

DOI 10.15589/jnn20150602
 УДК 629.5.023.4
 К68

ANALYSIS OF THE SPECIFIC FEATURES OF DETERMINING
 THE COEFFICIENTS OF STRESS CONCENTRATION IN HULL STRUCTURES

АНАЛИЗ ОСОБЕННОСТЕЙ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТОВ КОНЦЕНТРАЦИИ
 НАПРЯЖЕНИЙ В КОРПУСНЫХ КОНСТРУКЦИЯХ

Yurii M. Korobanov
 yuriy.korobanov@nuos.edu.ua
 ORCID: 0000-0002-1017-3939

Anatolii I. Kuznietsov
 anatoly@dg-ala.com
 ORCID: 0000-0001-5149-3181

Alla A. Korobanova
 korobanova-alla@yandex.ru
 ORCID: 0000-0002-2841-1659

Ю. М. Коробанов
 д-р техн. наук, проф.

А. И. Кузнецов
 к-т техн. наук, доц.

А. А. Коробанова
 студ.

Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv

Национальный университет кораблестроения им. адмирала Макарова, г. Николаев

Abstract. The stress concentration factors by various authors have been studied and generalized. Some of the authors interpret them as a ratio of the maximum to medium stresses in the most underdesigned part of the structure. Others suggest that the stress concentration factor is a ratio of the maximum to medium stresses in the most remote from the concentrator part of the structure. These two trends are compared by the example of a plate with a circular hole and a discontinuous plate. The results of the calculations in both approaches may vary considerably. The reliable results for the formation and generalization of the stress concentration factors substantiated by various authors are also given in this paper. According to the results of the study, the theories of failure, e.g. maximum-strain-energy theory, are suggested to be used for estimating the stress concentration factors at the concentrator circuit. The values of the stress concentration factors are determined by the ratio of the reduced stresses using the assumed theory of failure in the most critical point of the concentrator circuit to the reduced stresses away from this circuit. Such representation of the stress concentration factor is the most viable, since current strength software systems, such as ANSYS, represent calculation results in reduced stresses.

Key words: holes; hull structure supports; stress concentration factors.

Аннотация. Выполнено исследование по систематизации коэффициентов концентрации напряжений, возникающих в конструкциях судового корпуса. Сущность коэффициентов концентрации напряжений трактуется по-разному в литературных источниках. В связи с этим возникает вопрос о значении коэффициентов концентрации напряжений в достаточно сложных корпусных конструкциях. За основу анализа принимаются результаты расчетов методами конечных и граничных элементов в сравнении с работами других авторов.

Ключевые слова: вырезы; прерывистые связи; подкрепления корпусных конструкций; коэффициенты концентрации напряжений.

Анотація. Виконано дослідження по систематизації коефіцієнтів концентрації напружень, які виникають при формуванні вирізів, при використанні перериваних в'язей, при локальних підкріпленнь. Сутність коефіцієнтів концентрації напружень трактується по-різному в літературних джерелах. У зв'язку з цим виникає запитання про значення коефіцієнтів концентрації напружень в досить складних корпусних конструкціях. За основу аналізу приймаються результати розрахунків методами кінцевих і граничних елементів порівняно з роботами інших авторів.

Ключові слова: вирізи; переривані в'язі; підкріплення; коефіцієнти концентрації напружень.

REFERENCES

- [1] Vainberg D. V. *Kontsentratsiya napriazhenii v plastinakh okolo otverstii i vykruzhek* [Stress concentration in plates by the holes and bossings]. Kyiv, Tekhnika Publ., 1969. 220 p.

