

Терлич С.В.

ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ДЕФОРМАЦІЙ ПЛАСТИН ІЗ КРУГЛИМИ ВИРІЗАМИ ДЛЯ МЕТАЛЕВИХ БАШТ ПЛАВУЧОГО ДОКУ

При виготовленні секцій башт плавучого доку вирізування отворів діаметром більше 60 мм здійснюється киснево-ацетиленовим або плазмовим вирізуванням. Нерівномірне розподілення високих температур, яке характерне для цих технологій вирізування після охолодження металу, призводить до створення до залишкових деформацій та механічних напружень. Під час приварювання до пластини кільцевого пояску або ребра жорсткості, які найчастіше підкріплюють кромку отвору, також виникає залишковий напружено-деформований стан. Слід зазначити, що саме плавучі доки (на відміну від транспортних, промислових, спеціальних та інших суден) сприймають значні знакозмінні та періодичні механічні навантаження під час занурення або спливання із судном, яке докучеться. Таким чином, залишкові деформації та напруження, які зумовлені технологією виготовлення отворів, здійснюють вплив на міцність та надійність конструкцій башт плавучих доків. Наведено розрахункові результати досліджень визначення закономірності розподілення деформацій, які викликані технологічними операціями виконання вирізів круглої форми у пластинах металевих башт плавучих доків. Описано їх вплив на міцність та стійкість у залежності від виду технологічних операцій, розмірів та матеріалу пластин. З'ясовано, що виконання круглих отворів у пластинах башт плавучого доку викликає створення технологічного залишкового напружено-деформованого стану, складові якого можуть бути визначені за допомогою наведених у статті залежностей. Доведено, що час проєктування конструкцій металевих башт плавучих доків розміри отворів із вільними та підкріпленими поясками кромками повинні прийматися так, щоб одразу після виконання цих отворів не виникала втрата стійкості. Вияснено, що наявність залишкового технологічного напружено-деформованого стану призводить до зниження стійкості металевих пластин башт із круглими отворами, які можна врахувати за допомогою введення коефіцієнта K_E , який залежить від технологій вирізування та/або зварювання, а також товщини пластини та радіусу отвору.

Ключові слова: технологічні операції, суднові пластини, плавучі доки, міцність та стійкість.

Постановка задачі. У складі металевих башт плавучих ремонтних доків досить часто зустрічаються пластини із круглими вирізами, які передбачено як для зменшення маси конструкцій, так і для забезпечення доступу до різноманітних приміщень. При виготовленні секцій башт плавучого доку вирізування отворів діаметром більше 60 мм здійснюється киснево-ацетиленовим або плазмовим вирізуванням [1, 2]. Нерівномірне розподілення високих температур, яке характерне для цих технологій вирізування після охолодження металу, призводить до створення до залишкових деформацій та механічних напружень. Під час приварювання до пластини кільцевого пояску або ребра жорсткості, які найчастіше підкріплюють кромку отвору, також виникає залишковий напружено-деформований стан [3].

Слід зазначити, що саме плавучі доки (на відміну від транспортних, промислових, спеціальних та інших суден) сприймають значні знакозмінні та періодичні механічні навантаження під час занурення або спливання із судном, яке докучеться [4]. Таким чином, залишкові деформації та напруження, які зумовлені технологією виготовлення отворів, здійснюють вплив на міцність та надійність конструкцій башт плавучих доків.

Аналіз літературних джерел за тематикою статті. У теорії деформації пластин, які мають отвори, розробленою академіком Ю.А. Шиманським [5] наведено наближені залежності для визначення коефіцієнтів концентрації механічних напружень. В роботі вітчизняних вчених професора Коробанова Ю.М. та інженерів Ліщука О.М. і Ліщука І.М. [6] вказується на негативний вплив цих деформацій на стійкість набору та рекомендується їх враховувати шляхом введення у розрахункові залежності (які використовуються для визначення критичних напружень) спеціального коефіцієнту, який не залежить від розмірів вирізу та пластини і дорівнює 0,70. Рекомендовані значення поправочного коефіцієнту, який враховує форми та розміри вирізів, наведено також у роботі [7], де поправочний коефіцієнт отримано методами теорії пружності. У дослідженні [8] наведено поправочні коефіцієнти із урахуванням відношення діаметру вирізу до ширини пластини, а у статті професора Сіверса М.Л. [9] представлено результати дослідження розтягнення ділянки палуби, яка має ряд технологічних отворів. Наступні вишукування мають уточнити ці залежності, оскільки вони різняться між собою і не враховують навантаження, які виникають за рахунок спливання-занурення на істотну глибину.

