

doi: 10.32620/oikit.2020.87.09

УДК 629.735.33.023.4.001.24

А. Г. Дибир, А. А. Кирпикин, Н. И. Пекельный

К вопросу о рациональной форме прессованного бульбоугольника

Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ»

В самолетостроении и вертолетостроении широкое распространение получили бульбоугольники – уголки с бульбой на конце стенки. Они лучше простого уголка, так как имеют более высокие критические напряжения при сжатии – больше предела пропорциональности. Они лучше тавров, так как тавры крепятся двумя рядами заклепок, что ухудшает герметичность. Бульбоугольники лучше зет профилей. Последние более высокие, что уменьшает строительную высоту сечения и увеличивает нагрузку на панели и обычно имеют избыточную площадь поперечного сечения. Бульбоугольники широко применяются в конструкции металлических фюзеляжей самолетов и вертолетов, в хвостовой балке вертолетов, в крыле и оперении легких самолетов, в закрылках, элеронах и рулях. Однако современные бульбоугольники имеют существенный недостаток.

При нагружении бульбоугольника поперечной нагрузкой от обшивки в конструкции крыла, оперения, фюзеляжа кроме нормальных напряжений от изгиба стрингера с присоединенной обшивкой, опирающегося на нервюры или шпангоуты, возникают дополнительные нормальные и касательные напряжения от кручения. Это кручение вызывается тем, что поперечная нагрузка приложена не в центре изгиба. Дополнительные напряжения снижают ресурс и герметичность конструкции в этом месте, а также увеличивают волнистость обшивки и увеличивают аэродинамическое сопротивление.

Предложена измененная форма поперечного сечения бульбоугольника для применения в панелях легких самолетов в целях увеличения их прочности и ресурса. Изменение формы оказало существенное влияние на месторасположение центра изгиба в поперечном сечении. Положения центра изгиба в бульбоугольнике определялось с использованием модели Вагнера с неработающими на касательные напряжения стенками. Измененная форма поперечного сечения бульбоугольника позволила снизить уровень остаточных напряжений после сборки панелей, рационально передавать нагрузку от обшивки на стрингер и улучшить технологию их сборки в панели. Рекомендовано отверстия под заклепки в стрингере сверлить посередине всей ширины его полки с учетом стенки.

Ключевые слова: бульбоугольник, центр изгиба, тонкостенный стержень с открытым профилем, модель Вагнера.

Ранее было исследовано положение центра жесткости в междулонжеронной и носовой частях крыла и оперения легких самолетов [1, 2]. В настоящей работе рассматривается локальная проблема – нагружение стрингера поперечной нагрузкой от обшивки.

Данная нагрузка вызывается воздушным потоком, избыточным давлением в фюзеляже и топливом в баке, а также инерционными силами при маневрировании и попадании летательного аппарата в атмосферную турбулентность. Стрингер, кроме нормальных напряжений от изгиба конструкции работает на поперечный изгиб как многопролетная балка на упругом основании, где в качестве промежуточных опор выступают нервюры в крыле и оперении и шпангоуты в фюзеляже.

В первом приближении можно считать, что равнодействующая от поперечной нагрузки от прилегающего участка обшивки приходит на середину полки стрингера и центр заклепки, если нагрузка отжимает обшивку от стрингера.

Особенно остро данная проблема проявляется в бульбоугольниках, так

как их центр изгиба лежит вне поперечного сечения и в результате этого появляется дополнительное кручение стрингера.

Бульбоугольники представляют уголки с бульбой (утолщение в виде наплыва) на конце стенки с внутренней стороны уголка.

В самолетостроении и вертолетостроении такие тонкостенные профили (прессованные и катанные) получили весьма широкое распространение, ввиду своих преимуществ в сравнении с другими типами подкрепляющих профилей в различных агрегатах летательных аппаратов.

Эти профили лучше простого уголка, так как имеют более высокие критические напряжения при сжатии – выше предела пропорциональности, что позволяет снизить массу конструкции.