- [2] Garbuz V. S. *Kontsentratsiya napriazhenii v preryvistykh svyaziakh sudovogo korpusa* [Stress concentration in the ship structure intermittent connections]. Leningrad, Sudostroenie Publ., 1967. 186 p.
- [3] Ilchenko L. P., Gusev V. P., Chibiriak I. M. *Vzaimnoe vliianie priamougolnykh vyrezov na kontsentratsiyu napriazhenii v plastinakh pri osovom pastiazhenii* [Mutual influence of holes on the stress concentration in the plate at axial tension]. *Trudy DVPI — Proceedings of DVPI*, 1975, vol. 102, p. 33–39.
- [4] Korotkin Ya. I., Rostovtsev D. M., Sivers N. L. *Prochnost korablya* [Ship strength]. Leningrad, Sudostroenie Publ., 1974. 432 p.
- [5] Kochanov Yu. P., Lysenko T. I. *Primenenie gipotez prochnosti dlya otsenki kontsentratsii napriazhenii na podkreplennom konture krugovogo otverstiya* [Use of the theories of failure for estimating the stress concentration at the supported circuit of a circular hole]. *Trudy NKI Stroitel'naya mekhanika kopablya — Proceedings of NSI «Ship Structural Design»*, 1970, issue 41, pp. 14–21.
- [6] Lainer S. V. *Opytnoe issledovanie prochnosti sudovykh korpusov* [Experimental study of the ship hull strength]. Leningrad, Sudostroenie Publ., 1950. 167 p.
- [7] Chuvikovskiy V. S. *Problemy prochnosti sudov* [Ship strength problems]. Leningrad, Sudostroenie Publ., 1975. 365 p.
- [8] Birgera I. A., Panovko Ya. G. *Prochnost ustoychivosti kolebaniya* [Strength, stability, oscillating motion]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1968. 464 p.
- [9] *RD 5.1098. Rukovodyashchiy dokument po standartizatsii. Vyrezy v palubakh i platformakh. Pravila proektirovaniya* [Governing standardization document. Holes in decks and platforms. Design rules]. 1987. 13 p.
- [10] Shimanskiy Yu. A. *Spravochnik po stroitel'noy mekhanike korablya* [Reference book on ship structural design]. Leningrad, Soyuz Publ., 1958, vol. 1. 627 p.
- [11] Palii O. M. *Spravochnik po stroitel'noy mekhanike korablya* [Reference book on ship structural design]. Leningrad, Sudostroenie Publ., 1982, vol. 2. 462 p.
- [12] Timoshenko S. P., Gudier Dzh. *Teoriya uprugosti* [Elasticity theory]. Moscow, Nauka Publ., 575 p.
- [13] Josef E. Shingley, Charls R. Mischke, Richard G. Budynas. *Mechanical Engineering Design. Seven Edition*. McGraw — Hill International Edition, 2003. 1030 p.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Во многих случаях при проектировании корпусных конструкций решающую роль оказывает такой показатель, как концентрация напряжений. Особенно это заметно при появлении в составе конструкций вырезов, подкреплений к ним, при формировании прерывистых связей, а также при резком изменении профиля корпусных связей или размеров их сечения. Отображает напряженное состояние таких элементов корпусных конструкций коэффициент концентрации напряжений в каждом отдельном сечении. Анализ особенностей определения коэффициентов концентрации напряжений ведется многие годы [1–13]. Сопровождается такой интерес стремлением создавать рациональные и равнопрочные корпусные конструкции на основе численных значений коэффициентов концентрации напряжений.

Однако, как показывает анализ, формирования понятий о концентрации напряжений, а следовательно, и об их коэффициентах у многих авторов расходится по принципиальным соображениям.

АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ЛИТЕРАТУРЫ

В некоторой справочной литературе значения коэффициента концентрации напряжений приво-

дятся как отношение максимальных напряжений вызванных концентрацией напряжений к среднему значению напряжений в этом же сечении. В других литературных источниках коэффициент концентрации напряжений рассматривается как отношение наибольших напряжений σ_{\max} , действующих в районе ослабленного сечения к напряжению, действующего на бесконечном удалении от него. Таким образом, становится необходимым анализ и особенность нахождения коэффициента концентрации напряжений к потенциально более сложным конструкциям и узлам судового корпуса. В отдельных публикациях коэффициенты концентрации напряжений определяются при различных видах деформирования, видах нагружения, свойствах материала (в упругой зоне деформирования, в упругопластической зоне). При чистом сдвиге максимальные касательные напряжения принято относить к касательным напряжениям в каждой точке конструкции. Формируются представления об эффективных коэффициентах концентрации напряжений также на основе усталостного анализа разрушения, опираясь на предел усталости опытных конструкций, отнесенных к пределу усталости материала.

