмотрен вопрос использования современного композитного материала «Multimetal Stahl 1018» для восстановления фундаментных рам под турбогенераторы тепловых электростанций. Исследовано напряженно-деформированное состояние полимерных образцов, вмонтированных в фундаментные рамы цилиндров низкого давления ТЭС. Используя результаты решения задачи теории упругости Мичелла, получены величины нормальных, касательных и главных напряжений, которые возникают в образце под действием равномерно распределенной нагрузки. Численный анализ задачи проводился при варьировании конструктивными параметрами образца и величин углублений его в пазы фундамента. Предложен алгоритм расчета, который реализован с помощью программы Microsoft Excel и Solid Works.

**Ключевые слова:** напряжение, турбоагрегат, этюра, фундаментные рамы, «Multimetal Stahl 1018», алгоритм, Microsoft Excel, Solid Works.

**T.M. Karpenko, A.O. Ischenko, O.V. Bondarenko. Restoring of engines and generators foundation frames by means of the composite material «Multimetal Stahl 1018».** The problem as to the use of the modern composite material «Multimetal Stahl 1018» («MM Stahl 1018») to restore the frames of the foundation under the turbine generators of thermal power plants has been studied in the article. The surfaces of the supporting parts of the foundation are known to wear out and ruin under operating conditions. Substantial financing is required to restore them. The proposed «MM Stahl 1018» due to its composition and consistency makes it possible to ensure high accuracy contact of the

<sup>1</sup> канд. фіз.-мат. наук, доцент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь, [taisctn2013@gmail.com](mailto:taisctn2013@gmail.com)

<sup>2</sup> д-р техн. наук, професор, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь, [ischenko49@mail.ru](mailto:ischenko49@mail.ru)

<sup>3</sup> студент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь, [sashok547@gmail.com](mailto:sashok547@gmail.com)

supporting surface and the frames of the foundation, protecting the frames against corrosion as well. The polymeric cylindrical samples mounted into the grooves of the frame have been studied. The aim of the research was to study the stress-strain state of the sample under the action of uniformly distributed pressure, taking into account static and vibratory loads. The results of solving the problem of Michell elasticity theory have been used; the values of normal, shearing and principal stresses in the sample have been obtained. With the help of the Microsoft Excel program, the numerical analysis of the problem for different values of the design parameters of the sample have been carried out and the depth of the samples getting into the grooves in the foundation frames have been calculated. The results of the analysis are tabulated in a table and the strain and stress diagrams have been constructed. The diagrams of stress and strain for the model made in the program Solid Works 3D of the sample with the same parameters have been created. The algorithm of practical research of the stress-strain state of the sample, which can serve as a constructive solution for the restoring and design work at energy producing and other business enterprises has been offered.

**Keywords:** stress, turbine, diagram, foundation frame, «Multimetal Stahl 1018», algorithm, Microsoft Excel, Solid Works.

**Постановка проблеми.** Кожен рік на багатьох енергогенеруючих підприємствах плануються відновлюванні роботи на обладнаннях теплових електростанцій, у процесі яких виконується демонтаж великогабаритного обладнання (відновлення його чи заміна для встановлення на місце експлуатації). Однак у процесі експлуатації старих агрегатів відбувається зношення і пошкодження поверхні фундаменту внаслідок значних вібраційних навантажень та корозії при попаданні води в умовах підвищених температур.

Монтаж відновленого обладнання на пошкоджені у попередній експлуатації фундаментні рами є великою проблемою, бо без надійного контакту опорних поверхонь агрегату та фундаментних рам не вдається не тільки встановити агрегат у проектне положення, а і неможливо його експлуатувати внаслідок вірогідної появи вібрації корпусу. Тому найчастіше доводиться або виконувати довгострокові роботи з підгонки опорних поверхонь, або повністю замінити фундаментні рами разом з фундаментами, що приводить до великих фінансових витрат [1].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Запропонований для вирішення проблеми композитний матеріал «Multimetal Stahl 1018» («ММ Stahl 1018») базується на кращих полімерах, які при затвердінні майже не дають усадку, мають добру механічну міцність та хімічну стійкість [2]. До складу порошків-наповнювачів входять високоякісна нержавіюча сталь, кераміки та домішки для підвищення поверхневої напруги та хімічної стійкості. Завдяки своїй ідеальній в'язкій консистенції, матеріал легко наноситься шпателем і рівномірно розподіляється по всіх напрямках під час монтажу. Завдяки хорошим властивостям формувань «ММ Stahl 1018» з діапазоном точності 1/100 мм, здійснюється 100% точність підгонки прямо на місці, не вимагаючи жодного доопрацювання матеріалу [2, 3].