Бульбоугольники лучше тавровых профилей, поскольку тавры крепятся двумя рядами заклепок, что это ухудшает герметичность, увеличивает концентрацию напряжений и снижает ресурс конструкции.

Рассматриваемые профили лучше зет профилей. Последние более высокие, что уменьшает строительную высоту сечения и увеличивает нагрузку на панели и обычно имеют избыточную площадь поперечного сечения, что приводит к увеличению массы конструкции.

Двутавровые профили и швеллеры, по сравнению с бульбоугольниками, являются менее технологичными при сборке подкрепленных панелей, а также приводят к большей массе конструкции панелей.

Бульбоугольники широко применяются в конструкции металлических фюзеляжей самолетов и вертолетов, в хвостовой балке вертолетов, в крыле и оперении легких самолетов, в закрылках, элеронах и рулях. Однако современные с известными конфигурациями поперечных сечений бульбоугольники имеют существенный недостаток, который связан с дополнительным кручением стрингера.

И это кручение – стесненное, что ведет к возникновению не только касательных, но и нормальных напряжений, а значит, возникает дополнительное нагружение соединения стрингера и обшивки, что значительно снижает ресурс конструкции. Наибольший крутящий момент и максимальное дополнительное напряжение действуют вблизи крепления стрингера к нервюрам.

Таким образом, при нагружении бульбоугольника поперечной нагрузкой от обшивки в конструкции крыла, оперения, фюзеляжа кроме нормальных напряжений от изгиба стрингера с присоединенной обшивкой, опирающегося на нервюры или шпангоуты, возникают дополнительные нормальные и касательные напряжения от кручения.

Это кручение вызывается тем, что поперечная нагрузка приложена не вдоль линии, проходящей через центр изгиба. Возникающие дополнительные напряжения снижают ресурс и герметичность конструкции в месте соединения профиля и обшивки. Кроме того, под воздействием этих дополнительных напряжений увеличивается волнистость обшивки, что приводит к увеличению аэродинамического сопротивления.

Рассматривались прессованные бульбоугольники типа ПР 102 стандартные с внутренней бульбой и с внешней бульбой (рис. 1), радикально отличающиеся расположением оси кручения.

Рассмотрено положение центра изгиба, точки в сечении, относительно которой происходит поворот при кручении. Исследование проведено для ряда бульбоугольников по методике В. З. Власова [3].