Основна гіпотеза. Відомо, що після теплового вирізування круглого отвору, а також після приварювання до кромки його пояску по всій довжині окружності вирізу виникає зона пластичних деформацій. Причому при наявності пояску така зона має місце не тільки у пластині, але й у самому пояску. Ширина зони пластичних деформацій практично постійна по довжині окружності вирізу, що підтверджується даними експериментальних досліджень, які проведено для колових зварених швів [10]. Після нагрівання при вирізуванні або зварюванні та охолодженні в зоні пластичних деформацій метал скорочується в коловому напрямку, що приводить до зменшення діаметру вирізу.

Основний текст. Для оцінювання технологічних деформацій пластини можна ввести фіктивне радіальне навантаження, яке рівномірно розподілене по контуру отвору і направлене до його центру. Величина цього

навантаження може бути знайдена шляхом розгляду умов рівноваги виділеної ділянки зони пластичних деформацій елементарної довжини

$$q = \frac{\nu E}{s r_0}, \quad (1)$$

де q – фіктивне радіальне навантаження, Па; E – модуль пружності першого роду металу пластини, Па; ν – погонний об'єм поздовжнього укорочення, яке викликане зварюванням або різанням, м²; s – товщина металу пластини, м; r_0 – радіус вирізу, м.

Погонний об'єм поздовжнього укорочення залежить в основному від теплофізичних характеристик металу та ефективної погонної енергії зварювання та різання. Він може бути розрахований за широко відомою методикою у суднобудуванні [11]. Для судових конструкцій при природньому охолодженні об'єм поздовжнього укорочення становить

$$\nu = 0,29 \frac{\alpha}{c\gamma} q_{II}, \quad (2)$$

де $\frac{\alpha}{c\gamma}$ – коефіцієнт теплової деформації, м³/Дж; q_{II} – ефективна погонна енергія при зварюванні та різанні, Дж/м;

$c = \frac{r_0}{R}$; R – зовнішній радіус пластини, м.

При наявності кільцевого пояску одна частина фіктивного навантаження сприймається їм, а інша – пластиною. Співвідношення цих частин визначається із умов рівності радіального переміщення пояску та кромки отвору в пластині. При цьому можна використовувати відомі рівняння теорії пружності для пластини із круговим отвором, контур якого піддається рівномірному тиску. У даному випадку використане рівняння Дорохова П.І. [12]

$$q_1 = \frac{\frac{r_0}{s_1}}{\frac{1+k^2}{1-k^2} + \mu - \frac{r_0}{s_1}} q, \quad (3)$$

де q_1 – фіктивне радіальне навантаження, яке сприймає пластина, Па; k – поправочний коефіцієнт; μ – коефіцієнт Пуассона; s_1 – товщина пояску, м.

Виконані за залежністю (3) розрахунки показали, що для реальних значень $\frac{r_0}{s_1}$ та k частина навантажень,

яка сприймається пластиною, складає 0,90...0,99 від загальної, яка визначена за залежністю (1) з урахуванням (2). Таким чином, із похибкою у безпечний бік можна стверджувати, що пластина сприймає своє фіктивне навантаження, яке має місце під час різання та зварювання.

Виходячи з цього, із використанням відомих рішень теорії пружності [13] знайдено радіальні та окружні деформації пластини

$$\begin{aligned} \varepsilon_r &= \frac{q}{E(1-k^2)} \left[(1+\mu) \left(\frac{r_0}{r} \right)^2 - (1-\mu)k^2 \right]; \\ \varepsilon_t &= -\frac{q}{E(1-k^2)} \left[(1+\mu) \left(\frac{r_0}{r} \right)^2 + (1-\mu)k^2 \right], \end{aligned} \quad (4)$$

де ε_r – радіальна деформація; ε_t – окружна деформація; r – відстань від точки, у якій відбувається деформація до центру отвору, м.