Результати експериментів [3] показали, що металополімер у вільному стані витримує лише незначні ударні навантаження. В умовах же об'ємного стиснення циклічна міцність металополімеру при динамічному навантаженні багаторазово зростає і конструкція здатна витримати навантаження, що мають місце в опорних поверхнях важко навантажених машин.

**Аналіз вібрації.** Аналіз вібрації турбогенераторів [4] показує, що вона носить складний характер і тому, в загальному випадку, не може бути виміряна тільки однією амплітудою коливань. Проте якою б не була складна вібрація, її можна представити як результат додавання великого числа синусоїд частоти  $\omega_i$  і амплітуди  $A_i$ . Тому мірою рівня вібрації є *віброшвидкість*, що вимірюється приладом

$$V = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{A_1^2 \cdot \omega_1^2 + A_2^2 \cdot \omega_2^2 + \dots + A_n^2 \cdot \omega_n^2}. \quad (1)$$

Вібрація *оборотної частоти* виникає через розбіжність центрів тяжіння окремих перетинів валопроводу з лінією, навколо якої відбувається його обертання.

Основним джерелом вібрації подвійної оборотної частоти є електричний генератор, зокрема для турбін із частотою обертання 50 Гц. Такий генератор має два полюси, тобто дві обмо-

тки, розташовані на протилежних сторонах ротора, і тому його опір вигину різний в різних площинах. Інколи виникають автоколивання у разі витрати стійкості обертання валу на масляній плівці підшипників з частотою, близькою до половини частоти обертання.

У нормально працюючому турбоагрегаті основне значення має вібрація оборотної частоти. Це означає, що в формулі (1) можна враховувати тільки один член і тоді допустима амплітуда вібрації, наприклад, при швидкості 2,8 мм/с дорівнює  $A = \sqrt{2} \cdot V / \omega = 13 \text{ мкм}$ . Експлуатація турбоагрегату забороняється при вібрації понад 7,1 мм/с, тобто при розмаху вібрації більше 65 мкм.

**Постановка задачі.** Об'єктами вивчення є дослідні зразки з композитного матеріалу «ММ Stahl 1018», які знаходяться в пазах фундаментної рами циліндра низького тиску теплових електростанцій (рис. 1). Зразки мають циліндричну форму діаметром  $2a$  і висотою  $h$ . Відомі параметри, що характеризують пружні властивості анізотропного матеріалу.

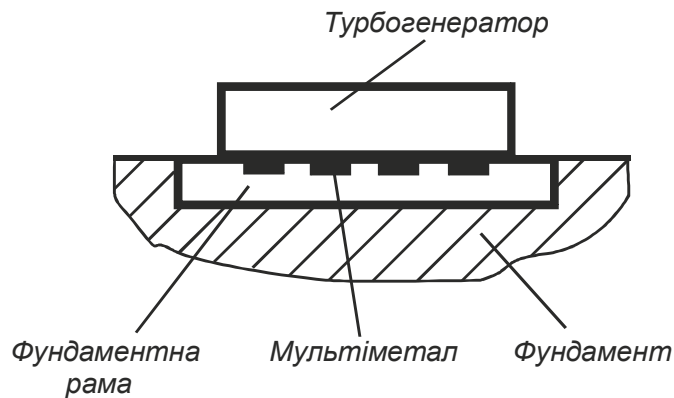


Рис. 1 – Об'єкт вивчення

Вважається, що вертикальні навантаження (вага 70 тон і динамічні складові від вібрацій) рівномірно розподілені між дослідними зразками. На кожен зразок діє рівномірно розподілене навантаження інтенсивністю  $p$ .

**Мета статті** – вивчити напружено-деформований стан дослідного зразка; для практичного використання результатів роботи запропонувати алгоритм і скласти програму для його реалізації в пакетах Microsoft Excel і SolidWorks.

