

МОСКОВСКИЙ АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ
(национальный исследовательский университет)
Кафедра 101 «Проектирование и сертификация авиационной техники»



Лабораторная работа №1

по дисциплине:

«Основы проектирования конструкций самолёта из композиционных материалов»

**«Проектирование и расчёт составного пояса
лонжерона»**

Задание Л-3. Вариант 3.

Выполнил: студент группы М1О-411С-17

Козлов А.И.

Проверил: профессор

Попов Ю.И.

Москва 2021

СОДЕРЖАНИЕ

1. Задание	3
2. Исходные данные.....	4
3. Введение	7
4. Постановка задачи	7
5. Методы расчёта напряжённно-деформированного состояния конструкции ..	10
5.1 Метод распределения усилий между элементами по жесткости на растяжение	10
5.2 Метод совместных деформаций	11
5.3 Метод редуционных коэффициентов.....	13
6. Определение геометрических размеров сечения лонжерона.....	14
7. Расчёт НДС по вариантам конструкции.....	16
7.1 Вариант 1 (Me+KM)	16
7.2 Вариант 2 (KM+Me)	19
8. Анализ характерных графических зависимостей НДС по конструктивным параметрам	23
9. Выводы.....	28
10. Список литературы.....	29

1. Задание

Тема работы: «Проектирование и расчёт составного пояса лонжерона»

Вариант: Л-3-3 (задание Л-3, подвариант 3 по [1]).

Материалы: эл.1 из металла - №4 (В95) и №2 (Д16АТ); эл.2 из КМ - №4-8 (КМУ-4э, КМУ-7л (лента), КМУ-7Т1А, КМУ-7э, КМУ-11э).

Цель работы: разработать конструкцию составного пояса лонжерона крыла.

Задачи:

- 1) Определить геометрические параметры сечения пояса лонжерона при условии, что пояса выполнены только из металла или только из композита;
- 2) Определить геометрические параметры и напряженно-деформированное состояние поясов лонжерона при условии, что пояс является составной конструкцией из металла и композита. Необходимо рассмотреть два варианта: к основному поясу из металла добавляется слой композиционного материала и к основному поясу из КМ добавляется слой металла. Расчёт НДС необходимо произвести несколькими методами, результаты сравнить.

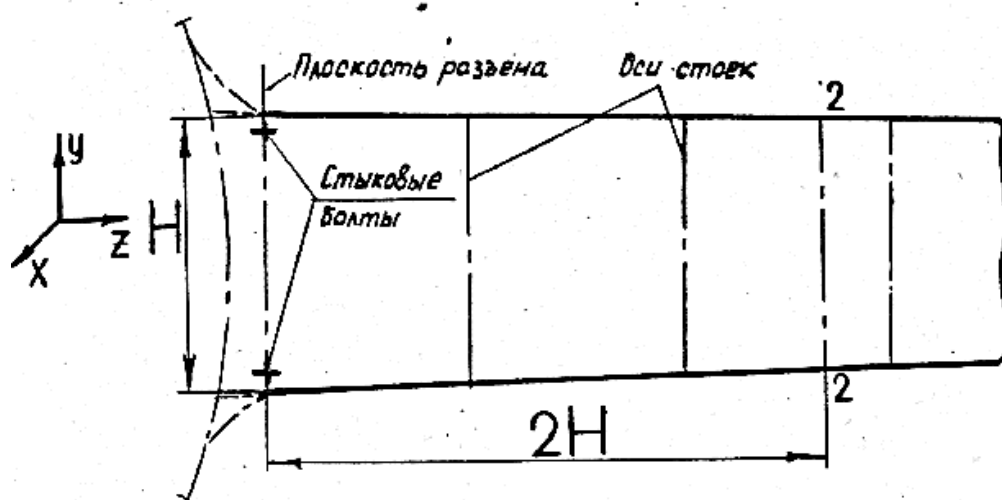
2. Исходные данные

Задание Л-3. Вариант 3.

Материалы: 4, 2 (эл.1-Ме) и 4-8 (эл.2-КМ)

Схема лонжерона, геометрические размеры и нагрузки берутся по методичке [1].

Схема крепления конструкции (задание Л-3)



Исходные данные (3 вариант):

Изгибающий момент, действующий в зоне соединения лонжерона и фюзеляжа (в плоскости разреза):

$$M_{\text{изг}}^p = 180 \text{ кН} \cdot \text{м}$$

Перерезывающая сила, действующая в зоне соединения лонжерона и фюзеляжа (в плоскости разреза):

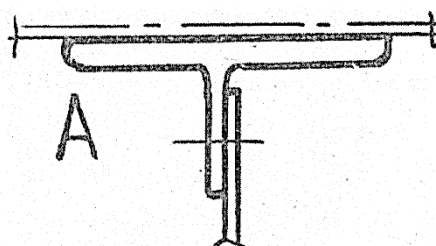
$$Q^p = 120 \text{ кН}$$

Высота лонжерона (наибольшее расстояние между поясами):

$$H = 220 \text{ мм}$$

Сечение лонжерона: А

Сечение лонжерона



Физико-механические характеристики рассматриваемых металлов приведены в таблице 1, композитов – в таблице 2.

Таблица 1

«Физико-механические характеристики металлов»

№ эл.(1)	Марка	ρ , кг/м ³	γ , Н/м ³	σ_B , МПа	E , МПа	L , км	$\varepsilon_{\text{пр мет}}$, %
1-1	30ХГСА (профиль)	7850	76930	1100	210000	14,3	0,524
1-2	Д16АТ (профиль)	2800	27440	420	72000	15,31	0,583
1-3	ОТ-4 (профиль)	4500	44100	700	110000	15,87	0,636
1-4	В95 (профиль)	2800	27440	640	72000	23,32	0,889
1-5	ВТ20 (профиль)	4500	44100	1000	110000	22,68	0,909

Примечание: элементы в таблице распределены по мере возрастания $\varepsilon_{\text{пр мет}}$

В таблице:

ρ – плотность [$\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$];

$\gamma = \rho \cdot g$ - удельный вес [$\frac{\text{Н}}{\text{м}^3}$];

$g = 9,8 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$ – ускорение свободного падения;

σ_B - предел прочности металла при растяжении [МПа];

E – модуль упругости металла при растяжении [МПа];

$L = \frac{\sigma_B}{\gamma}$ - удельная прочность металла [км];

$\varepsilon_{\text{пр мет}} = \frac{\sigma_B}{E} \cdot 100\%$ - предельная относительная деформация металла при растяжении.

Пример расчётов (для 30ХГСА):

$$\gamma_{30\text{ХГСА}} = \rho \cdot g = 7850 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \cdot 9,8 \frac{\text{м}}{\text{с}^2} = 76930 \frac{\text{Н}}{\text{м}^3}$$

$$L_{30\text{ХГСА}} = \frac{\sigma_B}{\gamma} = \frac{1100 \frac{\text{Н}}{\text{мм}^2}}{76930 \frac{\text{Н}}{\text{м}^3}} = \frac{1100 \cdot 10^6 \frac{\text{Н}}{\text{м}^2}}{76930 \frac{\text{Н}}{\text{м}^3}} = 14298,7 \text{ м} = 14,3 \text{ км}$$

$$\varepsilon_{\text{пр } 30\text{ХГСА}} = \frac{\sigma_B}{E} \cdot 100\% = \frac{1100 \frac{\text{Н}}{\text{мм}^2}}{210000 \frac{\text{Н}}{\text{мм}^2}} \cdot 100\% = 0,524 \%$$

Таблица 2 «Физико-механические характеристики КМ»

№ эл.(2)	Марка	ρ , кг/м ³	γ , Н/м ³	δ_m , мм	$\sigma_{1в}$, МПа	E , МПа	L , км	$\varepsilon_{пр\text{ КМ}}$, %
2-5	КМУ-7л (лента)	1550	15190	0,13	970	215000	63,86	0,451
2-7	КМУ-7э	1520	14896	0,12	900	135000	60,42	0,667
2-4	КМУ-4э	1450	14210	0,09	900	120000	63,34	0,75
2-8	КМУ-11э	1520	14896	0,12	900	120000	60,42	0,75
2-6	КМУ-7Т1А	1520	14896	0,25	1400	133000	93,98	1,052

Примечание: элементы в таблице распределены по мере возрастания $\varepsilon_{пр\text{ КМ}}$

В таблице:

ρ – плотность [$\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$];

$\gamma = \rho \cdot g$ - удельный вес [$\frac{\text{Н}}{\text{м}^3}$];

$g = 9,8 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$ – ускорение свободного падения;

δ_m – толщина монослоя [мм];

$\sigma_{1в}$ - предел прочности КМ на растяжение вдоль волокна [МПа];

E_1 – модуль упругости КМ на растяжение вдоль волокна [МПа];

$L = \frac{\sigma_{1в}}{\gamma}$ - удельная прочность композита [км];

$\varepsilon_{пр\text{ КМ}} = \frac{\sigma_{1в}}{E_1} \cdot 100\%$ - предельная относительная деформация эле-

мента из КМ при растяжении.