Для перевірки можливості використання залежностей (1) та (4) при оцінюванні залишкових технологічних деформацій, які виникають при виконанні круглих отворів, проведено вимірювання деформацій у пластині із сталі ВСтЗсп, яка має розміри 8x800x800 мм, після вирізування у ній киснево-ацетиленовою горілкою центрального кругового отвору діаметром 160 мм. Вимірювання виконувалося за допомогою механічного знімного деформометра із базою 10 мм та електронним індикатором. Співставлення результатів вимірювань із розрахунками показано на рисунку 1. Як видно з рисунку 1, їх збіг свідчить про можливість використання залежностей (1), (2) та (4) для розрахунку технологічних деформацій пластин із круглими отворами.

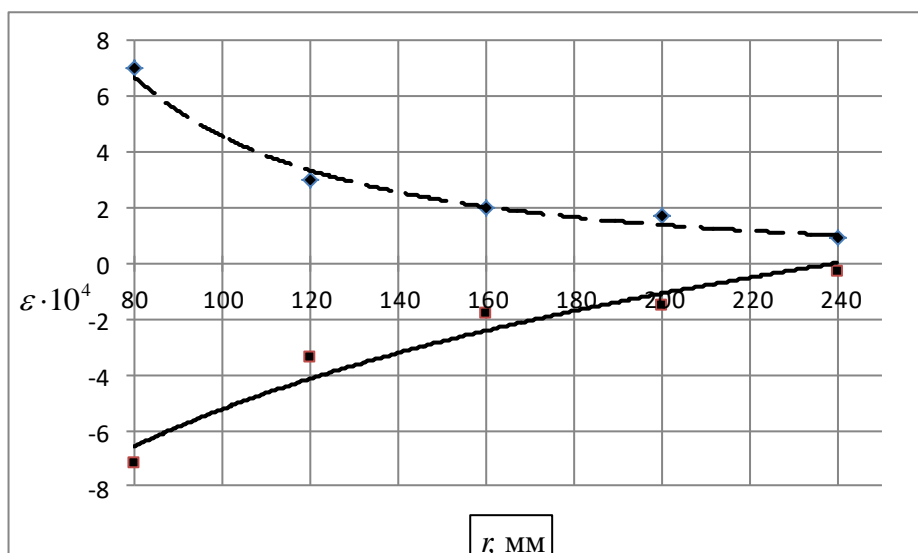


Рисунок 1 – Деформації від теплового вирізування сталевій пластині круглого отвору діаметром 160 мм

- ♦— теоретичний розподіл радіальних деформацій
- ♦— експериментальний розподіл радіальних деформацій
- теоретичний розподіл колових деформацій
- експериментальний розподіл колових деформацій

Розрахунки та результати вимірювань доводять, що після виконання отворів в коловому напрямку метал пластини знаходиться у стисненому стані. Такий стиск може призвести до втрати стійкості пластини одразу після вирізування отвору або при варення пояску, а також може сприяти втраті стійкості пластини при певних значеннях напружень, менших ніж критичні.

Втрата стійкості пластини після вирізування отвору виникне при умові $q \geq \sigma_{r \text{ кр}}$, де $\sigma_{r \text{ кр}}$ – критичні радіальні напруження, Па.

Із теорії зварювальних деформацій та напружень відомо, що при зварюванні колових швів та вварюванні в листи жорстких фланців критичні радіальні напруження залежать виключно від радіусу зони пластичних деформацій і практично не залежать від зовнішнього діаметру пластини. Критичні напруження в даному випадку можна визначити як [10, 11]

$$\sigma_{r \text{ кр}} = \frac{3D}{r_n^2 S}, \quad (5)$$

де D – циліндрична жорсткість пластини, Н·м; $r_n = r_0 + b_{\text{п}}$ – радіус зони пластичних деформацій, м; $b_{\text{п}}$ – ширина зони пластичних деформацій, м. Останній може бути визначений за методикою, описаній в [14].