**Виклад основного матеріалу.** Теоретичне дослідження напруженого стану дослідного зразка з матеріалу «ММ Stahl 1018» проводилось за методом, який застосував Мічелл [5]. Координати точок, що належать області дослідження, задовольняють умовам  $-a \leq x \leq a$ ,  $-h \leq y \leq 0$  (рис. 2).

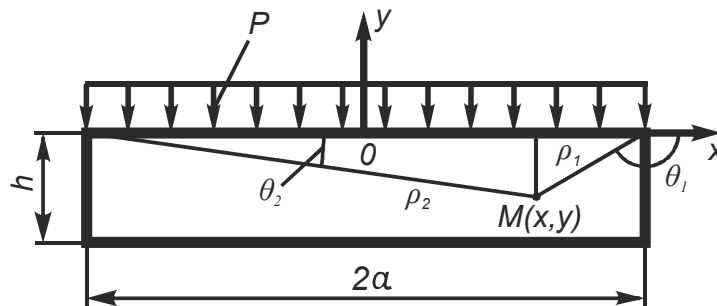


Рис. 2 – Розрахункова схема

Положення довільної точки  $M(x, y)$  можна задати в полярних координатах  $\rho_1, \rho_2, \theta_1, \theta_2$  [5] таким чином

$$\begin{cases} x = a + \rho_1 \cdot \cos \theta_1 \\ y = -\rho_1 \cdot \sin \theta_1. \end{cases} \quad (2)$$

Між параметрами полярної системи координат, згідно рис. 2, мають місце залежності

$$\rho_1 \cdot \sin \theta_1 = \rho_2 \cdot \sin \theta_2, \quad (3)$$

$$\theta_2 = \operatorname{arccctg} \left( \operatorname{ctg} \theta_1 + \frac{2a}{\rho_1 \cdot \sin \theta_1} \right). \quad (4)$$

Маємо компоненти тензора напружень [6]

$$X_x = -\frac{p}{\pi}(\theta_1 - \theta_2) + 2 \cdot p \cdot a \frac{y \cdot \cos(\theta_1 + \theta_2)}{\rho_1 \cdot \rho_2}; \quad (5)$$

$$Y_y = -\frac{p}{\pi}(\theta_1 - \theta_2) - 2 \cdot p \cdot a \frac{y \cdot \cos(\theta_1 + \theta_2)}{\rho_1 \cdot \rho_2}; \quad (6)$$

$$X_y = -2 \cdot p \cdot a \frac{y \cdot \sin(\theta_1 + \theta_2)}{\rho_1 \cdot \rho_2}. \quad (7)$$

Чисельний аналіз задачі. Зафіксувавши, наприклад, параметр  $\theta_1$ , задаючи значення  $\rho_1$  з певним кроком, знайдемо напруження  $X_x, Y_y, X_y = Y_x$  в досить великій сукупності точок половини досліджуваної області  $0 \leq x < a, -h \leq y < 0$ . В таблицю заносяться координати точок і значення напружень. Для перевірки умов міцності застосовано енергетичну теорію найбільшої потенційної енергії зміни форми, яку рекомендовано в енергетичному машинобудуванні, де об'єкти підлягають зміні температур в широкому діапазоні [7]. Композитний матеріал «ММ Stahl 1018» має різні допустимі напруження на розтягнення  $[\sigma_+] = 76 \text{ МПа}$  і на стиснення  $[\sigma_-] = 160 \text{ МПа}$ . Тому виконання критерію міцності виражається формулою

$$\sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - \sigma_1 \cdot \sigma_2} \leq [\sigma_+]. \quad (8)$$

Головні напруження  $\sigma_1$  і  $\sigma_2$ , при цьому, зв'язані з компонентами напружень  $X_x, Y_y, X_y$  залежностями

$$\sigma_{1,2} = \frac{1}{2} \left[ X_x + Y_y \pm \sqrt{(X_x - Y_y)^2 + 4X_y^2} \right]. \quad (9)$$

Чисельний аналіз задачі по визначенню компонентів вектора напружень та перевірку умови міцності рекомендується проводити за допомогою алгоритму. Коментарі для виконання алгоритму, який реалізований з допомогою програми Microsoft Excel, наступні:

- маємо два пакети даних  $2a, h, p, E, \mu, [\sigma_+], [\sigma_-]$ ;
- при фіксованому значенні кута  $\theta_1$  змінюємо параметр  $\rho_1$  з певним кроком таким чином, щоб  $\rho_1 < \sqrt{a^2 + h^2}, \frac{\pi}{2} < \theta_1 < \pi$ . Визначаємо координати точки  $(x, y)$ ;
- для конкретної точки знаходимо компоненти вектора напружень  $X_x, Y_y, X_y$ ;
- знаходимо головні напруження  $\sigma_1$  і  $\sigma_2$ ;
- застосовуємо певну теорію міцності.