Пример расчетов (для КМУ-4э):

$$\gamma_{\text{КМУ-4э}} = \rho \cdot g = 1450 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \cdot 9,8 \frac{\text{м}}{\text{с}^2} = 14210 \frac{\text{Н}}{\text{м}^3}$$

$$L_{\text{КМУ-4э}} = \frac{\sigma_{1в}}{\gamma} = \frac{900 \frac{\text{Н}}{\text{мм}^2}}{14210 \frac{\text{Н}}{\text{м}^3}} = \frac{900 \cdot 10^6 \frac{\text{Н}}{\text{м}^2}}{14210 \frac{\text{Н}}{\text{м}^3}} = 63335,7 \text{ м} = 63,34 \text{ км}$$

$$\varepsilon_{пр\text{ КМУ-4э}} = \frac{\sigma_{1в}}{E_1} \cdot 100\% = \frac{900 \frac{\text{Н}}{\text{мм}^2}}{120000 \frac{\text{Н}}{\text{мм}^2}} \cdot 100\% = 0,75 \%$$

3. Введение

Составными называются конструкции, выполненные элементами из разных материалов. Это может быть лонжерон из металла с накладками из композиционного материала (рис.1а), лонжерон с присоединенной панелью из КМ (рис.1б). К составным конструкциям относятся также металло-полимерные материалы типа *СИАЛ*, представляющие собой слоистую пластину, образованную чередующимися тонкими листами из алюминиевых или других сплавов и слоями из композиционных препрегов (рис. 1в).

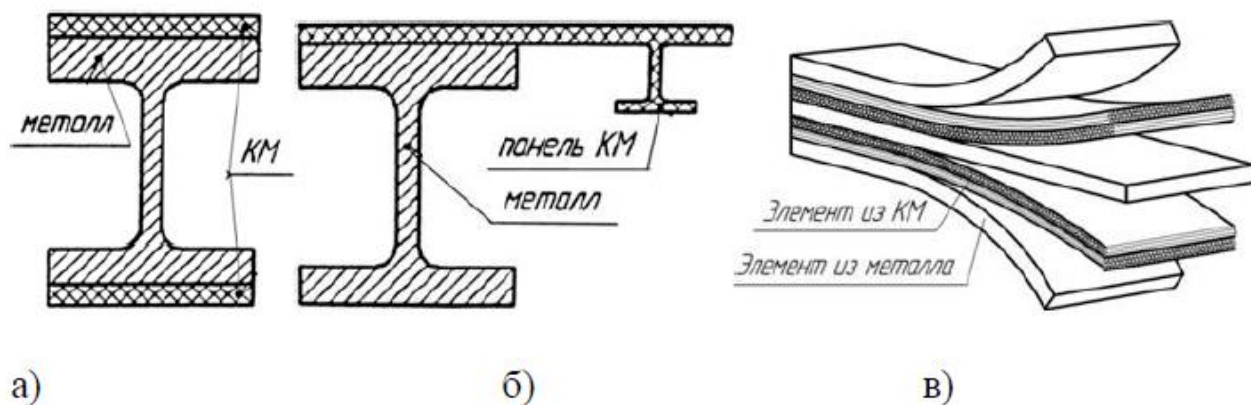


Рис.1. Составные конструкции:
а - лонжерон с накладками из КМ;
б – лонжерон с панелью из КМ;
в – слоистая пластина Металл+КМ

4. Постановка задачи

В данной работе ставится *задача усиления*, то есть повышения несущей способности, конструкции существующего пояса лонжерона, работающего в зоне растяжения и изготовленного из одного материала, металла или композита, за счет добавления элемента из другого материала и получения составного пояса лонжерона. Выполняются расчеты напряженно-деформированного состояния (НДС) и разрушающей нагрузки различных вариантов вновь полученной конструкции составного пояса лонжерона, с целью выбора рационального состава элементов по критерию равенства запасов прочности этих элементов.

Элементы составного пояса имеют толщину $h_{\text{мет}}$ и $h_{\text{км}}$ (рис.2 и рис. 3). Введём для обозначения параметров элемента из металла индекс 1, для элемента из композита (КМ) – индекс 2. Тогда $h_{\text{мет}} = h_1$, $h_{\text{км}} = h_2$, $h_{\text{сум}} = h_{\text{мет}} + h_{\text{км}}$. Принимаем, что погонная нагрузка, распределенная по ширине b пояса лонжерона в целом, равна N , а на его составные части действуют нагрузки N_1 и N_2 .

Рассматривается два расчетно-проектировочных варианта конструкции:

1) Вариант 1 - Металл + КМ (рис.2)

Считаем, что вначале был спроектирован пояс лонжерона, выполненный из металла, для которого определена высота $h_{1\text{исх}}$. Затем для повышения несущей способности пояса лонжерона с внешней стороны присоединяют поочередно элементы из КМ разных марок толщиной h_2 , получая различные варианты составного пояса. Требуется определить механические характеристики и конструктивные параметры КМ для рационального составного пояса.

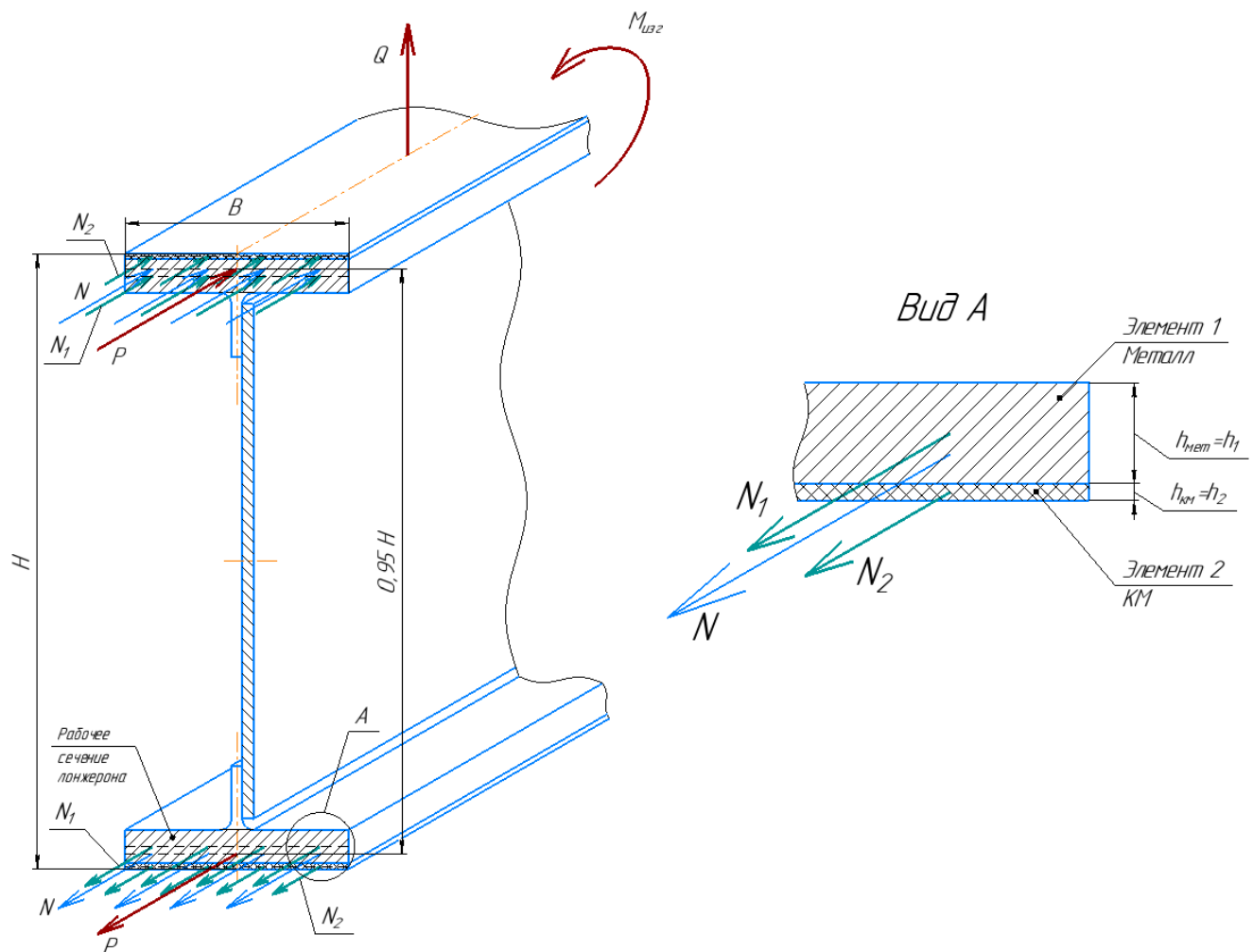


Рис.2 Вариант составного пояса лонжерона - Металл+КМ

2) Вариант 2 - КМ + Металл (рис.3).