Для визначення можливості втрати стійкості пластин з корпусних маловуглецевих та низьколегованих сталей після теплового різання отворів або після приварення до кромки отворів поясків виконано відповідні розрахунки за формулами (1), (2), (5) (Таблиця 1).

Погонна енергія нагрівання при цьому розрахована із використанням даних дослідження [11]. Отримані за результатами розрахунків графічні залежності (Рисунок 2) дозволяють встановити чи виникне при відомій товщині та радіусу отвору втрата стійкості пластини після виконання технологічних операцій зварювання та/або різання.

Під час експлуатації плавучого доку пластини із отворами підлягають дії зовнішніх зусиль. При цьому втрата стійкості може мати місце при навантаженнях набагато меншими, ніж визначеними за теоретичними залежностями. Зовнішні навантаження, при яких даний вид пластин може втратити стійкість, можна визначити за залежністю

$$\sigma_{\text{в}} = K_E \sigma_{\text{кр}}, \quad (6)$$

де K_E – коефіцієнт, який враховує наявність технологічного напружено-деформованого стану; $\sigma_{\text{кр}}$ – критичні напруження, Па.

Для визначення коефіцієнту K_E застосовувалася теорема П.Ф. Папковича [3], згідно якої

$$\frac{q}{\sigma_{r \text{ кр}}} + \frac{\sigma_{\text{в}}}{\sigma_{\text{кр}}} = 1$$

Тоді

$$K_E = 1 - \frac{q}{\sigma_{r \text{ кр}}} \quad (7)$$

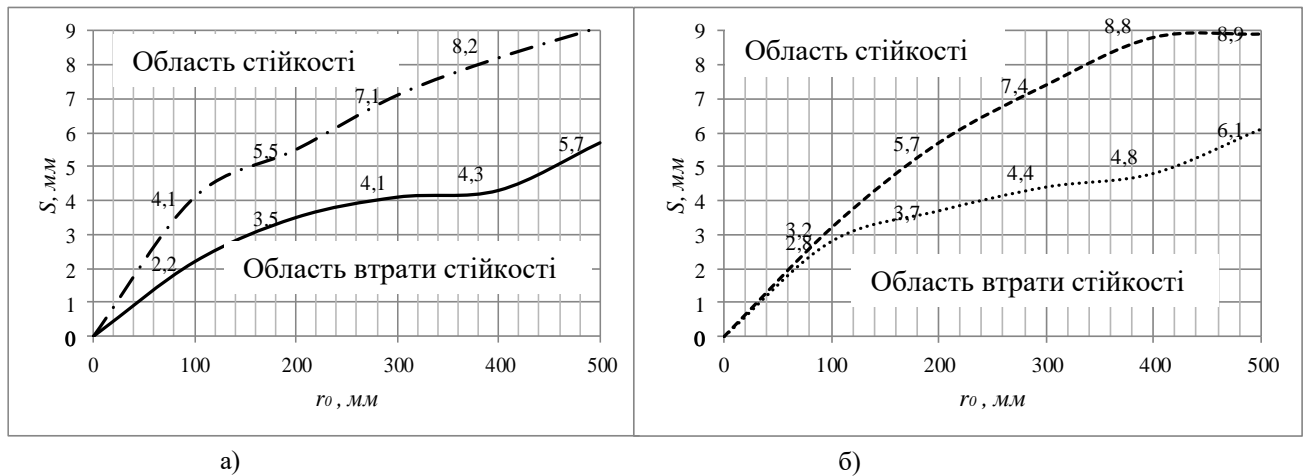


Рисунок 2 – Можливість втрати стійкості пластини після теплового вирізування а), та під час приварення пояску до кромки отвору б)

- киснево-ацетиленове вирізування, $\frac{q_{\Pi}}{S} = 5200 \frac{\text{Дж}}{\text{см}^2}$
- _____ плазмове вирізування, $\frac{q_{\Pi}}{S} = 1670 \frac{\text{Дж}}{\text{см}^2}$
- ручне електродугове зварювання
- напівавтоматичне зварювання у середовищі CO₂