ЦЕЛЬ СТАТЬИ состоит в анализе взглядов различных авторов на тонкости определения коэффициентов концентрации напряжений в корпусных

конструкциях судового назначения. Рассматривались работы, исследующие напряжения в прерывистых связях при формировании вырезов и подкреплений к ним, при резком изменении площадей поперечных сечений, при оценке напряженно деформационного состояния в районе окончания прерывистых связей. Необходимость в подобном анализе возникает вследствие разнородности конструктивных элементов судового корпуса и в разнообразии воспринимаемых ими нагрузок, что вызывает некоторые затруднения при нахождении действующих коэффициентов концентрации напряжений.

Интерес к определению коэффициентов концентрации напряжений в корпусных конструкциях судового назначения различными авторами связан с тем, что большинство авторов дает их к сравнительно простым конструкциям. В то же время проектирование корпусных конструкций сопряжено с довольно сложными конструктивными решениями.

ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА

Согласно [1] коэффициент концентрации напряжений определяется отношением наибольших напряжений σ_{\max} , действующих в районе ослабленного сечения к напряжению, действующего на бесконечном удалении от него σ_0 .

В [2] коэффициент концентрации напряжений иллюстрируется для случая одноосного растяжения и для чистого сдвига. Под максимальным коэффициентом концентрации напряжений, у вырезов в бесконечных пластинах, принимается отношение максимальных напряжений $\sigma_{\theta\max}$, действующих на контуре выреза к напряжениям, приложенным к пластине на бесконечности σ_0 . Тогда при одноосном растяжении максимальный коэффициент концентрации напряжений представляется в виде:

$$\alpha_0 = \sigma_{\theta\max} / \sigma_0,$$

при чистом сдвиге:

$$\alpha_0 = \tau_{\theta\max} / \tau_0,$$

где τ_0 — касательные напряжения, действующие в пластине на бесконечном удалении от места концентрации.

Напряженное состояние в остальных точках контура согласно [2] принято характеризовать коэффициентами концентрации, которые выражаются в отношениях:

$$\sigma_{\theta} / \sigma_0, \text{ а также } \sigma_{\theta} / \tau,$$

где σ_0 — нормальные напряжения на кромке выреза; σ_0 и τ — нормальные и касательные напряжения, приложенные к пластине на бесконечности.

В [3] анализируется взаимное влияние прямоугольных вырезов на концентрацию напряжений

в пластине при осевом растяжении. В этой работе вводится такое понятие, как теоретический коэффициент концентрации напряжений, который предлагается определять по формуле:

$$\alpha_0 = \sigma_{\theta\max} / \sigma_{\text{нетто}},$$

где $\sigma_{\theta\max}$ — значение главного максимального напряжения на скругленной кромке выреза, $\sigma_{\text{нетто}}$ — среднее нормальное напряжение по середине выреза.

Рассматривая пластину в [3] с двумя последовательными вырезами авторы установили значительное различие между коэффициентами концентрации напряжений в зависимости от ширины перемычки между вырезами a и ширины вырезов b , отнесенных к ширине пластины B . При наличии широкой перемычки ($a / b = 2$) и при отношении $b / B = 0,25-0,33$ возникает большая разница между коэффициентами концентрации и напряжений. В районе крайних кромок выреза, ближайших к торцу, пластины по отношению к району перемычки составляет около 20%. При ширине перемычки между вырезами равной ширине вырезов разница между напряжениями в тех же точках колеблется в пределах 23–38%, а при ширине перемычки в два раза меньшей ширины прямоугольного выреза разница в коэффициентах концентрации напряжений достигает величины $\sigma_A - \sigma_B = 36-50\%$.

Приведенные цифры говорят о важности достоверного определения коэффициентов концентрации напряжений, поскольку они активно используются при конструировании корпусных конструкций судового назначения.

В монографии [4] коэффициент концентрации напряжений равен отношению наибольших нормальных напряжений в зонах их концентрации σ_{\max} к среднему напряжению σ_0 по сечению, вызывающему концентрацию.

