

В. Стригунов

**Расчет металлических фюзеляжей на
прочность**

**Москва
«Книга по Требованию»**

УДК 656
ББК 39.1
В11

В11 **В. Стригунов**
Расчет металлических фюзеляжей на прочность / В. Стригунов – М.: Книга по Требованию, 2024. – 101 с.

ISBN 978-5-458-38461-2

ISBN 978-5-458-38461-2

© Издание на русском языке, оформление
«УОУО Media», 2024
© Издание на русском языке, оцифровка,
«Книга по Требованию», 2024

Эта книга является репринтом оригинала, который мы создали специально для Вас, используя запатентованные технологии производства репринтных книг и печати по требованию.

Сначала мы отсканировали каждую страницу оригинала этой редкой книги на профессиональном оборудовании. Затем с помощью специально разработанных программ мы произвели очистку изображения от пятен, клякс, перегибов и попытались отбелить и выровнять каждую страницу книги. К сожалению, некоторые страницы нельзя вернуть в изначальное состояние, и если их было трудно читать в оригинале, то даже при цифровой реставрации их невозможно улучшить.

Разумеется, автоматизированная программная обработка репринтных книг – не самое лучшее решение для восстановления текста в его первоизданном виде, однако, наша цель – вернуть читателю точную копию книги, которой может быть несколько веков.

Поэтому мы предупреждаем о возможных погрешностях восстановленного репринтного издания. В издании могут отсутствовать одна или несколько страниц текста, могут встретиться невыводимые пятна и кляксы, надписи на полях или подчеркивания в тексте, нечитаемые фрагменты текста или загибы страниц. Покупать или не покупать подобные издания – решать Вам, мы же делаем все возможное, чтобы редкие и ценные книги, еще недавно утраченные и несправедливо забытые, вновь стали доступными для всех читателей.

максимальных касательных напряжений, подсчитанные по способу инж. Знаменского, получаются (в боковинах фюзеляжа) значительно заниженными по сравнению с действительными.

Совершенно очевидно, что если при расчете фюзеляжа от изгибающего момента мы редуцируем его сечения, то и при определении касательных напряжений от перерезывающей силы также необходимо учитывать те же редуцированные коэффициенты, что следует из условия равновесия между нормальными и касательными напряжениями, чего в работе инж. Знаменского не делается.

Работа преследовала цель выработать такой метод расчета, при помощи которого можно было бы рассчитывать все основные типы конструкции фюзеляжей, применяемые в настоящее время в самолетостроении.

ГЛАВА II

РАБОТА И РАСЧЕТ ЭЛЕМЕНТОВ ФЮЗЕЛЯЖЕЙ

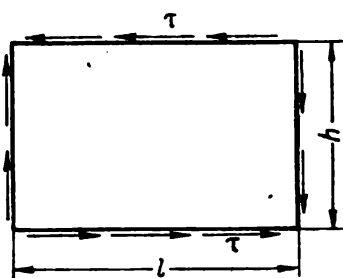
В данной главе рассмотрим кратко работу отдельных элементов (обшивки и стрингеров) фюзеляжей и приведем для них расчетные формулы для определения напряжений, так как расчет фюзеляжа в целом в известной мере сводится к расчету отдельных его элементов (при вычислении редуцированных моментов инерции сечений, установлении величин допускаемых напряжений и пр.).

Поэтому целесообразнее всего, чтобы этот расчетный материал предшествовал общим методам расчета фюзеляжей.

§ 1. Расчет обшивок

Расчет обшивки на сдвиг до потери устойчивости

а) Плоские обшивки. Для того чтобы оценить, при каком проценте от расчетной нагрузки обшивка (фиг. 1) теряет устойчивость от перерезывающей силы при изгибе и крутящего момента в плоских боковинах фюзеляжа (в случае прямоугольного сечения), необходимо подсчитать критические касательные напряжения, для чего можно рекомендовать любую из следующих формул*:



Фиг. 1

$$\tau_{кр} = \frac{\bar{k} \pi^2 D}{h^2 \cdot \delta} \quad [\text{кг см}^2]; \quad (1)$$

$$\tau_{кр} = 34\,300 \left(110 + \frac{75}{\lambda^2} \right) \cdot \left(\frac{\delta}{h} \right)^2 \quad [\text{кг см}^2]**, \quad (2)$$