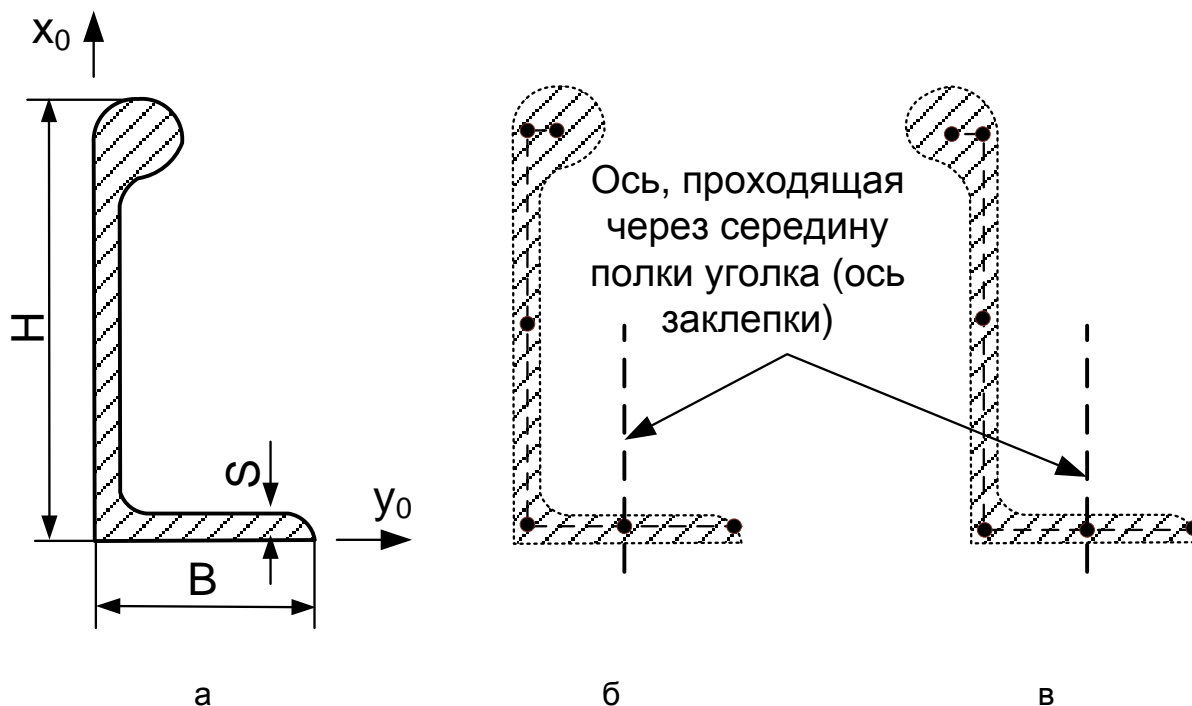


Рис. 1. Поперечное сечение: а – бульбоугольник типа ПР 102; б – дискретное сечение бульбоугольника типа ПР 102; в – дискретное сечение бульбоугольника с внешней бульбой

Предварительно была проведена дискретизация сечения путем введения в него пяти сосредоточенных площадей (см. рис. 1). Использована модель Вагнера: стенки сечения воспринимают только касательные напряжения, а нормальные возникают только в сосредоточенных продольных элементах (сосредоточенные площади). Результаты расчетов для трех бульбоугольников (стандартных и модифицированных) с малой, большой и средней площадями поперечного сечения показаны на рис. 2, а для некоторых других приведены в табл. 1.

Стрингерная панель (соединение заклепками, сварными точками или другими способами с обшивкой) собирается с передачей нормального к обшивке усилия через середину стороны **В** бульбоугольника (см. рис. 1, а).

При этом в той или иной мере возникает крутящий момент (указанная сила на плечо – расстояние между осью приложения и центром изгиба) стесненного кручения, который не исчезает после завершения процесса сборки панели. Это приводит к остаточным нормальным и касательным напряжениям.

Отмеченное плечо при приведенных на рис. 2 обозначениях положения центра изгиба определяется для стандартного бульбоугольника по формуле