Считаем, что первоначально был спроектирован пояс лонжерона только из КМ, определена его высота $h_{2\text{исх}}$. Затем с внешней стороны пояса присоединяют поочередно элементы из металла разных марок, толщиной h_1 . Требуется определить элемент из металла с его механическими характеристиками и конструктивными параметрами, который создает составной пояс лонжерона увеличенной несущей способности.

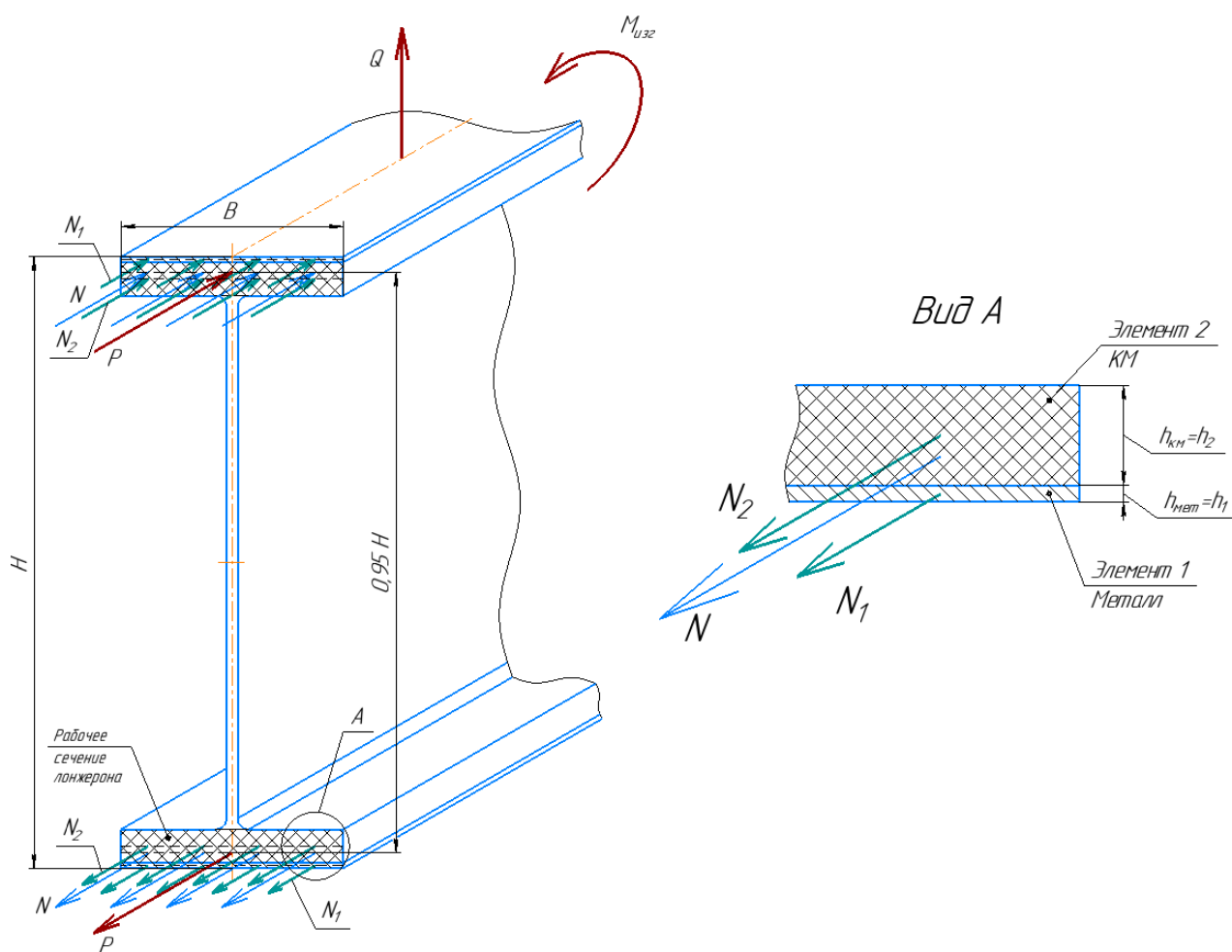


Рис.3 Вариант составного пояса лонжерона - КМ+Металл

Исходную толщину $h_{1\text{исх}}$ и $h_{2\text{исх}}$ пояса лонжерона, выполненного вначале из одного материала, будем определять по величине погонного усилия N из условия равенства действующих и разрушающих напряжений, дающего запас прочности элемента равным единице. Тогда:

для варианта 1:

$$h_{1\text{исх}} = \frac{N}{\sigma_B}$$

для варианта 2:

$$h_{2\text{исх}} = \frac{N}{\sigma_{1B}}$$

где σ_B и σ_{1B} - пределы прочности металла и КМ при растяжении, соответственно.

Для различных сочетаний заданных механических характеристик и конструктивных параметров элементов из металла и КМ составного пояса в вариантах 1 и 2 проводим расчёты НДС элементов с использованием программы Microsoft Excel. В результате определяем погонные усилия N_i , действующие напряжения σ_i , текущие деформации $\varepsilon_{i\text{тек}}$ и коэффициенты запасов прочности η_i , где i – номер элемента.

Определив действующие напряжения в элементах пояса, рассчитываем коэффициент запаса прочности элементов как отношение расчетного разрушающего напряжения к действующему напряжению. За расчетное разрушающее напряжение элемента из металла принимаем σ_B (предел прочности материала при растяжении). За разрушающее напряжение элемента из КМ принимаем σ_{1B} (предел прочности на растяжение монослоя в направлении главной оси упругости). Отметим, что в работе не учитывается введение в запас прочности элемента из КМ дополнительного коэффициента безопасности $f_{доп} = 1,25$.

По характерным зависимостям НДС от конструктивных параметров являются рациональные сочетания элементов составного пояса.

5. Методы расчёта напряжённо-деформированного состояния конструкции

В работе изучаются и используются три метода расчета НДС элементов составного пояса лонжерона: метод распределения усилий между элементами по жёсткости, метод совместных деформаций и метод редуцированных коэффициентов.

5.1 Метод распределения усилий между элементами по жёсткости на растяжение

Данный метод основан на принципе нахождения напряжений, действующих в слоях составной конструкции, в зависимости от жёсткости на растяжение материалов отдельных слоёв.

Распределение сил, действующих по элементам, пропорционально жёсткости элементов на растяжение:

$$\begin{cases} P_1 + P_2 = P \\ \frac{P_1}{P_2} = \frac{E_1 \cdot F_1}{E_2 \cdot F_2} \end{cases}$$

где $E \cdot F$ – жёсткость пояса на растяжение;
индекс «1» соответствует элементу из металла,
индекс «2» - элементу из КМ.

По погонным усилиям:

$$\begin{cases} N_1 + N_2 = N \\ \frac{N_1}{N_2} = \frac{E_1 \cdot h_1}{E_2 \cdot h_2} \end{cases}$$

Решая систему уравнений, получаем:

$$N_1 = N \cdot \frac{E_1 \cdot h_1}{E_1 \cdot h_1 + E_2 \cdot h_2}$$

$$N_2 = N \cdot \frac{E_2 \cdot h_2}{E_1 \cdot h_1 + E_2 \cdot h_2}$$

Введём обозначение:

$$E_1 \cdot h_1 + E_2 \cdot h_2 = \Sigma E \cdot h$$

Тогда:

$$N_1 = N \cdot \frac{E_1 \cdot h_1}{\Sigma E \cdot h}$$
$$N_2 = N \cdot \frac{E_2 \cdot h_2}{\Sigma E \cdot h}$$

Напряжения в элементах определим по соотношениям:

$$\sigma_1 = \frac{N_1}{h_1}$$
$$\sigma_2 = \frac{N_2}{h_2}$$

Коэффициенты запасов прочности элементов пояса:

$$\eta_1 = \frac{\sigma_B}{\sigma_1}$$
$$\eta_2 = \frac{\sigma_{1B}}{\sigma_2}$$

5.2 Метод совместных деформаций

Метод совместных деформаций основан на балочной теории прочности авиационной конструкции, и предполагается, что при действии сил (погонных усилий) растяжения деформации составного пояса в целом и деформации составляющих элементов по величине одинаковые.