где δ — толщина обшивки;

h — высота клетки;

l — длина клетки;

$\tau_{кр}$ — критическое касательное напряжение в плоской обшивке;

D — цилиндрическая жесткость обшивки; $D = \frac{E \delta^3}{12(1 - \mu^2)}$;

E — модуль упругости; $E = 7,2 \cdot 10^5 \text{ кг/см}^2$;

\bar{k} — коэффициент, зависящий от отношения сторон обшивки (фиг. 1), величина которого берется из табл. 1;

* Формула (1) и табл. 1 со значениями \bar{k} приведены из курса Тимошенко и Лессельс. Прикладная теория упругости.

** Формула (2) приведена из курса Блейха. Теория и расчет железных мостов. Она пересчитана для дюралевой обшивки, модуль упругости которой принят:

$$E = 7,2 \cdot 10^5 \text{ кг/см}^2.$$

μ — коэффициент Пуассона, равный 0,3;
 β — коэффициент, зависящий от отношения сторон обшивки (клетки).

Таблица 1

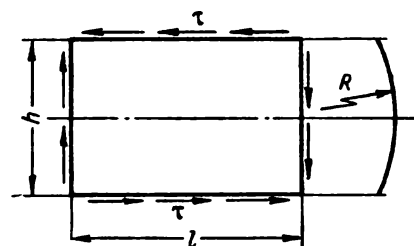
$\frac{l}{h}$	1,0	1,2	1,4	1,5	1,6	1,8	2,0	2,5	3,0
\bar{k}	9,42	8,0	7,3	7,1	7,0	6,8	6,6	6,3	6,1

Подсчет $\tau_{кр}$ по формуле (2) производится следующим образом: при $l \geq h$ в формулу (2) необходимо подставлять $\beta = \frac{l}{h}$, а при $l < h$ — коэффициент $\beta = \frac{h}{l}$ и в последнем случае вместо $\left(\frac{\delta}{h}\right)^2$ берется $\left(\frac{\delta}{l}\right)^2$.

б) Криволинейные обшивки. Для определения критических касательных напряжений в обшивке (фиг. 2) криволинейных боковин фюзеляжа (в случае эллиптического, овального и других сечений) имеем следующие формулы¹:

$$\tau_{кр} = \frac{\bar{k}_1 E}{\left(\frac{h}{\delta}\right)^2} + 0,1 \frac{E}{\frac{R}{\delta}} \quad [\text{кг/см}^2]; \quad (3)$$

$$\tau_{кр} = 0,2 \frac{\delta}{R} \cdot E \quad [\text{кг/см}^2], \quad (4)$$



Фиг. 2

где \bar{k}_1 — коэффициент, который берется для свободно опертых краев пластинки равным $\bar{k}_1 = 5,0$, а для заземленных равным $\bar{k}_1 = 7,5$;

R — радиус кривизны обшивки;

h — расстояние между стрингерами (или высота пластинки);

l — расстояние между шпангоутами (или длина пластинки).

Для стрингерного фюзеляжа следует пользоваться формулой (3), а для бесстрингерного — формулой (4).

в) Цилиндры, работающие на кручение. Для определения критических касательных напряжений в неподкрепленной круговой цилиндрической оболочке, работающей на кручение (фиг. 3), имеем следующую формулу²:

$$\tau_{кр} = \frac{5E}{\left(\frac{l}{\delta}\right)^2} + 0,1 \cdot \frac{E}{\frac{R}{\delta}} \quad [\text{кг/см}^2]. \quad (5)$$

Формула (5) применима только при отношениях $\frac{l}{R} < 5$.

¹ Формула (3) приведена из работы Г. Вагнера. *Über Konstruktion und Berechnungsfragen des Blechbaues*. Jb. Wiss. Ges. Luftf. 1928. S. 113—125. T. V. Формула (4) дана Смитом.

² Формула (5) приведена из работы Баллерштедта и Вагнера. *Versuche über die Festigkeit dünner unferstifter Zylinder unter Schub und Längskräften*. Luftfahrtforschung № 9, 1936 г.