$$h_0 = \frac{B}{2} + x_{ц.и.},$$

а для бульбоугольника с внешней бульбой

$$h_{01} = \frac{B}{2} - x_{ц.и.}$$

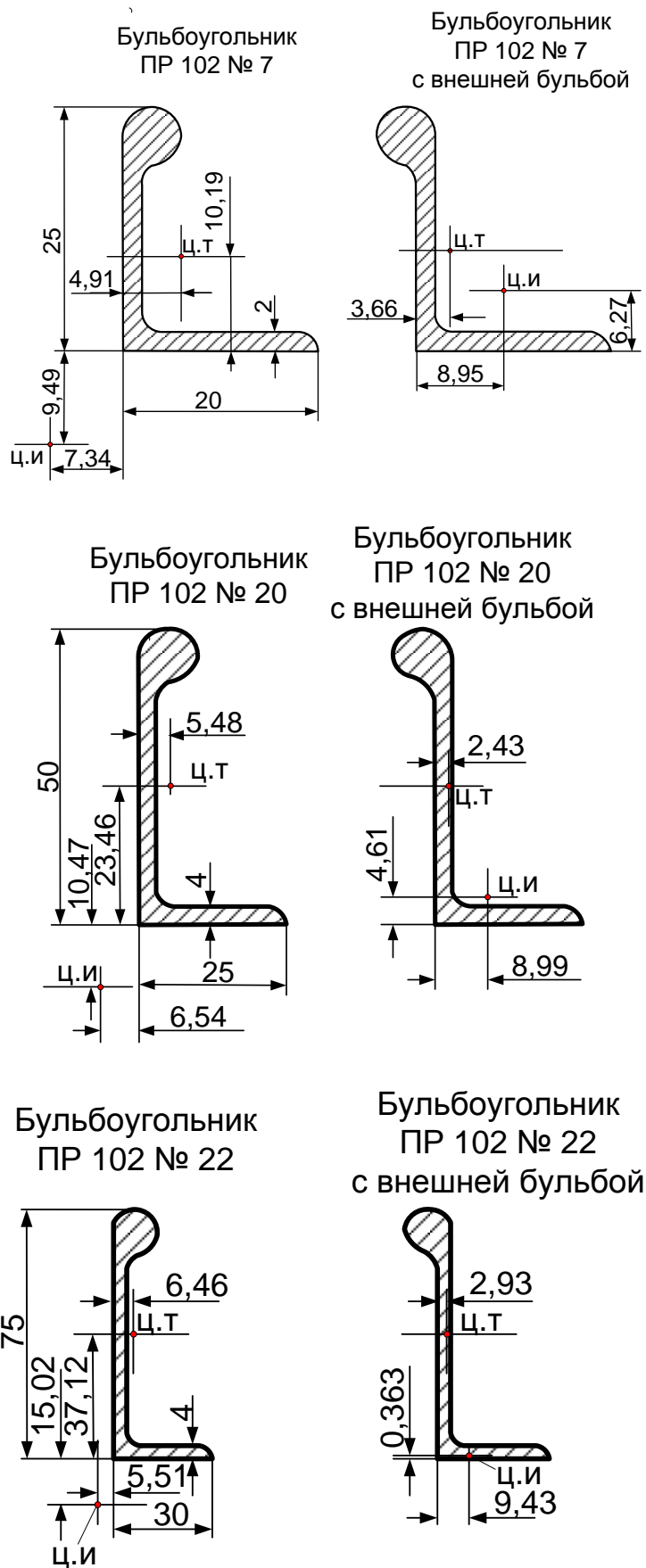


Рис. 2. Расположение центра изгиба и центра жесткости в поперечном сечении

Таблица 1

Параметры бульбоугольников

Бульбоугольник ПР 102									Аналогичный бульбоугольник с внешней бульбой				
Номер профиля	H, мм	B, мм	S, мм	$x_{ц,и}$, мм	$y_{ц,и}$, мм	$x_{ц,т}$, мм	$y_{ц,т}$, мм	h_0 , мм	$x_{ц,и}$, мм	$y_{ц,и}$, мм	$x_{ц,т}$, мм	h_{01} , мм	h_0/h_1
1	13	12	1	-7,23	-9,96	3,0	4,69	13,23	7,94	2,40	2,4	1,94	6,82
7	25	20	2	-7,34	-9,49	4,91	10,19	17,34	8,95	6,27	3,66	1,05	16,5
20	50	25	3	-6,54	-10,47	5,48	23,46	19,04	8,99	4,61	2,43	4,51	4,22
22	75	30	4	-5,51	-15,02	6,46	37,12	20,55	9,43	0,363	2,93	5,57	3,63
14	75	40	6	-1,86	-6,83	9,34	32,04	21,86	9,62	1,51	6,84	10,38	2,11
23	90	35	4,5	-3,60	-13,65	7,34	44,65	21,1	8,63	-1,54	3,36	8,87	2,38
24	100	40	5	-3,55	-12,13	8,40	49,58	23,55	4,62	-0,740	3,77	15,38	1,53

Как видно из табл. 1 h_{01} существенно ниже h_0 для большинства рассмотренных бульбоугольников. Это приведет соответственно к снижению уровня остаточных напряжений, что увеличит ресурс подкрепленных панелей.

Другим важным положительным эффектом является снижение местных крутящих моментов от внешней аэродинамической нагрузки, топлива, наддува топливных баков и т. д. Это приведет к значительному увеличению ресурса нижних растянутых панелей.