Деформации пояса в целом (по закону Гука) определяются следующим образом:

$$\varepsilon_x = \frac{\sigma_x}{E_x}, \text{ где}$$

E_x - модуль упругости пояса в целом;

$\sigma_x = \frac{N}{h_\Sigma}$ - среднее напряжение в элементах пояса.

Действующие напряжения в элементах пояса:

$$\sigma_1 = \frac{N_1}{h_1}$$
$$\sigma_2 = \frac{N_2}{h_2}$$

Деформации в элементах пояса:

$$\varepsilon_1 = \frac{\sigma_1}{E_1}$$
$$\varepsilon_2 = \frac{\sigma_2}{E_2}$$

При принятом условии $\varepsilon_x = \varepsilon_1 = \varepsilon_2$ получаем:

$$\varepsilon_1 = \frac{N_1}{E_1 \cdot h_1}$$

$$\varepsilon_2 = \frac{N_2}{E_2 \cdot h_2}$$

$$\varepsilon_x = \frac{N}{E_x \cdot h_\Sigma}$$

Из условия $\varepsilon_1 = \varepsilon_2$ вытекает:

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{E_1 \cdot h_1}{E_2 \cdot h_2}$$

Учитывая, что $N_1 + N_2 = N$, получим:

$$N_1 = N \cdot \frac{E_1 \cdot h_1}{E_1 \cdot h_1 + E_2 \cdot h_2}$$

$$N_2 = N \cdot \frac{E_2 \cdot h_2}{E_1 \cdot h_1 + E_2 \cdot h_2}$$

Введём обозначения:

$$\bar{h}_1 = \frac{h_1}{h_\Sigma}, \bar{h}_2 = \frac{h_2}{h_\Sigma} - \text{относительные толщины элементов пояса;}$$

$$E_x = E_1 \cdot \bar{h}_1 + E_2 \cdot \bar{h}_2 - \text{обобщённая жёсткость пояса в целом}$$

Выражение для обобщенной жесткости пояса в целом соответствует общему *правилу смеси*, то есть обобщённая жёсткость пакета равна сумме произведений модуля упругости элемента на его относительную толщину, то есть:

$$E_x = \sum_{i=1}^n E_i \cdot \bar{h}_i, \text{ где } n = 2$$

Тогда, выражения для погонных усилий в элементах примут вид:

$$N_1 = N \cdot \frac{E_1 \cdot \bar{h}_1}{E_1 \cdot \bar{h}_1 + E_2 \cdot \bar{h}_2} = N \cdot \frac{E_1 \cdot \bar{h}_1}{E_x}$$

$$N_2 = N \cdot \frac{E_2 \cdot \bar{h}_2}{E_x}$$

Общее выражение для погонных усилий в элементах:

$$N_i = N \cdot \frac{E_i \cdot \bar{h}_i}{E_x}$$

Напряжения в элементах:

$$\sigma_1 = \sigma_x \cdot \frac{E_1}{E_x}$$

$$\sigma_2 = \sigma_x \cdot \frac{E_2}{E_x}$$

Общее выражение для напряжений в элементах:

$$\sigma_i = \sigma_x \cdot \frac{E_i}{E_x}$$

Коэффициенты запасов прочности элементов пояса:

$$\eta_1 = \frac{\sigma_B}{\sigma_1}$$

$$\eta_2 = \frac{\sigma_{1B}}{\sigma_2}$$

Замечание: также коэффициент запаса прочности можно определить по отношению предельной и текущей деформаций:

$$\eta_1 = \frac{\varepsilon_{1 \text{ пр}}}{\varepsilon_1};$$

$$\eta_2 = \frac{\varepsilon_{2 \text{ пр}}}{\varepsilon_2},$$

где $\varepsilon_{1 \text{ пр}}$ и $\varepsilon_{2 \text{ пр}}$ - предельная относительная деформация элемента из металла и КМ соответственно;

ε_1 и ε_2 – текущая деформация элемента из металла и КМ соответственно.

5.3 Метод редуционных коэффициентов

Введем обозначение редуционных коэффициентов:

$$\varphi_1 = \frac{E_1}{E_2}$$

$$\varphi_2 = \frac{E_2}{E_2} = 1$$

Тогда:

$$h_{\text{ред}} = h_1 \cdot \varphi_1 + h_2 \cdot \varphi_2$$

$$\sigma_{\text{ред}} = \frac{N}{h_{\text{ред}}} = \frac{N}{h_1 \cdot \varphi_1 + h_2 \cdot \varphi_2}$$

$$\sigma_1 = \sigma_{\text{ред}} \cdot \varphi_1$$

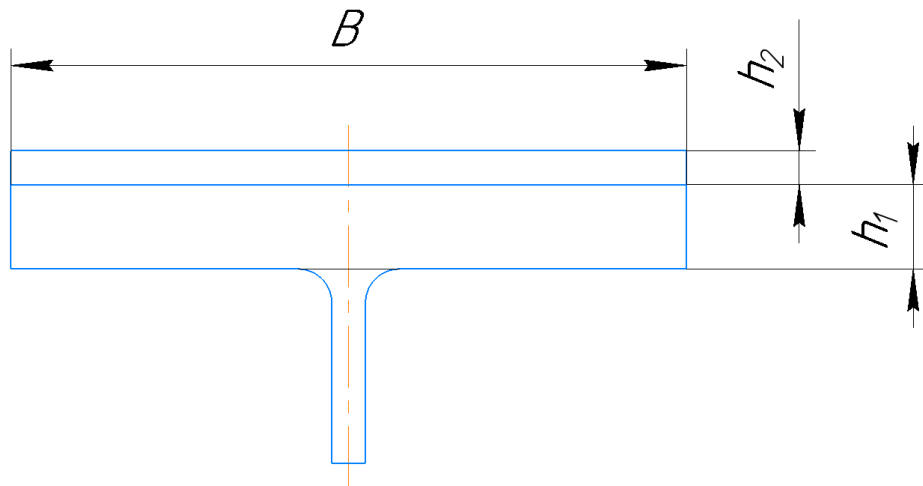
$$\sigma_2 = \sigma_{\text{ред}} \cdot \varphi_2$$

Коэффициенты запасов прочности элементов пояса:

$$\eta_1 = \frac{\sigma_B}{\sigma_1}$$

$$\eta_2 = \frac{\sigma_{1B}}{\sigma_2}$$

6. Определение геометрических размеров сечения лонжерона



Весь изгибающий момент, действующий на лонжерон, можно представить в виде пары сил:

$$P = \frac{M_{\text{изг}}}{0,95 \cdot H} = \frac{180 \cdot 10^6 \text{ Н} \cdot \text{мм}}{0,95 \cdot 220 \text{ мм}} = 861244 \text{ Н, где}$$

$M_{\text{изг}}$ – изгибающий момент;

H – строительная высота;

0,95 – коэффициент, учитывающий, что осевое усилие приложено примерно в центре тяжести сечения пояса, а не по краю пояса.

Примем ширину пояса лонжерона равной $B = 100 \text{ мм}$ (выбирается произвольно).

Погонная нагрузка, действующая на пояс лонжерона, определяется выражением:

$$N = \frac{P}{B} = \frac{861244 \text{ Н}}{100 \text{ мм}} = 8612,44 \frac{\text{Н}}{\text{мм}}$$

Условие прочности по растяжению:

$$\sigma_{\text{раст}} \leq [\sigma_{\text{раст}}], \text{ где}$$

$\sigma_{\text{рас}}$ – действующие напряжения:

$$\sigma_{\text{раст}} = \frac{P}{F} = \frac{P}{B \cdot h_{\text{исх}}} = \frac{N}{h_{\text{исх}}}$$

$[\sigma_{\text{рас}}]$ – расчетные разрушающие напряжения, которые примем:

Для металлов: $[\sigma_{\text{раст}}] = \sigma_{\text{в}}$;

Для КМ: $[\sigma_{\text{раст}}] = \sigma_{1\text{в}}$.

Из условия равенства действующих и расчетных разрушающих напряжений ($\sigma_{\text{раст}} = [\sigma_{\text{раст}}]$) получим минимально допустимую толщину пояса:

$$\frac{N}{h_{1 \text{ исх}}} = \sigma_B \rightarrow h_{1 \text{ исх}} = \frac{N}{\sigma_B}$$

$$\frac{N}{h_{2 \text{ исх}}} = \sigma_{1B} \rightarrow h_{2 \text{ исх}} = \frac{N}{\sigma_{1B}}$$

МЕТАЛЛЫ:

№ эл. (1)	Материал	σ_B , МПа	$h_{1 \text{ исх}}$, мм
1-1	30ХГСА	1100	7,83
1-2	Д16АТ	420	20,51
1-3	ОТ4	700	12,3
1-4	В95	640	13,46
1-5	ВТ20	1000	8,61

КМ:

№ эл. (2)	Материал	σ_{1B} , МПа	$h_{2 \text{ пр}}$, мм	δ_m , мм	Кол-во монослоёв	$h_{2 \text{ исх}}$, мм
2-5	КМУ-7Л (лента)	970	8,88	0,13	69	8,97
2-7	КМУ-7э	900	9,57	0,12	80	9,6
2-4	КМУ-4э	900	9,57	0,09	107	9,63
2-8	КМУ-11э	900	9,57	0,12	80	9,6
2-6	КМУ-7Т1А	1400	6,15	0,25	25	6,25

*Толщина скорректирована с учетом того, что пояс состоит из монослоёв.