Якщо умова міцності виконується, розрахунок завершено. Якщо не виконується – змінюємо вихідні дані.

Для більш наглядного висновку щодо величин компонентів вектора напружень в дослідному зразку за отриманими результатами були побудовані діаграми для кожного компонента в різних кольорах. Для дослідного зразка визначені, окрім напружень, переміщення побудованої в комплексі програм Solid Works [6] його 3D моделі, бо маючи компоненти вектора напружень анізотропного тіла, неможливо визначити переміщення за узагальненим законом Гука.

Чисельний аналіз задачі проводився для фіксованих значень  $a$  і  $p$ . В величину інтенсивності рівномірно розподіленого навантаження  $p$  входять статичні і динамічні навантаження. В

таблицю заносились результати чисельних аналізів задачі, які отримані для багатьох точок з досліджуваної області за допомогою програми Microsoft Excel. Фрагмент розрахунків при  $a = 0,009 м$ ,  $h = 0,0025 м$ ,  $p = 24 МПа$  представлений в таблиці.

Таблиця

Результати чисельних розрахунків при  $a = 0,009 м$ ;  $h = 0,0025 м$ ;  $p = 24 МПа$

$x$	$y$	$X_x$	$Y_y$	$X_y$	$\sigma_1$	$\sigma_2$
0,008903	-0,00047	-8,19316	-18,5189	22,06003	9,300081	-36,0122
0,008981	-0,00067	-10,3518	-13,528	23,92615	12,03892	-35,9187
0,008932	-0,00233	-7,46491	-15,0035	23,55954	12,62494	-35,0934
0,008709	-0,00141	-6,57247	-19,3282	21,93137	9,889574	-35,7903
0,008503	-0,00125	-5,75694	-22,9312	17,79613	5,415518	-34,1036
0,008777	-0,00025	-10,6081	-24,2878	7,471778	-7,31825	-27,5777
0,007971	-0,00167	-6,01367	-24,9343	12,42732	0,144455	-31,0924
0,006309	-0,00145	-16,7325	-22,2669	1,170252	-16,4952	-22,5041
0,006125	-0,00093	-20,3464	-21,9471	0,205178	-20,3205	-21,973
0,005843	-0,0025	-11,6127	-23,6184	3,298588	-10,7661	-24,465
0,004665	-0,00234	-15,7691	-22,0852	1,06463	-15,5945	-22,2598
0,002587	-0,00207	-19,2105	-21,3184	0,143646	-19,2007	-21,3281
0,001482	-0,00243	-18,7172	-21,0363	0,098465	-18,713	-21,0405

Для тих самих дослідних зразків визначались напруження і переміщення при різних величинах заглиблень зразка в паз фундаментної рами. На рисунку 3 представлена залежність максимальних напружень, що виникли в зразку, при змінах заглиблень від  $0,5h$  до  $h$  за допомогою програми Solid Works.

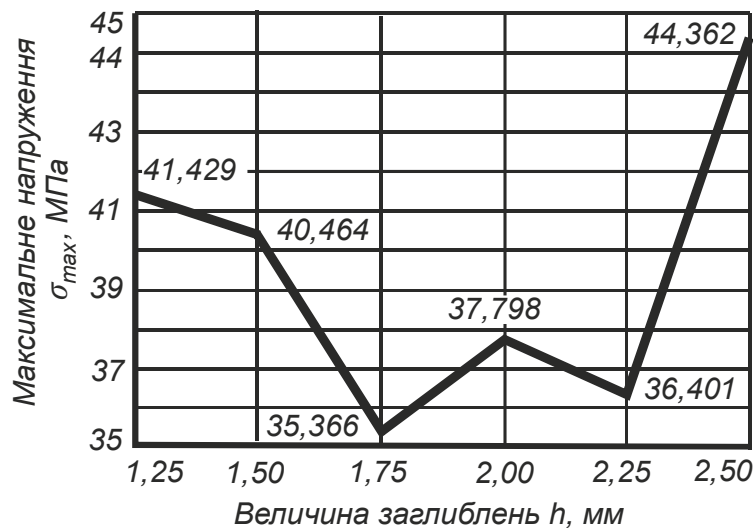


Рис. 3 – Залежність максимальних напружень від величини заглиблення зразка в паз фундаментної рами