Использование бульбоугольников с внешней бульбой позволит упростить технологию сборки подкрепленных панелей вследствие лучшего доступа к месту соединения.

Можно рекомендовать отверстия под заклепки в стрингере сверлить по середине всей ширины его полки с учетом стенки.

Перспективным представляется поиск оптимальной формы ответвления от угольника вместо бульбы, которая позволит получить расположение центра изгиба посередине полки.

Список литературы

1. Дибир, А. Г. Исследование положения центра жесткости в однозамкнутом прямоугольном сечении тонкостенного стержня [Текст] / А. Г. Дибир, А. А. Кирпикин, Н. И. Пекельный // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии : сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н. Е. Жуковского «Харьк. авиац. ин-т». – Вып. 76. – Харьков, 2017. – С. 135–140.

2. Дибир, А. Г. Исследование положения центра жесткости в однозамкнутом треугольном сечении тонкостенного стержня [Текст] / А. Г. Дибир, А. А. Кирпикин, Н. И. Пекельный // Открытые информационные и интегрированные технологии. – 2018. – Вып. 80. – С. 134–138.

3. Власов, В. З. Тонкостенные упругие стержни [Текст] / В. З. Власов – М. : Физматгиз, 1959. – 574 с.

References

1. Dibir, A. G. Issledovanie polozhenija centra zhestkosti v odnozamknutom prjamougol'nom sechenii tonkostennogo sterzhnja. [Investigation of the position of the center of rigidity in a single-closed rectangular section of a thin-walled rod] Trudy Nats. aerokosm. un-t «Kharkov. aviats. in-t» // *Otkrytye informatsionnye i komp'yuternye integrirovannye tekhnologii* [Proc. of the Kharkiv National Aerospace University, "Open information and computer integrated technologies"], 2017. – S. 135 – 140.

2. Dibir, A.G. Issledovanie polozhenija centra zhestkosti v odnozamknutom treugol'nom sechenii tonkostennogo sterzhnja [Investigation of the position of the center of rigidity in a single-closed triangular section of a thin-walled rod] Trudy Nats. aerokosm. un-t «Kharkov. aviats. in-t» // *Otkrytye informatsionnye i komp'yuternye integrirovannye tekhnologii* [Proc. of the Kharkiv National Aerospace University, "Open information and computer integrated technologies"], 2018. – Vyp. 80. – S. 134 – 138.

3. Vlasov V. Z. Tonkostennye uprugie sterzhni. [Thin-walled elastic rods] – Moscow.: Fizmatgiz, 1959. – 574 s.

Надійшла до редакції 16.02.2020, розглянуто на редколегії 17.02.2020

Щодо питання про раціональну форму пресованого бульбокосинця

У літакобудуванні і вертольотобудування широкого поширення набули бульбокосинці – куточки з бульбою на кінці стінки. Вони краще простого куточка, так як мають більш високі критичні напруження при стисканні – більше межі пропорційності. Вони краще таврів, так як таври кріпляться двома рядами заклепок, що погіршує герметичність. Бульбокосинці краще зет профілів. Останні більш високі, що зменшує будівельну висоту перерізу і збільшує навантаження на панелі і зазвичай мають надлишкову площу поперечного перерізу. Бульбокосинці широко застосовуються в конструкції металевих фюзеляжів літаків і вертольотів, в хвостовій балці вертольотів, в крилі і оперенні легких літаків, в закрилках, елеронах і рулях. Однак сучасні бульбокосинці мають істотний недолік.

При навантаженні бульбокосинця поперечним навантаженням від обшивки в конструкції крила, оперення, фюзеляжу крім нормальних напружень від вигину стрингера з приєднанням обшивкою, що спирається на нервюри або шпангоути, виникають додаткові нормальні й дотичні напруження від крутіння. Це крутіння спричиняється тим, що поперечне навантаження прикладене не в центрі вигину. Додаткові напруги зменшують ресурс і герметичність конструкції в цьому місці.