Толщину дополнительного элемента в составном поясе первоначально можем задать произвольно. Для определенности принимаем толщину дополнительного элемента для обоих вариантов равной 2 мм, то есть принимаем $h_1 = h_2 = 2$ мм.

7. Расчёт НДС по вариантам конструкции

7.1 Вариант 1 (Me+KM)

1. Метод распределения усилий между элементами по жесткости

№ пары	№ элемента	Марка	E , МПа	σ_b , МПа	h , мм	$\Sigma E \cdot h$, Н/мм	N_i , Н/мм	σ_i , МПа	η_i	$\varepsilon_{тек}$, %
1	1-4	B95	72000	640	13,46	1398899,52	5965,11	443,27	1,44	0,62
	2-5	КМУ-7л (лента)	215000	970	2		2647,33	1323,67	0,73	0,62
2	1-4	B95	72000	640	13,46	1238899,52	6735,49	500,52	1,28	0,7
	2-7	КМУ-7э	135000	900	2		1876,96	938,48	0,96	0,7
3	1-4	B95	72000	640	13,46	1208899,52	6902,63	512,94	1,25	0,71
	2-4	КМУ-4э	120000	900	2		1709,81	854,9	1,05	0,71
4	1-4	B95	72000	640	13,46	1208899,52	6902,63	512,94	1,25	0,71
	2-8	КМУ-11э	120000	900	2		1709,81	854,9	1,05	0,71
5	1-4	B95	72000	640	13,46	1234899,52	6757,3	502,14	1,27	0,7
	2-6	КМУ-7Т1А	133000	1400	2		1855,14	927,57	1,51	0,7

2. Метод совместных деформаций

Исходный пояс лонжерона из B95

№ пары	№ элемента	Марка	E , МПа	σ_b , МПа	h , мм	Σh , мм	h	E_x , МПа	σ_x , МПа	σ_i , МПа	η_i	$\varepsilon_{тек}$, %
1	1-4	B95	72000	640	13,46	15,46	0,87	90503,02	557,19	443,27	1,44	0,62
	2-5	КМУ-7л (лента)	215000	970	2		0,13			1323,67	0,73	0,62
2	1-4	B95	72000	640	13,46	15,46	0,87	80151,68	557,19	500,52	1,28	0,7
	2-7	КМУ-7э	135000	900	2		0,13			938,48	0,96	0,7
3	1-4	B95	72000	640	13,46	15,46	0,87	78210,8	557,19	512,94	1,25	0,71
	2-4	КМУ-4э	120000	900	2		0,13			854,9	1,05	0,71
4	1-4	B95	72000	640	13,46	15,46	0,87	78210,8	557,19	512,94	1,25	0,71
	2-8	КМУ-11э	120000	900	2		0,13			854,9	1,05	0,71
5	1-4	B95	72000	640	13,46	15,46	0,87	79892,9	557,19	502,14	1,27	0,7
	2-6	КМУ-7Т1А	133000	1400	2		0,13			927,57	1,51	0,7

Исходный пояс лонжерона из Д16АТ

№ пары	№ элемента	Марка	E , МПа	σ_b , МПа	h , мм	Σh , мм	h	E_x , МПа	σ_x , МПа	σ_i , МПа	η_i	$\varepsilon_{тек}$, %
1	1-2	Д16АТ	72000	420	20,51	22,51	0,91	84707,83	382,68	325,27	1,29	0,45
	2-5	КМУ-7л (лента)	215000	970	2		0,09			971,28	0,9987	0,45
2	1-2	Д16АТ	72000	420	20,51	22,51	0,91	77598,55	382,68	355,07	1,18	0,49
	2-7	КМУ-7э	135000	900	2		0,09			665,75	1,35	0,49
3	1-2	Д16АТ	72000	420	20,51	22,51	0,91	76265,57	382,68	361,27	1,16	0,50
	2-4	КМУ-4э	120000	900	2		0,09			602,12	1,49	0,50
4	1-2	Д16АТ	72000	420	20,51	22,51	0,91	76265,57	382,68	361,27	1,16	0,50
	2-8	КМУ-11э	120000	900	2		0,09			602,12	1,49	0,50
5	1-2	Д16АТ	72000	420	20,51	22,51	0,91	77420,82	382,68	355,88	1,18	0,49
	2-6	КМУ-7Т1А	133000	1400	2		0,09			657,39	2,13	0,49

3. Метод редуционных коэффициентов

№ пары	№ элемента	Марка	E, МПа	σ_B , МПа	h, мм	φ_i	h _{ред} , мм	$\sigma_{ред}$, МПа	σ_i , МПа	η_i	$\varepsilon_{тек}$, %
1	1-4	B95	72000	640	13,46	0,33	6,51	1323,67	443,27	1,44	0,62
	2-5	КМУ-7л (лента)	215000	970	2	1			1323,67	0,73	0,62
2	1-4	B95	72000	640	13,46	0,53	9,18	938,48	500,52	1,28	0,7
	2-7	КМУ-7э	135000	900	2	1			938,48	0,96	0,7
3	1-4	B95	72000	640	13,46	0,6	10,07	854,9	512,94	1,25	0,71
	2-4	КМУ-4э	120000	900	2	1			854,9	1,05	0,71
4	1-4	B95	72000	640	13,46	0,6	10,07	854,9	512,94	1,25	0,71
	2-8	КМУ-11э	120000	900	2	1			854,9	1,05	0,71
5	1-4	B95	72000	640	13,46	0,54	9,28	927,57	502,14	1,27	0,7
	2-6	КМУ-7T1A	133000	1400	2	1			927,57	1,51	0,7

Выводы:

- 1) Все методы дают одинаковые конечные результаты по σ_i и η_i .
- 2) В 1 варианте соединения запас прочности η_1 элемента из металла при исходной величине, равной 1, при разных дополнительных элементах из КМ увеличивается.
- 3) Элементы из КМ ведут себя по-разному. У большинства КМ запас прочности η_2 при толщине 2 мм больше единицы и, таким образом, несущая способность всего пояса увеличивается. Но при сочетаниях B95 и КМУ-7л (лента), B95 и КМУ-7э, а также Д16АТ и КМУ-7л (лента) запас прочности элемента из КМ меньше единицы и, соответственно, составной пояс имеет недостаточную прочность. Отсюда следует, что необходимо увеличить толщину пояса из КМ при соединении с B95 в паре 1 и паре 2 и при соединении с Д16АТ в паре 1.

Рассчитаем потребную толщину с помощью метода совместных деформаций.

$$\sigma_{раст} = [\sigma_{раст}]$$

Тогда: $\sigma_2 = \sigma_{1B}$

$$\sigma_2 = \sigma_x \cdot \frac{E_2}{E_x} = \frac{N}{h_x} \cdot \frac{E_2}{E_1 \cdot \bar{h}_1 + E_2 \cdot \bar{h}_2} = \frac{N}{h_x} \cdot \frac{E_2}{E_1 \cdot \frac{h_1}{h_x} + E_2 \cdot \frac{h_2}{h_x}} = \frac{N \cdot E_2}{E_1 \cdot h_1 + E_2 \cdot h_2} = \sigma_{1B}$$