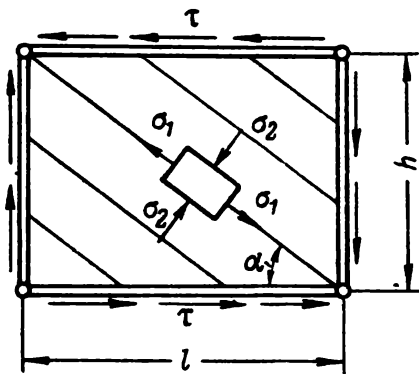
Здесь необходимо отметить, что знание величин критических касательных напряжений, подсчитанных по формулам (1)—(5), дает возможность судить о моменте потери устойчивости обшивки в конструкциях самолета.

Известно, что если действительные касательные напряжения в обшивке, подсчитанные от перерезывающей силы и крутящего момента, превзойдут критические касательные напряжения ($\tau \geq \tau_{кр}$), то это приводит к другому состоянию работы обшивки, т. е. она потеряет устойчивость и выпучится по волнообразной поверхности.

Ниже приводим формулы для расчета обшивки после потери устойчивости на сдвиг как плоских, так и криволинейных.

Расчет обшивки на сдвиг после потери устойчивости

а) Расчет плоских обшивок¹. Если имеем фюзеляж с прямоугольным сечением, то расчет обшивки после потери устойчивости (фиг. 4) в боковинах фюзеляжа от перерезывающей силы необходимо производить по следующим формулам:
напряжение растяжения:



Фиг. 4

$$\sigma_1 = \frac{1}{1+k} \cdot \frac{\tau}{\sin \alpha \cdot \cos \alpha} = \frac{2\tau - \tau_{кр}}{\sin 2\alpha}; \quad (6)$$

напряжение сжатия:

$$\sigma_2 = \frac{k}{1+k} \cdot \frac{\tau}{\sin \alpha \cdot \cos \alpha} = \frac{\tau_{кр}}{\sin 2\alpha}, \quad (7)$$

где $k = \frac{\sigma_2}{\sigma_1}$ — отношение напряжения сжатия к напряжению растяжения в обшивке.

Этот коэффициент определяется по следующей формуле:

$$k = \frac{\tau_{кр}}{2\tau - \tau_{кр}}. \quad (8)$$

Касательное напряжение (τ) для одной плоской боковины фюзеляжа определяется по формуле (см. стр. 54 и 60):

$$\tau = \frac{P_1 \cdot S_{прив}}{I_{прив} \cdot \delta}, \quad (9)$$

где P_1 — перерезывающая сила, приходящаяся на одну боковину.

Критическое касательное напряжение $\tau_{кр}$ определяется по формулам (1) или (2).

Угол наклона α волн обшивки определится в первом приближении по формуле:

$$\operatorname{tg} \alpha = \sqrt[4]{\frac{1 + \frac{E_{об}}{E_n} \cdot \frac{h \delta}{2F_n} \cdot \frac{1-k}{1+\mu k}}{1 + \frac{E_{об}}{E_{ст}} \cdot \frac{l \delta}{F_{ст}} \cdot \frac{1-k}{1+\mu k}}}. \quad (10)$$

¹ Формулы приведены из работы автора „Теоретическое и экспериментальное исследование работы тонкостенных балок“. Труды ЦАГИ, вып. 349, 1938 г.

где $E_{об}$ — модуль упругости материала обшивки;

E_n — модуль упругости поясов (или лонжеронов);

$F_{ст}$ — площадь сечения шпангоута (стойки);

F_n — площадь пояса или лонжерона.

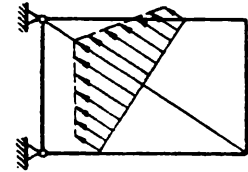
Если имеем пояса (лонжероны) упругие на изгиб в плоскости обшивки, то вследствие упругости поясов обшивка будет напряжена неравномерно, т. е. средние волокна обшивки в отсеке, идущие по главной диагонали и вблизи ее, будут иметь по величине напряжение значительно большее, чем другие волокна в отсеке (фиг. 5). В особенности это имеет место в сечениях вырезов фюзеляжа.