Запропоновано змінена форма поперечного перерізу бульбокосинця для застосування в панелях легких літаків з метою збільшення їх міцності й ресурсу. Змінення форми істотно вплинуло на розташування центру вигину в поперечному перерізі. Положення центру вигину в бульбокосинці визначалося з використанням моделі Вагнера з стінками, що непрацюючими на дотичні напруження. Змінена форма поперечного перерізу бульбокосинця дала змогу знизити рівень залишкових напруг після складання панелей, раціонально передавати навантаження від обшивки на стрінгер і поліпшити технологію їх складання в панелі. Рекомендовано отвори під заклепки в стрінгері свердлили посередині всієї ширини його полки з урахуванням стінки.

Ключові слова: бульбокосинець, центр вигину, тонкостінний стрижень з відкритим профілем, модель Вагнера

To the question of rational shape for extruded bulb angle bar

In airplane building and helicopter engineering a bulb angle bar – an angle bar with a bulb at the end of a wall – are widespread. They are better than a simple angle bar, since they have higher critical stresses under compression – more than the proportionality limit. They are better than T bar, as T bar are fastened with two rows of rivets, which impairs tightness. Bulb angle bar are better than Z bar. The latter are higher, which reduces the structural height of the cross section and increases the load on the panel and usually have an excess cross-sectional area. Bulb angle bars are widely used in the structure of metal fuselages of airplanes and helicopters, in the tail boom of helicopters, in the wing and tail unit of light aircraft, in flaps, ailerons and rudders. However, modern the bulb angle bar have a significant drawback.

When a bulb angle bar is loaded by a transverse load from the skin in the wing structure, tail unit, fuselage, except of normal stresses from bending of the stringer with attached skin, supported by ribs or frames, additional normal and shear torsional stresses arise. This torsion is caused by the fact that the lateral load is not applied at the center of the bend. Additional stresses reduce the service life and tightness of the structure in this place.

An altered cross-sectional shape of the bulb is proposed for use in light aircraft panels to increase their strength and service life. The change in shape had a significant impact on the location of the center of the bend in the cross section. The determination of the position of the center of the bend in the balloncube was carried out using the Wagner model with walls not working for shear stresses. The modified cross-sectional shape of the bulbogon allowed to reduce the level of residual stresses after the panels were assembled, to rationally transfer the load from the casing to the stringer and to improve the technology of their assembly in the panels. It is recommended to drill holes for rivets in the stringer in the middle of the entire width of its shelf, taking into account the wall.

A modified cross-sectional shape of a corner with bulb is proposed for use in light aircraft panels. The change in shape had a significant impact on the location of the center of the bend in the cross section. This made it possible to reduce the level of residual stresses after the assembly of the panels, to rationally transfer the load from the casing to the stringer and to improve the technology of their assembly.

Key words: bulb angle bar, bending center, open-profile thin-walled rod, Wagner model.

Сведения об авторах:

Дибир Александр Геннадиевич – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры прочности летательных аппаратов Национального аэрокосмического университета им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Украина.

ORCID 0000-0002-2366-6353.

Кирпикин Анатолий Алексеевич – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры прочности летательных аппаратов Национального аэрокосмического университета им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Украина.

ORCID 0000-0001-8883-0663.

Пекельный Николай Иванович – канд. техн. наук, ст. науч. сотр., доцент кафедры прочности летательных аппаратов Национального аэрокосмического университета им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Украина. ORCID 0000-0003-0989-2546.

About the authors:

Dibir Alexander – Ph. D., Associate Professor of the Department of Aircraft Strength of the National Aerospace University «Kharkiv Aviation Institute», Ukraine. ORCID 0000-0002-2366-6353.

Kirpikin Anatoly – Ph. D., Associate Professor of the Department of Aircraft Strength of the National Aerospace University «Kharkiv Aviation Institute», Ukraine. ORCID 0000-0001-8883-0663.

Pekelny Nikolay – Ph. D., Associate Professor of the Department of Aircraft Strength of the National Aerospace University «Kharkiv Aviation Institute», Ukraine. ORCID 0000-0003-0989-2546.