Отсюда:

$$E_1 \cdot h_1 + E_2 \cdot h_2 = \frac{N \cdot E_2}{\sigma_{1B}}$$

$$h_2 = \frac{N}{\sigma_{1B}} - \frac{E_1}{E_2} \cdot h_1$$

Количество монослоёв:

$$n = \frac{h_2}{\delta_m} \text{ (с округлением в большую сторону)}$$

Тогда, уточнённая толщина пояса из КМ:

$$h_{2 \text{ уточн}} = n \cdot \delta_{\text{м}}$$

Для КМУ-7л (лента) в паре 1 с В95:

$$h_2 = \frac{8612,44 \text{ Н}}{970 \frac{\text{Н}}{\text{мм}}} - \frac{72000 \frac{\text{Н}}{\text{мм}}}{215000 \frac{\text{Н}}{\text{мм}}} \cdot 13,46 \text{ мм} = 4,37 \text{ мм}$$

$$n = \frac{4,37 \text{ мм}}{0,13 \text{ мм}} = 33,63 \rightarrow n = 34$$

$$h_{2 \text{ уточн}} = 34 \cdot 0,13 \text{ мм} = 4,42 \text{ мм}$$

Для КМУ-7э в паре 2 с В95:

$$h_2 = \frac{8612,44 \text{ Н}}{900 \frac{\text{Н}}{\text{мм}}} - \frac{72000 \frac{\text{Н}}{\text{мм}}}{135000 \frac{\text{Н}}{\text{мм}}} \cdot 13,46 \text{ мм} = 2,39 \text{ мм}$$

$$n = \frac{2,39 \text{ мм}}{0,12 \text{ мм}} = 19,94 \rightarrow n = 20$$

$$h_{2 \text{ уточн}} = 20 \cdot 0,12 \text{ мм} = 2,4 \text{ мм}$$

Для КМУ-7л (лента) в паре 1 с Д16АТ:

$$h_2 = \frac{8612,44 \text{ Н}}{970 \frac{\text{Н}}{\text{мм}}} - \frac{72000 \frac{\text{Н}}{\text{мм}}}{215000 \frac{\text{Н}}{\text{мм}}} \cdot 20,51 \text{ мм} = 2,01 \text{ мм}$$

$$n = \frac{2,01 \text{ мм}}{0,13 \text{ мм}} = 15,48 \rightarrow n = 16$$

$$h_{2 \text{ уточн}} = 16 \cdot 0,13 \text{ мм} = 2,08 \text{ мм}$$

Метод совместных деформаций с учетом увеличения h_2 для пар 1 и 2 с В95

№ пары	№ элемента	Марка	E, МПа	$\sigma_{\text{в}}$, МПа	h , мм	Σh , мм	\bar{h}	E_x , МПа	σ_x , МПа	σ_t , МПа	η_t	$\varepsilon_{\text{тек}}$, %
1	1-4	В95	72000	640	13,46	17,88	0,75	107356,17	481,76	323,1	1,98	0,45
	2-5	КМУ-7л (лента)	215000	970	4,42		0,25			964,82	1,005	0,45
2	1-4	В95	72000	640	13,46	15,86	0,85	81535,26	543,13	479,62	1,33	0,67
	2-7	КМУ-7э	135000	900	2,4		0,15			899,28	1,0008	0,67
3	1-4	В95	72000	640	13,46	15,46	0,87	78210,8	557,19	512,94	1,25	0,71
	2-4	КМУ-4э	120000	900	2		0,13			854,9	1,05	0,71
4	1-4	В95	72000	640	13,46	15,46	0,87	78210,8	557,19	512,94	1,25	0,71
	2-8	КМУ-11э	120000	900	2		0,13			854,9	1,05	0,71
5	1-4	В95	72000	640	13,46	15,46	0,87	79892,9	557,19	502,14	1,27	0,7
	2-6	КМУ-7Т1А	133000	1400	2		0,13			927,57	1,51	0,7

Метод совместных деформаций с учетом увеличения h_2 для пары 1 с Д16АТ

№ пары	№ элемента	Марка	E , МПа	σ_B , МПа	h , мм	Σh , мм	h	E_x , МПа	σ_x , МПа	σ_i , МПа	η_i	$\varepsilon_{тек}$, %
1	1-2	Д16АТ	72000	420	20,51	22,59	0,91	85169,33	381,32	322,36	1,3	0,44
	2-5	КМУ-7л (лента)	215000	970	2,08		0,09			962,6	1,008	0,44
2	1-2	Д16АТ	72000	420	20,51	22,51	0,91	77598,55	382,68	355,07	1,18	0,49
	2-7	КМУ-7э	135000	900	2		0,09			665,75	1,35	0,49
3	1-2	Д16АТ	72000	420	20,51	22,51	0,91	76265,57	382,68	361,27	1,16	0,5
	2-4	КМУ-4э	120000	900	2		0,09			602,12	1,49	0,5
4	1-2	Д16АТ	72000	420	20,51	22,51	0,91	76265,57	382,68	361,27	1,16	0,5
	2-8	КМУ-11э	120000	900	2		0,09			602,12	1,49	0,5
5	1-2	Д16АТ	72000	420	20,51	22,51	0,91	77420,82	382,68	355,88	1,18	0,49
	2-6	КМУ-7Т1А	133000	1400	2		0,09			657,39	2,13	0,49

Вывод: после перерасчета видно, что запас прочности элемента из металла η_1 при исходной величине, равной 1, при присоединении дополнительных элементов из разных КМ увеличивается, при этом запас прочности всех элементов из КМ η_2 также больше 1. Это значит, что составной пояс получил дополнительную несущую способность.

7.2 Вариант 2 (КМ+Ме)

1. Метод распределения усилий между элементами по жесткости

№ пары	№ элемента	Марка	E , МПа	σ_B , МПа	h , мм	$\Sigma E \cdot h$, Н/мм	N_i , Н/мм	σ_i , МПа	η_i	$\varepsilon_{тек}$, %
1	2-4	КМУ-4э	120000	900	9,63	1575600	6316,66	655,94	1,37	0,55
	1-1	30ХГСА	210000	1100	2		2295,78	1147,89	0,96	0,55
2	2-4	КМУ-4э	120000	900	9,63	1299600	7658,15	795,24	1,13	0,66
	1-2	Д16АТ	72000	420	2		954,29	477,14	0,88	0,66
3	2-4	КМУ-4э	120000	900	9,63	1375600	7235,05	751,3	1,2	0,63
	1-3	ОТ4	110000	700	2		1377,39	688,69	1,02	0,63
4	2-4	КМУ-4э	120000	900	9,63	1299600	7658,15	795,24	1,13	0,66
	1-4	В95	72000	640	2		954,29	477,14	1,34	0,66
5	2-4	КМУ-4э	120000	900	9,63	1375600	7235,05	751,3	1,2	0,63
	1-5	ВТ20	110000	1000	2		1377,39	688,69	1,45	0,63

2. Метод совместных деформаций

Исходный пояс лонжерона из КМУ-4э

№ пары	№ элемента	Марка	E , МПа	σ_B , МПа	h , мм	Σh , мм	h	E_x , МПа	σ_x , МПа	σ_i , МПа	η_i	$\varepsilon_{тек}$, %
1	2-4	КМУ-4э	120000	900	9,63	11,63	0,83	135477,21	740,54	655,94	1,37	0,55
	1-1	30ХГСА	210000	1100	2		0,17			1147,89	0,96	0,55
2	2-4	КМУ-4э	120000	900	9,63	11,63	0,83	111745,49	740,54	795,24	1,13	0,66
	1-2	Д16АТ	72000	420	2		0,17			477,14	0,88	0,66
3	2-4	КМУ-4э	120000	900	9,63	11,63	0,83	118280,31	740,54	751,3	1,2	0,63
	1-3	ОТ4	110000	700	2		0,17			688,69	1,02	0,63
4	2-4	КМУ-4э	120000	900	9,63	11,63	0,83	111745,49	740,54	795,24	1,13	0,66
	1-4	В95	72000	640	2		0,17			477,14	1,34	0,66
5	2-4	КМУ-4э	120000	900	9,63	11,63	0,83	118280,31	740,54	751,3	1,2	0,63
	1-5	ВТ20	110000	1000	2		0,17			688,69	1,45	0,63

Исходный пояс лонжерона из КМУ-7э

№ пары	№ элемента	Марка	E , МПа	σ_B , МПа	h , мм	Σh , мм	h	E_x , МПа	σ_x , МПа	σ_i , МПа	η_i	$\varepsilon_{тек}$, %
1	2-7	КМУ-7э	135000	900	9,6	11,6	0,83	147931,03	742,45	677,55	1,33	0,5
	1-1	30ХГСА	210000	1100	2		0,17			1053,97	1,04	0,5
2	2-7	КМУ-7э	135000	900	9,6	11,6	0,83	124137,93	742,45	807,42	1,11	0,6
	1-2	Д16АТ	72000	420	2		0,17			430,62	0,98	0,6
3	2-7	КМУ-7э	135000	900	9,6	11,6	0,83	130689,66	742,45	766,94	1,17	0,57
	1-3	ОТ4	110000	700	2		0,17			624,92	1,12	0,57
4	2-7	КМУ-7э	135000	900	9,6	11,6	0,83	124137,93	742,45	807,42	1,11	0,6
	1-4	В95	72000	640	2		0,17			430,62	1,49	0,6
5	2-7	КМУ-7э	135000	900	9,6	11,6	0,83	130689,66	742,45	766,94	1,17	0,57
	1-5	ВТ20	110000	1000	2		0,17			624,91	1,6	0,57