В этом случае напряжение растяжения в обшивке с учетом упругости поясов на изгиб определяется по следующей формуле:

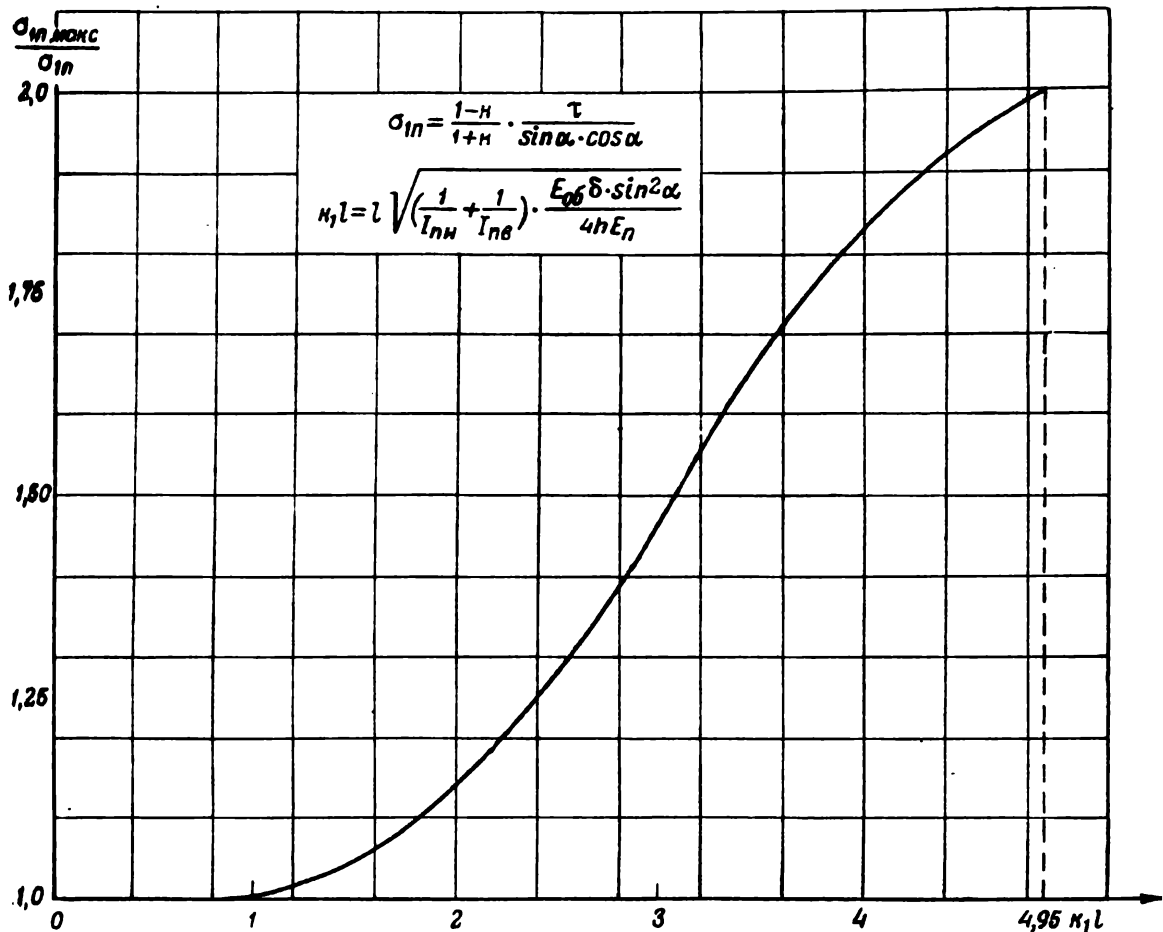
$$\sigma_1 = \sigma_2 + \sigma_{1n \text{ макс}} \quad (11)$$

где σ_2 — напряжение сжатия в обшивке, которое определяется по формуле (7);

$\sigma_{1n \text{ макс}}$ — дополнительное напряжение растяжения в обшивке после потери устойчивости, которое определяется по кривой фиг. 6 или по формуле (12).