Таблиця 1 – Параметри режиму двостороннього при варення поясків

Параметр	Товщина пластини, мм							
	4	6	8	10	12	14	16	20
Катет шва, мм	3	4	5	5	6	6	8	8
Кількість проходів для одного шва	1	1	1	1	1	1	2	2
Інтенсивність питомої енергії для одного проходу для ручного дугового зварювання, Дж/см ²	3800	4300	4600	3700	4300	3700	2800	2300
Інтенсивність питомої енергії для одного проходу для напівавтоматичного зварювання у середовищі CO ₂ , Дж/см ²	2200	2500	2700	2100	2500	2100	1600	1400

Із використанням залежностей (7), (5) та (1) коефіцієнт K_E розраховано для суднобудівних маловуглецевих та низьколегованих сталей. Як видно із наведених залежностей, цей коефіцієнт, який враховує наявність технологічного напружено-деформованого стану, знаходиться у широкому діапазоні та залежить від конкретних технологій вирізування та зварювання, а також від товщини пластини та радіусу отвору.

Резюме. 1. Виконання круглих отворів у пластинах башт плавучого доку викликає створення технологічного залишкового напружено-деформованого стану, складові якого можуть бути визначені за допомогою наведених у статті залежностей.

2. Під час проектування конструкцій металевих башт плавучих доків розміри отворів із вільними та підкріпленими поясками кромками повинні прийматися так, щоб одразу після виконання цих отворів не виникала втрата стійкості.

3. Наявність залишкового технологічного напружено-деформованого стану призводить до зниження стійкості металевих пластин башт із круглими отворами, які можна врахувати за допомогою введення коефіцієнта K_E , який залежить від технологій вирізування та/або зварювання, а також товщини пластини та радіусу отвору.

Література

1. Проектирование, технология и организация строительства композиционных плавучих доков [Текст] : монография / А. С. Рашковский [и др.] ; науч. ред. А. С. Рашковский ; Национальный ун-т кораблестроения им. адмирала Макарова. - Николаев : НУК, 2008. - 614 с.: рис. - Библиогр.: с. 556-573. - ISBN 978-966-96838-2-3.
2. Технология корпусостроительных работ: учебник / А.С. Рашковский, А.В. Щедрососев, А.М. Фарионов, Н.В. Цыкало, В.Н. Перов, С.Н. Слижевский; под общ. ред. проф. А.С. Рашковского. – Николаев: НУК, 2018. – 516 с.

3. Опір матеріалів: навч. посіб. / Л. І. Коростильов [та ін.] ; за ред. д-ра техн. наук, проф. Л. І. Коростильова ; Нац. ун-т кораблебудування ім. адмірала Макарова, Херсон. філія. - 2-ге вид., перероб. та допов. - Миколаїв : НУК, 2019. - 297 с. : рис. - Бібліогр.: с. 277-278. - 100 прим. - ISBN 978-966-321-365-1.
4. Luginin, O.Ye., S.V. Terlych, and R.Yu. Korshykov. "Computer-oriented five moment methods in calculating the bending for ship's floors". *Transport development*, no. 2(9) (August 12, 2021): 20-36. Accessed May 12, 2022. <https://journals.onmu.in.ua/index.php/journal/article/view/118>.
5. Справочник по строительной механике корабля [Текст] : [В 3 т.] / Под общ. ред. акад. Ю. А. Шиманского. - Ленинград : Судпромгиз, 1958-1960. - 3 т.
6. Коробанов Ю. Н. Перспективы интеграции подкреплений под контейнерные фитинги в отечественные САПР / Ю. Н. Коробанов, О. М. Лищук, А. А. Коробанова // *Збірник наукових праць Національного університету кораблебудування*. - 2013. - № 2. - С. 12-17. - Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/znpnuk_2013_2_4.
7. Сегаль В. Е. Влияние длины прерывной части на концентрацию напряжений в прерывистых связях / В. Е. Сегаль // *Судостроение*. - 1967. - № 10. - С. 11-14.
8. Сиверс Н.Л. Расчет и конструирование судовых надстроек. Л.: Судостроение, 1966.- 300 с.
9. Сиверс, Н. Л. Экспериментальное исследование концентрации напряжений у концов надстроек / Н. Л. Сиверс, Г. М. Рижинашвили // *Судостроение*. - 1969. - № 7. - С. 10-13.
10. Напряженное состояние сварных и паяных узлов из разнородных материалов с мягкой прослойкой при осевой нагрузке / В. В. Квасницкий, В. Ф. Квасницкий, Dong Chunlin, М. В. Матвиенко, Г. В. Ермолаев // *Автоматическая сварка*. - 2018. - № 4. - С. 7-13.
11. Effect of the Rigid interlayer Thickness on the stress-strain of metal-Graphite Assemblies Under Thermal Loading / G. V. Ermolaev, V. A. Martynenko, A. V. Labartkava, M. V. Matvienko // *Strenght of Materiale*. - may, 2017, Vol. 49. - Issue 3. - P. 422-428.
12. Дорохов А.С., Катаев Ю.В., Краснящих К.А., Вялых Г.М. Компьютерное проектирование в системе AutoCAD: Учебное пособие / А.С. Дорохов, Ю.В. Катаев, К.А. Краснящих, Г.М. Вялых. М.: Изд-во РГАУ-МСХА, 2016. 80с.
13. Основи теорії пружності, будівельної механіки, міцності та вібрації суден [Текст] : навчальний посібник / А. М. Сердюченко [та ін.] ; ред. А. М. Сердюченко. - Миколаїв : НУК, 2012. - 424 с. - ISBN 978-966-321-206-7.
14. Коростыльов Л. И. Оценка коэффициента концентрации напряжений в сварных узлах тонкостенных конструкций расчетом макро- и микроконцентрации / Л. И. Коростыльов, Д. Ю. Литвиненко // *Науковий вісник Херсонської державної морської академії*. - 2015. - № 2. - С. 184-194. - Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nvkhdm_2015_2_23.