Опыт эксплуатации морских судов показал, что большое число повреждений и разрушений корпусных конструкций возникало из-за появления напряжений, в связи с их концентрацией, поэтому недооценивать их в процессе конструирования опасно. В качестве примера оговаривается концентрация напряжений в районе концов надстроек. Максимальные нормальные напряжения σ_{\max} в районе концов надстройки рекомендуется представлять в виде суммы средних напряжений в непрерывных связях корпуса σ_0 , а также в виде дополнительных напряжений $\Delta\sigma$, обусловленных влиянием касательными усилиями. Тогда коэффициент концентрации напряжений имеет вид такого выражения:

$$\alpha = 1 + \Delta\sigma / \sigma_0.$$

В работе [5] показано, что при решении плоских задач о концентрации напряжений на подкрепленных

контурах отверстий обычно используется такое отношение:

$$k = \sigma_{\max} / \sigma_0,$$

где σ_{\max} — максимальное значение одного из компонентов тензора напряжений, σ_0 — напряжения вдали от действующего концентратора напряжений. В [5] предлагается для оценки напряжений на контуре пластины воспользоваться гипотезами прочности, а значения коэффициента концентрации напряжений определять такой зависимостью:

$$k = \sigma_{\text{пр}} / \sigma,$$

где $\sigma_{\text{пр}}$ — приведенные напряжения по принятой гипотезе прочности в наиболее опасной точке контура, определяемого выражением:

$$\sigma_{\text{пр}} = \sqrt{\sigma_r^2 - \sigma_r \sigma_\theta + \sigma_\theta^2 + 3 \tau_{r\theta}^2},$$

соответствующем энергетической гипотезе прочности, где: σ — приведенные напряжения вдали от контура концентратора, σ_r , σ_θ , $\tau_{r\theta}$ — напряжения на контуре отверстия. Такое описание коэффициента концентрации напряжений наиболее жизненно, поскольку современные прочностные программные комплексы, например ANSYS, результаты расчетов представляют именно в приведенных напряжениях.

Монография [6] посвящена прочностным исследованиям судовых корпусов. Применительно к грузовым люкам коэффициент концентрации напряжений определяется как отношение максимального главного напряжения в углах люка к среднему нормальному напряжению палубы в районе люка. В [6] указано, что пока деформации металла корпусных конструкций носят упругий характер коэффициент концентрации напряжений численно равен коэффициенту концентрации деформаций.

Согласно [7] предлагается работоспособность узловых конструкций судового назначения характеризовать, так называемыми, эффективными коэффициентами концентрации напряжений α . Их величина отображается отношением:

$$\alpha = \sigma_{-1}^{\text{м}} / \sigma_{-1}^{\text{к}},$$

где $\sigma_{-1}^{\text{к}}$ — предел усталости опытных конструкций, включающих испытываемые узлы, при числе циклов $N = 2 \cdot 10^6$ и симметричном цикле нагружения, $\sigma_{-1}^{\text{м}}$ — предел усталости материала.

В качестве примера в [7] указаны средние значения эффективных коэффициентов концентрации напряжений α для различных типовых узлов корпусных конструкций. Особо приводятся результаты испытания узловых конструкций доведенных до усталостных трещин при циклическом нагружении. Такой подход позволяет осуществлять выбор перспектив-

ных конструкций с точки зрения усталостной прочности.

В справочнике [8] коэффициенты концентрации напряжений k формируются в зависимости от того, подвержены ли конструкции консольному закреплению, чистому изгибу, кручению и если конструкцией является оболочка.

Консольно закрепленная конструкция с жестким защемлением дана в [8]. Нагружена поперечной нагрузкой P имеет отверстие с центром на оси связи на расстоянии d от защемления. Выражение для коэффициента концентрации напряжений имеет вид:

$$k = \frac{\sigma_\theta}{2P \frac{h}{J}},$$

где h — высота сечения конструкции, J — момент инерции ее поперечного сечения.

При чистом изгибе коэффициент концентрации напряжений по контуру отверстия представляется несколько в ином виде [8]:

$$k = \frac{\sigma_\theta}{M \frac{R}{J}},$$

где M — момент чистого изгиба, J — момент инерции поперечного сечения, R — постоянная величина, характеризующая размер отверстия. Для эллиптического отверстия, такой размер равен $R = (a + b) / 2$; a и b — полуоси эллипса.