Фиг. 5



Фиг. 6. Кривая изменения отношения $\frac{\sigma_{1n \text{ макс}}}{\sigma_{1n}}$ в зависимости от $k_1 l$

$$\begin{aligned} \sigma_{1n \text{ макс}} = \sigma_{1n} \left\{ 2 - \frac{1}{\operatorname{sh} k_1 l + \sin k_1 l} \left[(\operatorname{sh} k_1 l + \sin k_1 l) \operatorname{ch} \frac{k_1 l}{2} \cdot \cos \frac{k_1 l}{2} - \right. \right. \\ \left. \left. - (\operatorname{sh} k_1 l - \sin k_1 l) \operatorname{sh} \frac{k_1 l}{2} \cdot \sin \frac{k_1 l}{2} - \right. \right. \\ \left. \left. - (\operatorname{ch} k_1 l - \cos k_1 l) \cdot \left(\operatorname{sh} \frac{k_1 l}{2} \cdot \cos \frac{k_1 l}{2} - \operatorname{ch} \frac{k_1 l}{2} \cdot \sin \frac{k_1 l}{2} \right) \right] \right\}, \quad (12) \end{aligned}$$

где

$\sigma_{1n} = \frac{1-k}{1+k} \cdot \frac{\tau}{\sin \alpha \cdot \cos \alpha}$ — дополнительное напряжение растяжения при абсолютно жестких поясах;

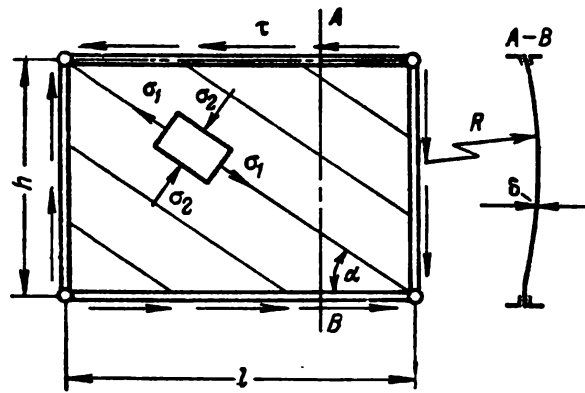
$$k_1 = \sqrt{\left(\frac{1}{I_{п. н}} + \frac{1}{I_{п. в}} \right) \cdot \frac{E_{об} \cdot \delta \cdot \sin^2 \alpha}{4 h E_n}}; \quad (A)$$

$I_{п. в}$ и $I_{п. н}$ — моменты инерции верхнего и нижнего поясов балки или лонжеронов фюзеляжа;

l — расстояние между стойками или между шпангоутами;

τ определяется по формуле (9).

б) Расчет криволинейных обшивок после потери устойчивости. Для расчета обшивок после потери устойчивости в криволинейных боковинах фюзеляжа (в случае эллиптического, овального и других



Фиг. 7

сечений) напомним без вывода окончательные формулы¹ с учетом кривизны обшивки (фиг. 7):

$$\sigma_1 = \frac{1}{1+k_2} \cdot \frac{\tau}{\sin \alpha \cdot \cos \alpha} = \frac{2\tau - \tau_{кр}}{\sin 2\alpha}; \quad (13)$$

$$\sigma_2 = \frac{k_2}{1+k_2} \cdot \frac{\tau}{\sin \alpha \cdot \cos \alpha} = \frac{\tau_{кр}}{\sin 2\alpha}; \quad (14)$$

¹ Подробный расчет криволинейной балки применительно к боковинам фюзеляжа приведен на стр. 75—77.

$$\sigma_{1п} = \frac{1-k_2}{1+k_2} \cdot \frac{2\tau}{\sin 2\alpha}, \quad (15)$$

где $\sigma_{1п}$ — дополнительное напряжение растяжения в криволинейной обшивке после потери устойчивости;

$$k_2 = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} = \frac{\tau_{кр}}{2\tau - \tau_{кр}}.$$

Касательное напряжение τ для одной боковины фюзеляжа определяется по формуле:

$$\tau = \frac{P_1 \cdot S_{прив}}{I_{прив} \delta}. \quad (16)$$

Критическое касательное напряжение ($\tau_{кр}$) определяется по формуле (3) с коэффициентом $\bar{k}_1 = 5,0$.