References

1. Proyektirovaniye, tekhnologiya i organizatsiya stroitel'stva kompozitnykh plavuchikh dokov [Tekst] : monografiya / A. S. Rashkovskiy [i dr.] ; nauch. red. A. S. Rashkovskiy ; Natsional'nyy un-t korablestroyeniya im. admirala Makarova. - Nikolayev : NUK, 2008. - 614 s.: ris. - Bibliogr.: s. 556-573. - ISBN 978-966-96838-2-3.
2. Tekhnologiya korpusostroitel'nykh rabot: uchebnik / A.S. Rashkovskiy, A.V. Shchedrolosev, A.M. Farionov, N.V. Tsykalo, V.N. Perov, S.N. Slizhevskiy; pod obshch. red. prof. A.S. Rashkovskogo. - Nikolayev: NUK, 2018. - 516 s.
3. Opir materials: navch. posib. / L. I. Korostilov [that in.] ; for red. Dr. tech. sciences, prof. L. I. Korostilova; National shipbuilding university im. Admiral Makarov, Kherson. philia. - 2nd view., Rev. that dopov. - Mykolaiv: NUK, 2019. - 297 p. : rice. - Bibliography: p. 277-278. - 100 approx. - ISBN 978-966-321-365-1.
4. Luginin, O.Ye., S.V. Terlych, and R.Yu. Korshykov. "Computer-oriented five moment methods in calculating the bending for ship's floors". *Transport development*, no. 2(9) (August 12, 2021): 20-36. Accessed May 12, 2022. <https://journals.onmu.in.ua/index.php/journal/article/view/118>.
5. Spravochnik po stroitel'noy mekhanike korablya [Tekst] : [V 3 t.] / Pod obshch. red. akad. YU. A. Shimanskogo. - Leningrad : Sudpromgiz, 1958-1960. - 3 t.
6. Korobanov Yu. N. Prospects for the integration of reinforcements for container fittings into domestic CAD systems / Yu. N. Korobanov, O. M. Lishchuk, A. A. Korobanov // *Collection of scientific practices of the National University of Shipbuilding*. - 2013. - No. 2. - S. 12-17. - Access mode: http://nbuv.gov.ua/UJRN/znpnuk_2013_2_4.
7. Segal' V. Ye. Vliyaniye dliny preryvnoy chasti na kontsentratsiyu napryazheniy v preryvistykh svyazyakh / V. Ye. Segal' // *Sudostroyeniye*. - 1967. - № 10. - S. 11-14.
8. Sivers N.L. Raschet i konstruirovaniye sudovykh nadstroyek. L.: Sudostroyeniye, 1966.- 300 s.
9. Sivers, N. L. Eksperimental'noye issledovaniye kontsentratsii napryazheniy u kontsov nadstroyek / N. L. Sivers, G. M. Rizhinashvili // *Sudostroyeniye*. - 1969. - № 7. - S. 10-13.
10. Napryazhennoye sostoyaniye svarnykh i payanykh uzlov iz raznorodnykh materialov s myagkoy prosloykoy pri osevoy nagruzke / V. V. Kvasnitskiy, V. F. Kvasnitskiy, Dong Chunlin, M. V. Matviyenko, G. V. Yermolayev // *Avtomaticheskaya svarka*. - 2018. - № 4. - S. 7-13.
11. Effect of the Rigid interlayer Thickness on the stress-strain of metal-Graphite Assemblies Under Thermal Loading / G. V. Ermolaev, V. A. Martynenko, A. V. Labartkava, M. V. Matvienko // *Strenght of Materiale*. - may, 2017, Vol. 49. - Issue 3. - P. 422-428.