### Висновки

1. В статті, виходячи з особливостей конструкції і експлуатації турбогенератора, нами узагальнені причини, частоти і амплітуди вібрацій, які треба враховувати при виконанні відновлюваних та проектних робіт для надійного контакту агрегату з фундаментом.

2. Skorистavshis'я розв'язком задачі теорії пружності Мічелла, визначений напружений стан дослідного зразка з матеріалу «ММ Stahl 1018», який вмонтований в паз фундаментної рами циліндру низького тиску теплової електростанції для широкого спектру параметрів об'єкту.

3. Порівнюючи дослідження повністю заглибленого в паз зразка з заглибленим частково, маємо: несуча здатність першого вища в порівнянні з другим. Це може слугувати конструктивним рішенням для відновлюваних та проектних робіт фундаменту турбогенератора чи інших двигунів.

4. Запропоновані алгоритми для практичних досліджень НДС дослідного зразка, які реалізовані з допомогою програм Microsoft Excel і SolidWorks.

#### Список використаних джерел:

1. Савинов О.А. Современные конструкции фундаментов под машины и их / О.А. Савинов. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л. : Стройиздат. Ленингр. отделение, 1979. – 200 с.
2. Ищенко А.А. Технологические основы восстановления промышленного оборудования современными полимерными материалами / А.А. Ищенко. – Мариуполь : ПГТУ, 2007. – 250 с.
3. Експлуатація та обслуговування машин / В.М. Кравченко [та ін.]. – Донецьк : Донбас, 2014. – С. 533.
4. Трухний А.Д. Стационарные паровые турбины / А.Д. Трухний. – М. : Энергоатомиздат, 1990. – 598 с.
5. Мусхелишвили Н.И. Некоторые основные задачи математической теории упругости / Н.И. Мусхелишвили. – М. : Наука, 1966. – 707 с.
6. Дударева Н.Ю. Самоучитель SolidWorks 2006 / Н.Ю. Дударева, С.А. Загайко. – СПб. : БХВ-Петербург, 2006. – 336 с.
7. Беляев Н.М. Соппротивление материалов / Н.М. Беляев. – М. : Г.И.Ф.-М.Л., 1962. – 856 с.

#### Bibliography:

1. Savinov O.A. Modern construction of foundations for machines and their calculation / O.A. Savinov. – 2 nd ed., Revised. and ext. – L. : Stroyizdat. Leningrad office, 1979. – 200 p. (Rus.)
2. Ishchenko A.A. Technological bases of recovery of industrial equipment with modern polymeric materials / A.A. Ishchenko. – Mariupol : PSTU, 2007. – 250 p. (Rus.)
3. Operation and maintenance of machines / V.M. Kravchenko [et al.]. – Donetsk : Donbas, 2014. – P. 533. (Ukr.)
4. Truhny A.D. Stationary steam turbines / A.D. Truhny. – M. : Energoatomisdat, 1990. – 598 p. (Rus.)
5. Muskhelishvili N.I. Some basic problems of the mathematical theory of elasticity / N.I. Muskhelishvili. – M. : Nauka, 1966. – 707 p. (Rus.)
6. Dudareva N.Y. Tutorial SolidWorks 2006 / N.Y. Dudareva, S.A. Zagayko. – SPb. : BHV-St. Petersburg, 2006. – 336 p. (Rus.)
7. Belyaev N.M. Strength of Materials / N.M. Belyaev. – M. : G.I.F.-M.L., 1962. – 856 p. (Rus.)

Рецензент: В.В. Суглобов  
д-р техн. наук, професор ДВНЗ «ПДТУ»

Стаття надійшла 05.05.2016