Тонкая изотропная плита толщиной h с квадратным отверстием, подвергнута действию крутящего момента H , который приложен по краям. Коэффициент концентрации напряжений, в этом случае, определяется как отношение момента на контуре отверстия M_θ к крутящему H [8].

Задача о напряженном состоянии сферической оболочки толщиной h , нагруженной равномерным внутренним давлением интенсивностью P_0 рассматривается при наличии ослабляющего кругового отверстия r_0 . Если усилие на контуре отверстия T_ϕ , то коэффициент концентрации напряжений принято определять выражением:

$$k = \frac{T_\phi}{P_0 h}.$$

Руководящий документ [9] посвящен нахождению коэффициентов концентрации напряжений в углах больших прямоугольных палубных вырезов. Здесь показано, что интенсивность концентрации напряжений характеризуется величиной наибольшего коэффициента концентрации напряжений:

$$\alpha = \sigma_k^{\text{max}} / \sigma_n;$$

где σ_k^{max} — наибольшие напряжения в зоне концентрации напряжений, $\sigma_n = \frac{Q}{S}$ — номинальные напря-

жения, Q — параметр нагрузки, действующей в расчетном сечении конструкции (изгибающий момент, продольная или сдвигающая нагрузка); S — соответствующая геометрическая характеристика сечения конструкции (момент сопротивления, площадь сечения продольных или связей, воспринимающих сдвиговую нагрузку).

В [10] принято считать, что если напряжение, действующее в конструкции на достаточном удалении от места резкого изменения площади поперечного сечения, обозначенного P , а напряжения в какой-либо точке, расположенной вблизи этого места P_1 , то отношение $k = \frac{P_1}{P}$ называется коэффициентом концентрации напряжений в данной точке. Применительно к прерывистым связям отмечено, что коэффициент концентрации напряжений этих связей в значительной степени зависит от формы их образования.

В [11] утверждается, что коэффициент концентрации напряжений являет собой отношение местного напряжения к среднему или какому-либо другому характерному для рассматриваемого случая деформирования напряжения, полученного на основе зависимостей сопротивления материала. При не упругом деформировании коэффициент концентрации напряжений называют теоретическим, чтобы указать на его «упругое» происхождение.

В монографии [12] коэффициент концентрации напряжений трактуется как отношение максимального напряжения к среднему напряжению, в наиболее узкой части конструкции. Рассматривается пластина, подвергнутая чистому изгибу моментами, приложенными по ее оконечностям. Тогда в [12] коэффициент концентрации напряжений определяется как отношение наибольшего напряжения в месте изменения сечения конструкции к наибольшему напряжению в самой узкой части конструкции.

В работе [13] в виде справочной информации коэффициент концентрации напряжений предлагается рассчитывать как отношение наибольших напряжений к напряжениям в ослабленном сечении.

Для сравнения результатов предлагаемых особенностей нахождения коэффициентов концентрации напряжений было проведено исследование их определения для двух случаев. В случае отношения максимальных действующих напряжений, в одном случае, отнесенных к напряжениям вдали от концентратора напряжений, в другом — к средним напряжениям в сечении концентратора напряжений. Сравнительное сопоставление было проведено на двух наиболее распространенных случаях судового корпусного конструирования. В одном случае анализируется растягиваемая пластина с круговым отверстием концентратора напряжений, рис. 1,а в другом растягиваемая прерывистая пластина, рис. 1,б. Такие схемы пластин содержащих концентраторы подобраны не случайно,

поскольку в этом случае они сопоставимы. В качестве концентратора представлены окружность радиуса R , таким же радиусом проведено сопряжение прерывной и непрерывной частей пластины.

Приведенные схемы позволяют сопоставлять значения коэффициентов концентрации напряжений для двух случаев: для пластины с отверстием и для прерывистой пластины. Предполагается рассмотреть на их примере различия в коэффициентах концентрации напряжений, если максимальные напряжения относить к среднему значению напряжений в сечении концентратора или к среднему значению напряжений на значительном удалении от него.