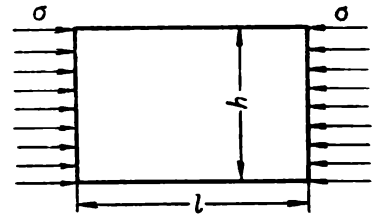
В этом случае угол наклона волн обшивки α можно определять в первом приближении также по формуле (10), только коэффициент k необходимо заменить коэффициентом k_2 .

Расчет неподкрепленных обшивок на сжатие

Для того чтобы оценить, при каких величинах нормальных напряжений сжатия обшивка теряет устойчивость от изгибающего момента в сжатой зоне фюзеляжа, необходимо подсчитать критические напряжения сжатия по следующим формулам.

а) Плоские обшивки. Для плоских обшивок (фиг. 8) имеем следующую формулу¹:

$$\sigma_{кр} = k \cdot \frac{E}{1-\mu^2} \cdot \left(\frac{\delta}{h}\right)^2 \quad [\text{кг. см}^2], \quad (17)$$



Фиг. 8

где k — коэффициент, зависящий от отношения сторон пластинки, значения которого приведены в табл. 2 и 3;

μ — коэффициент Пуассона, который следует принимать равным 0,3.

Таблица 2

Для свободно опертой пластинки

$\frac{l}{h}$	0,4	0,6	1,0	1,4	1,8	2,4	3,0	∞
k	6,92	4,23	3,29	3,68	3,32	3,40	3,29	3,29

Таблица 3

Все края пластинки защемлены

$\frac{l}{h}$	1	2	3	∞
k	7,7	6,7	6,4	6,0

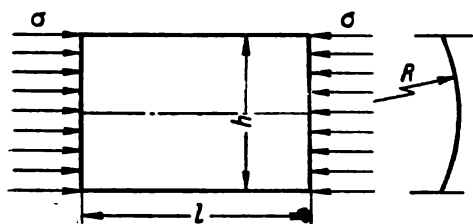
б) Криволинейные обшивки. Для криволинейных дюралюминиевых обшивок (фиг. 9) имеем формулы.

Экспериментальная формула Моссмана — Робинзона:

$$\sigma_{кр} = 0,3 E \frac{\delta}{R}. \quad (18)$$

¹ Формула (17) приведена из статьи В. Schapitz. Beitrage zur Theorie des unvollständigen Zugfeldes. Luftfahrtforschung. В. 14, № 3, 1937. Смотри аналогичную формулу в курсе Тимошенко и Лессельс. Прикладная теория упругости.

Экспериментальная формула, полученная в ЦАГИ:



$$\sigma_{кр} = 0,4 E \frac{\delta}{R}. \quad (19)$$

Донелл, учитывая влияние начальных искривлений обшивки, предложил следующую формулу:

$$\sigma_{кр} = 0,3 E \frac{\delta}{R} \left[1 - 1,7 \cdot 10^{-7} \left(\frac{R}{\delta} \right)^2 \right]. \quad (20)$$

Теоретические формулы Саусвелла и Редшау:

$$\sigma_{кр} = \frac{1}{\sqrt{3(1-\mu^2)}} \cdot E \frac{\delta}{R} \cong 0,6 E \frac{\delta}{R} \quad (21)$$

и

$$\sigma_{кр} = \frac{1}{6} \cdot \frac{E}{1-\mu^2} \left[\sqrt{12(1-\mu^2) \left(\frac{\delta}{R} \right)^2 + \left(\frac{\pi \delta}{b} \right)^4 + \left(\frac{\pi \delta}{b} \right)^2} \right], \quad (22)$$

где

$$\mu = 0,3.$$

Величины критических напряжений сжатия, подсчитанные по формулам (18)—(22), могут отличаться на 100%.

Формулами (21)—(22) не следует пользоваться в практике, так как они дают величины напряжений слишком завышенные. Также не следует пользоваться и формулой (20), ввиду того, что она дает слишком заниженные величины; иногда по ней значения напряжений получаются меньше, чем для плоской обшивки.

В практике можно пользоваться формулами (18) и (19), но необходимо учитывать при этом, что если обшивка натянута хорошо и не имеет начальных искривлений, то можно пользоваться формулой (19); если этих условий нет, то нужно пользоваться формулой (18).