12. Dorokhov A.S., Katayev YU.V., Krasnyashchikh K.A., Vyalykh G.M. Komp'yuternoye proyektirovaniye v sisteme AutoCAD: Uchebnoye posobiye/ A.S. Dorokhov, YU.V. Katayev, K.A. Krasnyashchikh, G.M. Vyalykh.M.: Izd-vo RGAU-MSKHA, 2016. 80s.

13. Osnovi teoriYi pruzhnosti, budivelnnoYi mehaniki, mitsnostI ta vIbratsiYi suden [Tekst] : navchalniy posIbnik / A. M. Serdyuchenko [ta In.] ; red. A. M. Serdyuchenko. - MikolaYiv : NUK, 2012. - 424 s. - ISBN 978-966-321-206-7.

14. KorostyilYov L. I. Otsenka koeffitsienta kontsentratsii napryazheniy v svarnyih uzlah tonkostennyih konstruktsiy raschetom makro- i mikrokontsentratsii / L. I. KorostyilYov, D. Yu. Litvinenko // Naukoviy vIsnik HersonskoYi derzhavnoYi morskoyi akademiyi. - 2015. - # 2. - S. 184-194. - Rezhim dostupu: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nvkhdm_i_2015_2_23.

During making sections of the floating dock towers, cutting holes with a diameter of more than 60 mm is carried out by oxygen-acetylene or plasma cutting. The uneven distribution of high temperatures, which is characteristic of these cutting technologies after cooling the metal, leads to the creation of residual deformations and mechanical stresses. When welding to the plate of the annular belt or stiffeners, which often support the edge of the hole, there is also a residual stress-strain state. It should be noted that floating docks (unlike transport, industrial, special and other vessels) receive significant alternating and periodic mechanical loads during immersion or ascent with the vessel being docked. Thus, the residual deformations and stresses, which are due to the technology of making holes, affect the strength and reliability of the structures of floating dock towers. The calculated results of researches of definition of regularity of distribution of deformations which are caused by technological operations of performance of cuts of a round form in plates of metal towers of floating docks are resulted. The calculated results of researches of definition of regularity of distribution of deformations which are caused by technological operations of performance of cuts of a round form in plates of metal towers of floating docks are resulted. Their influence on strength and stability depending on the type of technological operations, sizes and material of plates is described. The calculated results of researches of definition of regularity of distribution of deformations which are caused by technological operations of performance of cuts of a round form in plates of metal towers of floating docks are resulted. Their influence on strength and stability depending on the type of technological operations, sizes and material of plates is described. It was found that the presence of residual technological stress-strain state reduces the stability of metal plates of towers with round holes, which can be taken into account by introducing the coefficient of K_e , which depends on cutting and / or welding technologies, as well as plate thickness and hole radius.

Keywords: technological operations, ship plates, floating docks, strength and stability.

Терлич С.В., доцент кафедри суднобудування та ремонту суден, к.т.н.,
Херсонський науково-навчальний інститут Національного університету кораблебудування імені адмірала
Макарова