Из условия равновесия растягиваемой прерывистой пластины или пластины с вырезом толщиной t усилие в сечении значительно удаленном от концентратора напряжений можно представить в виде:

$$P = \sigma_{cp0}bt, \tag{1}$$

усилие в сечении концентратора напряжений равно:

$$P = \sigma_{cp1} \frac{n-1}{n} bt, \tag{2}$$

где b — ширина растягиваемой пластины. Приравнявая (1) и (2) получим:

$$\frac{\sigma_{cp1}}{\sigma_{cp0}} = \frac{n}{n-1}. \tag{3}$$

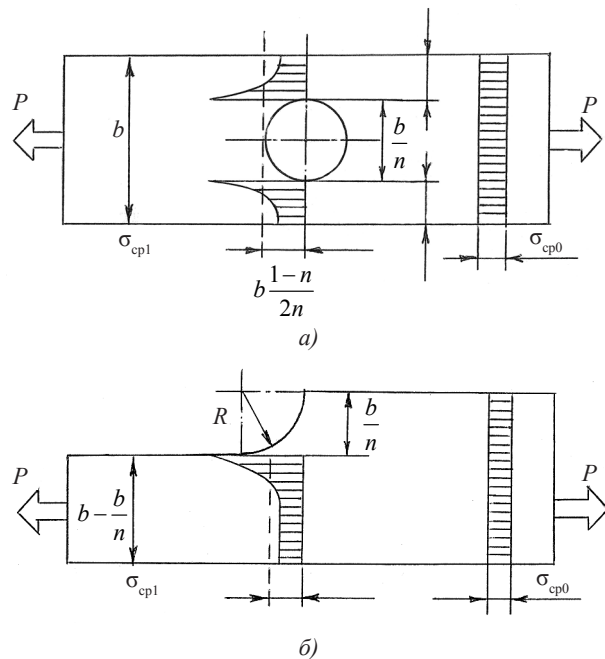


Рис. 1. Схемы пластин, подверженных растяжению, содержащих концентраторы напряжений:

а — пластина с круговым отверстием; б — прерывистая пластина

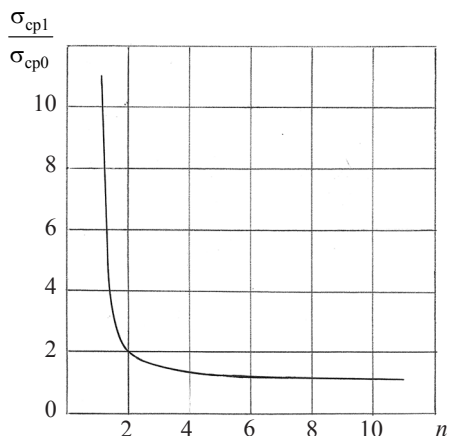


Рис. 2. Зависимость отношения среднего напряжения, действующего в середине концентратора напряжений, к напряжениям на бесконечном удалении от него к относительному значению радиуса сопряжения прерывистой конструкции или радиуса окружности выреза

Данное выражение (3) характеризует, косвенным образом, отношение коэффициентов концентрации напряжений в зависимости от того, к какому значению напряжений отнесены наибольшие напряжения; к напряжениям вдали от концентратора или в средней его части. Графически эта зависимость (3) изображена на рис. 2.

Как видно из рис. 2, значения коэффициентов концентрации напряжений могут отличаться на порядок и более.

ВЫВОДЫ. В данной работе обобщены и систематизированы данные по схемам определения коэффициентов концентрации напряжений. Практически в каждом из рассмотренных источников дается свое трактование коэффициентов концентрации напряжений. Одни предлагают относить максимальные напряжения в местах концентрации к средним в этом же сечении. Другие считают, что максимальные напряжения следует относить к напряжениям, действующим вдали от места концентрации. Как показал анализ, значения коэффициентов концентрации в этом случае, могут отличаться на порядок и более.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] **Вайнберг, Д. В.** Концентрация напряжений в пластинах около отверстий и выкружек [Текст]: справочное пособие / Д. В. Вайнберг. — К. : «Техника», 1969. — 220 с.
- [2] **Гарбуз, В. С.** Концентрация напряжений в прерывистых связях судового корпуса [Текст] / В. С. Гарбуз. Л. : Судостроение, 1967. — 186 с.
- [3] **Ильченко, Л. П.** Взаимное влияние вырезов на концентрацию напряжений в пластине при осевом растяжении [Текст] / Л. П. Ильченко, В. П. Гусев, И. М. Чибиряк // Труды ДВПИ, том. 102, 1975 г. — С. 33–39.
- [4] **Короткин, Я. И.** Прочность корабля [Текст] / Я. И. Короткин, Д. М. Ростовцев, Н. Л. Сиверс. — Л. : Судостроение, 1974. — 432 с.
- [5] **Кочанов, Ю. П.** Применение гипотез прочности для оценки концентрации напряжений на подкрепленном контуре кругового отверстия [Текст] / Ю. П. Кочанов, Т. И. Лысенко // Труды НКИ «Строительная механика корабля» Вып 41, 1970. — С. 14–21.
- [6] **Лайнер, С. В.** Опытное исследование прочности судовых корпусов. Л. : Судостроение, 1950. — 167 с.