Расчет обшивки, подкрепленной профилями, работающей на сжатие, после потери устойчивости (редукционные коэффициенты)

Как известно, обшивка, подкрепленная профилями (стрингерами), работающая совместно с ними на сжатие, после потери устойчивости не только несет критическую нагрузку, как пластинка между стрингерами, но еще способна воспринимать дополнительно на себя часть внешней нагрузки. Поэтому в практике расчетов возникает вопрос, как учитывать работу обшивки при совместной работе ее со стрингерами на сжатие.

Впервые вопрос о редукционном коэффициенте возник при совместной (комбинированной) работе обшивки и стрингеров, главным образом, на сжатие.

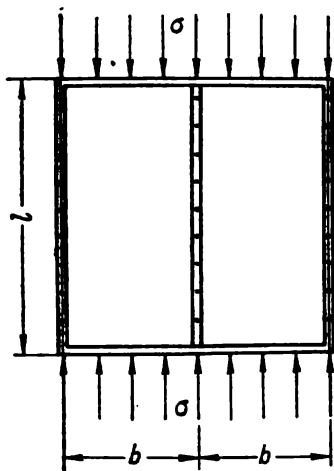
За последние годы в практике расчетов редукционные коэффициенты стали широко применяться при расчетах фюзеляжей, крыльев, оперений, гидролодок, а также и при расчете судов.

Данный вопрос подробно рассмотрим на панелях.

Возьмем панель, состоящую из обшивки и профилей (фиг. 10), и нагрузим ее внешней равномерно распределенной нагрузкой такой величины, при которой обшивка не теряла бы своей устойчивости между стрингерами.

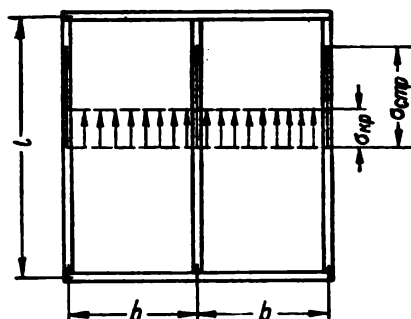
В этом случае напряжения сжатия будут по величине одинаковые как в обшивке, так и в стрингерах. Эти напряжения просто определяются по закону Гука:

$$\sigma_{сж} = -\varepsilon_{сж} \cdot E. \quad (23)$$



Фиг. 10

Если далее будем увеличивать внешнюю нагрузку на панель, то напряжения сжатия будут также расти в обшивке и стрингерах, и при не-



Фиг. 11

котором критическом значении их обшивка теряет устойчивость между стрингерами.

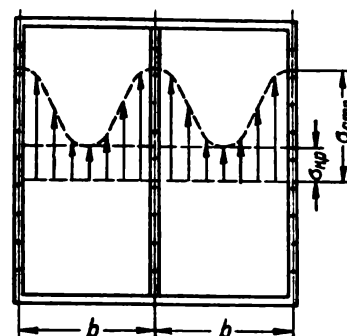
Если обшивка не будет прикреплена к профилям, то она будет нести только критическую нагрузку на сжатие, как пластинка свободно опертая и при дальнейшем росте внешней нагрузки стрингеры будут воспринимать на себя всю нагрузку, превышающую критическую нагрузку обшивки, т. е. $P - P_{кр}$ (фиг. 11).

В действительных конструкциях обшивка и стрингеры всегда бывают скреплены между собою, вследствие этого они взаимно поддерживают¹ друг друга. Благодаря этому обшивка не только несет постоянные критические напряжения сжатия, но еще способна воспринимать на себя дополнительно часть внешней нагрузки, действующей на всю панель, и получает напряжения выше критических.

Совершенно очевидно, что обшивка, после потери устойчивости, включается в дополнительную работу только через заклепки. Вследствие этого в обшивке появляются, кроме нормальных напряжений сжатия, еще касательные напряжения.

В этом случае изменение напряжений сжатия по сечению панели показано на фиг. 12.

Как видно из фиг. 12, величина напряжения сжатия в середине обшивки будет наименьшей (приблизительно равной $\sigma_{кр}$) и она возрастает по мере приближения к профилям до максимального значения ($\sigma_{сж. об} = \sigma_{стр}$) в сечениях близ заклепочных швов.