3. Метод редуционных коэффициентов

№ пары	№ элемента	Марка	E , МПа	σ_B , МПа	h , мм	φ_i	$h_{ред}$, мм	$\sigma_{ред}$, МПа	σ_i , МПа	η_i	$\varepsilon_{тек}$, %
1	2-4	КМУ-4э	120000	900	9,63	0,57	7,5	1147,89	655,94	1,37	0,55
	1-1	30ХГСА	210000	1100	2	1			1147,89	0,96	0,55
2	2-4	КМУ-4э	120000	900	9,63	1,67	18,05	477,14	795,24	1,13	0,66
	1-2	Д16АТ	72000	420	2	1			477,14	0,88	0,66
3	2-4	КМУ-4э	120000	900	9,63	1,09	12,51	688,69	751,3	1,2	0,63
	1-3	ОТ4	110000	700	2	1			688,69	1,02	0,63
4	2-4	КМУ-4э	120000	900	9,63	1,67	18,05	477,14	795,24	1,13	0,66
	1-4	В95	72000	640	2	1			477,14	1,34	0,66
5	2-4	КМУ-4э	120000	900	9,63	1,09	12,51	688,69	751,3	1,2	0,63
	1-5	ВТ20	110000	1000	2	1			688,69	1,45	0,63

Выводы:

- 1) Все методы дают одинаковые конечные результаты по σ_i и η_i .
- 2) Во 2 варианте соединения уже запас прочности η_2 элемента из композита при исходной величине, равной 1, при разных дополнительных элементах из металла увеличивается.
- 3) А вот элементы из металла теперь ведут себя по-разному. У большинства металлов запас прочности η_1 при толщине 2 мм больше единицы и, таким образом, несущая способность всего пояса увеличивается. Но при сочетаниях КМУ-4э и 30ХГСА, КМУ-4э и Д16АТ, а также КМУ-7э и Д16АТ запас прочности элемента из металла меньше единицы и, соответственно, составной пояс имеет недостаточную прочность. Отсюда следует, что необходимо увеличить толщину пояса из металла при соединении с КМУ-4э в паре 1 и паре 2 и при соединении с КМУ-7э в паре 2.

Рассчитаем потребную толщину с помощью метода совместных деформаций.

$$\sigma_{\text{раст}} = [\sigma_{\text{раст}}]$$

Тогда: $\sigma_1 = \sigma_{\text{в}}$

$$\sigma_1 = \sigma_x \cdot \frac{E_1}{E_x} = \frac{N}{h_{\Sigma}} \cdot \frac{E_1}{E_1 \cdot h_1 + E_2 \cdot h_2} = \frac{N}{h_{\Sigma}} \cdot \frac{E_1}{E_1 \cdot \frac{h_1}{h_{\Sigma}} + E_2 \cdot \frac{h_2}{h_{\Sigma}}} = \frac{N \cdot E_1}{E_1 \cdot h_1 + E_2 \cdot h_2} = \sigma_{\text{в}}$$

Отсюда:

$$E_1 \cdot h_1 + E_2 \cdot h_2 = \frac{N \cdot E_1}{\sigma_{\text{в}}}$$
$$h_1 = \frac{N}{\sigma_{\text{в}}} - \frac{E_2}{E_1} \cdot h_2$$

Для 30ХГСА в паре 1 с КМУ-4э:

$$h_1 = \frac{8612,44 \text{ Н}}{1100 \frac{\text{Н}}{\text{мм}}} - \frac{120000 \frac{\text{Н}}{\text{мм}}}{210000 \frac{\text{Н}}{\text{мм}}} \cdot 9,63 \text{ мм} = 2,33 \text{ мм}$$

Для Д16АТ в паре 2 с КМУ-4э:

$$h_1 = \frac{8612,44 \text{ Н}}{420 \frac{\text{Н}}{\text{мм}}} - \frac{120000 \frac{\text{Н}}{\text{мм}}}{72000 \frac{\text{Н}}{\text{мм}}} \cdot 9,63 \text{ мм} = 4,46 \text{ мм}$$

Для Д16АТ в паре 2 с КМУ-7э:

$$h_1 = \frac{8612,44 \text{ Н}}{420 \frac{\text{Н}}{\text{мм}}} - \frac{135000 \frac{\text{Н}}{\text{мм}}}{72000 \frac{\text{Н}}{\text{мм}}} \cdot 9,63 \text{ мм} = 2,51 \text{ мм}$$

Метод совместных деформаций с учетом увеличения h_1 для пар 1 и 2 с КМУ-4э

№ пары	№ элемента	Марка	E , МПа	σ_B , МПа	h , мм	Σh , мм	h	E_x , МПа	σ_x , МПа	σ_i , МПа	η_i	$\varepsilon_{тек}$, %
1	2-4	КМУ-4э	120000	900	9,63	11,96	0,81	137513,04	720,31	628,57	1,43	0,52
	1-1	30ХГСА	210000	1100	2,33		0,19			1100	1	0,52
2	2-4	КМУ-4э	120000	900	9,63	14,09	0,68	104816	611,43	700	1,29	0,58
	1-2	Д16АТ	72000	420	4,46		0,32			420	1	0,58
3	2-4	КМУ-4э	120000	900	9,63	11,63	0,83	118280,31	740,54	751,3	1,2	0,63
	1-3	ОТ4	110000	700	2		0,17			688,69	1,02	0,63
4	2-4	КМУ-4э	120000	900	9,63	11,63	0,83	111745,49	740,54	795,24	1,13	0,66
	1-4	В95	72000	640	2		0,17			477,14	1,34	0,66
5	2-4	КМУ-4э	120000	900	9,63	11,63	0,83	118280,31	740,54	751,3	1,2	0,63
	1-5	ВТ20	110000	1000	2		0,17			688,69	1,45	0,63

Метод совместных деформаций с учетом увеличения h_2 для пары 2 с КМУ-7э

№ пары	№ элемента	Марка	E , МПа	σ_B , МПа	h , мм	Σh , мм	h	E_x , МПа	σ_x , МПа	σ_i , МПа	η_i	$\varepsilon_{тек}$, %
1	2-7	КМУ-7э	135000	900	9,6	11,6	0,83	147931,03	742,45	677,55	1,33	0,5
	1-1	30ХГСА	210000	1100	2		0,17			1053,97	1,04	0,5
2	2-7	КМУ-7э	135000	900	9,6	12,11	0,79	121959,48	711,43	787,5	1,14	0,58
	1-2	Д16АТ	72000	420	2,51		0,21			420	1	0,58
3	2-7	КМУ-7э	135000	900	9,6	11,6	0,83	130689,66	742,45	766,94	1,17	0,57
	1-3	ОТ4	110000	700	2		0,17			624,91	1,12	0,57
4	2-7	КМУ-7э	135000	900	9,6	11,6	0,83	124137,93	742,45	807,42	1,11	0,6
	1-4	В95	72000	640	2		0,17			430,62	1,49	0,6
5	2-7	КМУ-7э	135000	900	9,6	11,6	0,83	130689,66	742,45	766,94	1,17	0,57
	1-5	ВТ20	110000	1000	2		0,17			624,91	1,6	0,57

Вывод: после перерасчета видно, что запас прочности элемента из композита η_2 при исходной величине, равной 1, при присоединении дополнительных элементов из разных КМ увеличивается, при этом запас прочности всех элементов из металла η_2 также больше 1. Это значит, что составной пояс получил дополнительную несущую способность.

8. Анализ характерных графических зависимостей НДС по конструктивным параметрам

Наиболее характерными и показательными являются зависимости параметров НДС от величины предельной деформации элементов. Построим для варианта 1 зависимости $\eta_1 = f(\varepsilon_{\text{пр км}})$ и $\eta_2 = f(\varepsilon_{\text{пр км}})$, для варианта 2: $\eta_1 = f(\varepsilon_{\text{пр мет}})$, $\eta_2 = f(\varepsilon_{\text{пр мет}})$.