Ю. А. Шиманский утверждает, что коэффициенты концентрации напряжений следует фиксировать во многих точках проектируемой конструкции. Большинство работ посвящено анализу концентрации напряжений на примере пластин, изредка на оболочках и только в нескольких рассматриваются концентрации в палубных перекрытиях и судовых надстройках.

В некоторых работах коэффициенты концентрации напряжений характеризуют как отношение действующих моментов, например, крутящего к изгибающему. В других как отношение предела усталости опытных конструкций, при числе циклов $N = 2 \cdot 10^6$ к пределу усталости материала σ_{-1}^n . Для определения коэффициентов концентрации напряжений по такой схеме необходимо иметь результаты испытаний проектируемых конструктивных узлов при соответствующем цикле нагружения. Такой подход хорошо согласуется с методом последовательных экспериментально конструкторских приближений проектирования судовых корпусных конструкций.

Среди проанализированных источников есть предложение нахождения коэффициентов концентрации напряжений в зависимости от типа нагружения — чистого изгиба; при консольном закреплении.

В одной из работ [5] предлагается определять коэффициенты концентрации напряжений по приведенным напряжениям. Такое предложение можно считать перспективным для дальнейших исследований, поскольку расчеты методами конечных элементов предусматривают подачу результатов именно в приведенных напряжениях. Это позволяет конструирование судовых корпусных конструкций сопровождать современными расчетными программами, в том числе методами конечных элементов.

Поскольку судовые корпусные конструкции имеют достаточно сложное формирование и большое разнообразие действующих нагрузок рекомендуется коэффициенты концентрации напряжений определять для разнообразных конкретных точек в зависимости от рода действующих нагрузок, условий закрепления в приведенных напряжениях.

- [7] Проблемы прочности судов [Текст] // под редакцией В. С. Чувиковского. — Л. : Судостроение, 1975. — 365 с.
- [8] Прочность, устойчивость, колебания. Справочник [Текст] / под редакцией И. А. Биргера, Я. Г. Пановко. — М. : Машиностроение, 1968. — 464 с.
- [9] Руководящий документ по стандартизации РД5.1098-87. Вырезы в палубах и платформах. Правила проектирования. 1987 г. — 13 с.
- [10] Справочник по строительной механике корабля. Том 1. [Текст] / Под редакцией Ю. А. Шиманского // Л. : Гос. Союз изд-во судостроительной промышленности, 1958. — 627 с.
- [11] Справочник по строительной механике корабля. Том 2. [Текст] / под редакцией О. М. Палий. — Л. : Судостроение, 1982. — 462 с.
- [12] Тимошенко С. П. Теория упругости [Текст] / С. П. Тимошенко, Дж. Гудьер. — М. : Наука, 1975 г. — 575 с.
- [13] Josef E. Shingley. Mechanical Engineering Design. Seven Edition. [Text] / Josef E. Shingley, Charls R. Mischke, Richard G. Budynas // McGraw. — Hill International Edition. — 2003. — 1030 p.

© Ю. М. Коробанов, А. І. Кузнецов, А. А. Коробанова
Надійшла до редколегії 02.11.2015
Статтю рекомендує до друку член редколегії ЗНП НУК
д-р техн. наук, проф. *Л. І. Коростылев*