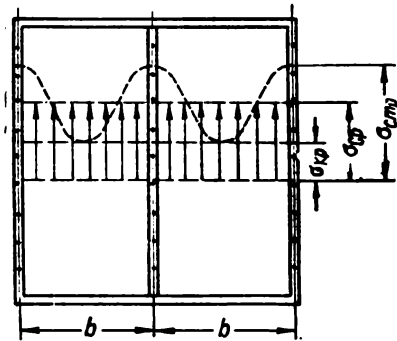
Фиг. 12

¹ Такое явление имеет место только до тех пор, пока имеется незначительное волнообразование обшивки; если обшивка деформируется сильно, то она начинает оказывать уже вредное влияние на профили, вызывая преждевременную местную потерю устойчивости.

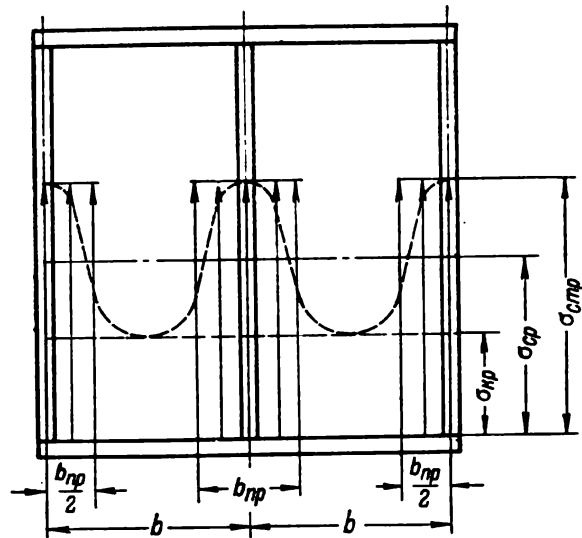
Далее, действительную площадь кривой напряжений сжатия по сечению обшивки заменим равновеликой прямоугольной площадью (фиг. 13) и возьмем отношение среднего напряжения ($\sigma_{\text{ср}}$) в обшивке к напряжению в стрингере ($\sigma_{\text{стр}}$); тогда будем иметь:

$$\varphi = \frac{\sigma_{\text{ср}}}{\sigma_{\text{стр}}} \quad (24)$$

Величину φ принято называть редуционным коэффициентом. Редуционный коэффициент в практике часто выражают и через другие параметры, напри-



Фиг. 13



Фиг. 14

мер, через приведенную ширину обшивки, приведенную площадь обшивки и др.

Так, например, если действительную площадь, ограниченную кривой изменения напряжений сжатия, заменим такой равновеликой площадью, которая имела бы ординаты равные напряжению в стрингере и абсциссу равную $b_{\text{прив}}$ (фиг. 14), то получим:

$$b \cdot \delta \cdot \sigma_{\text{ср}} = b_{\text{прив}} \delta \sigma_{\text{стр}}, \quad (25')$$

откуда

$$\frac{\sigma_{\text{ср}}}{\sigma_{\text{стр}}} = \frac{b_{\text{прив}}}{b} \quad (25)$$

Равенство (25') можно написать иначе через приведенную площадь обшивки $F_{\text{прив}}$:

$$F_{\text{обш}} \cdot \sigma_{\text{ср}} = F_{\text{прив}} \cdot \sigma_{\text{стр}}, \quad (26')$$

откуда

$$\frac{\sigma_{\text{ср}}}{\sigma_{\text{стр}}} = \frac{F_{\text{прив}}}{F_{\text{обш}}} \quad (26)$$

Таким образом, величину редуционного коэффициента можем написать в таком виде:

$$\varphi = \frac{\sigma_{\text{ср}}}{\sigma_{\text{стр}}} = \frac{b_{\text{прив}}}{b} = \frac{F_{\text{прив}}}{F_{\text{обш}}} = \frac{\delta_{\text{прив}}}{\delta} \quad (27)$$

Как видно из выражения (27), величину редуционного коэффициента можно выразить через любые параметры панели.

По определению редуционных коэффициентов для обшивок, подкрепленных профилями, имеется несколько работ как теоретических