Вариант 1 до исправления

Исходный металл	$\varepsilon_{\text{пр мет}}, \%$	№ пары	Присоединяемый КМ	$\varepsilon_{\text{пр км}}, \%$	η_2	$\eta_1(\varepsilon_{\text{пр км}}, \%)$	$ \eta_1 - \eta_2 $
В95	0,89	1	КМУ-7Л	0,45	0,73	1,44	0,71
		2	КМУ-7Э	0,67	0,96	1,28	0,32
		3	КМУ-4Э	0,75	1,05	1,25	0,19
		4	КМУ-11Э	0,75	1,05	1,25	0,19
		5	КМУ-7Т1А	1,05	1,51	1,27	0,23
Д16АТ	0,58	6	КМУ-7Л	0,45	0,9987	1,29	0,29
		7	КМУ-7Э	0,67	1,35	1,18	0,17
		8	КМУ-4Э	0,75	1,49	1,16	0,33
		9	КМУ-11Э	0,75	1,49	1,16	0,33
		10	КМУ-7Т1А	1,05	2,13	1,18	0,95

Вариант 1 ДО исправления

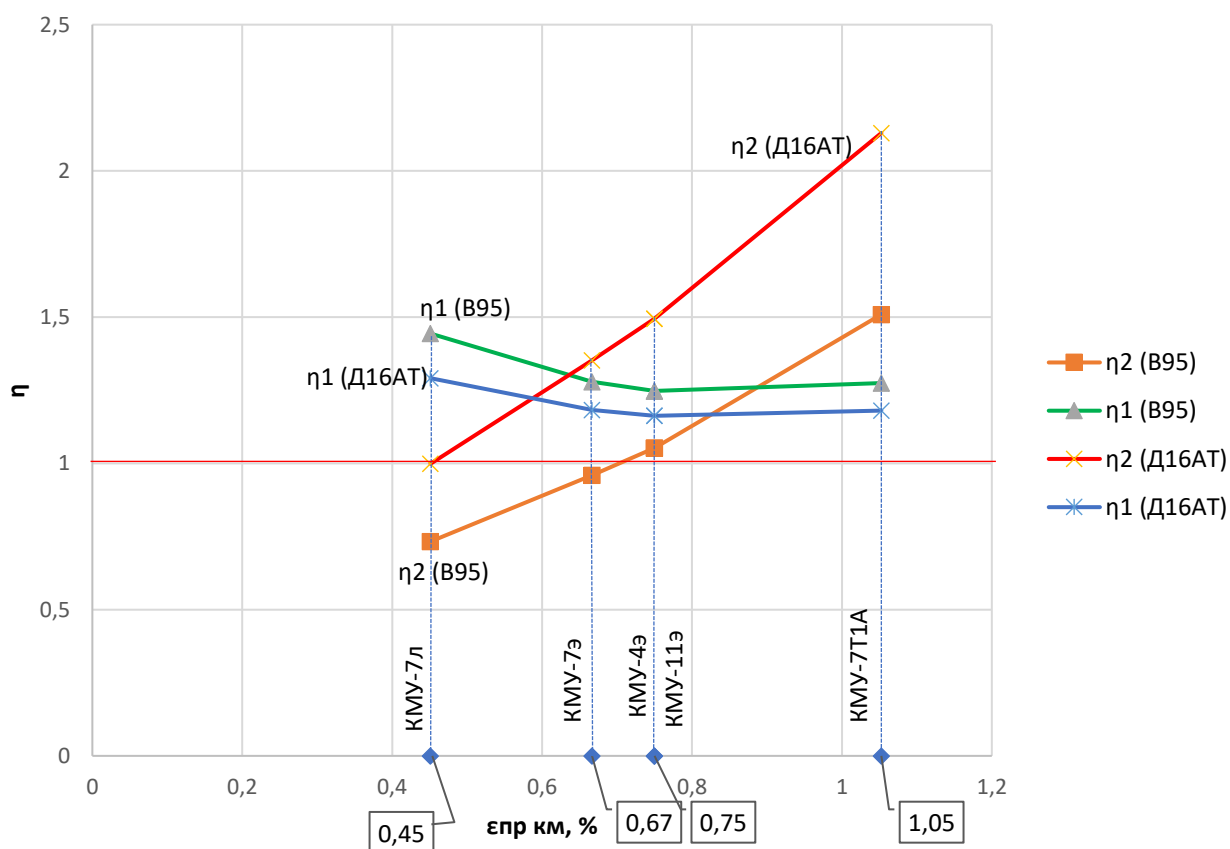


Рис.4 Зависимость запаса прочности элементов от предельной деформации КМ до исправления

Вариант 1 после исправления

Исход- ный металл	$\varepsilon_{\text{пр мет}}, \%$	№ пары	Присо- единяе- мый КМ	$\varepsilon_{\text{пр км}}, \%$	η_2	$\eta_1 (\varepsilon_{\text{пр км}}, \%)$	$ \eta_1 - \eta_2 $	$ \varepsilon_{\text{пр км}} - \varepsilon_{\text{пр мет}} \%$
В95	0,89	1	КМУ-7Л	0,45	1,005	1,98	0,98	0,44
		2	КМУ-7Э	0,67	1,0008	1,33	0,33	0,22
		3	КМУ-4Э	0,75	1,05	1,25	0,19	0,14
		4	КМУ-11Э	0,75	1,05	1,25	0,19	0,14
		5	КМУ-7Т1А	1,05	1,51	1,27	0,23	0,16
Д16АТ	0,58	6	КМУ-7Л	0,45	1,008	1,3	0,29	0,13
		7	КМУ-7Э	0,67	1,35	1,18	0,17	0,08
		8	КМУ-4Э	0,75	1,49	1,16	0,33	0,17
		9	КМУ-11Э	0,75	1,49	1,16	0,33	0,17
		10	КМУ-7Т1А	1,05	2,13	1,18	0,95	0,47

Вариант 1 ПОСЛЕ исправления

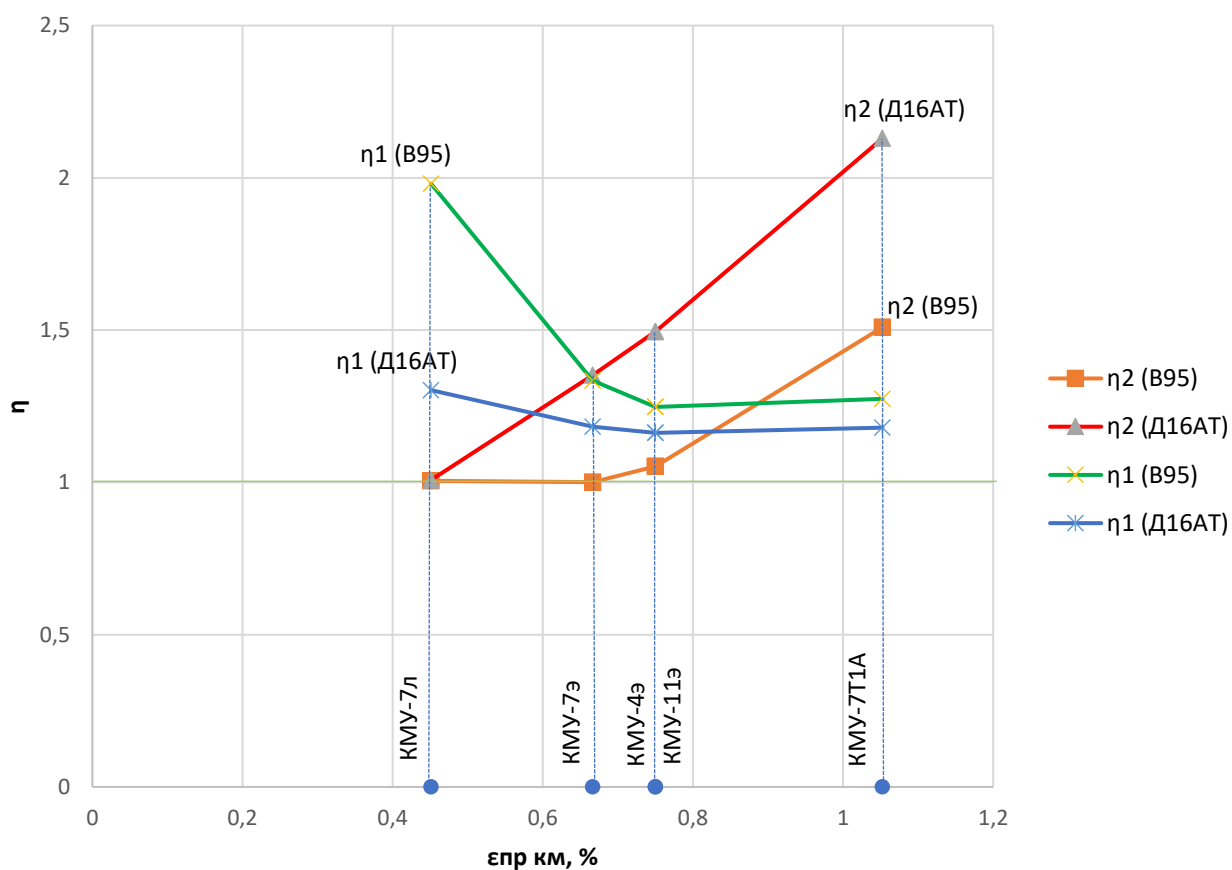


Рис.5 Зависимость запаса прочности элементов от предельной деформации КМ после исправления

Выводы:

1) Из графиков 4 и 5 видно, что запас прочности в элементах из металла разных марок больше 1 (исходной величины) при разных присоединяемых КМ.

2) При сравнении величин предельных деформаций присоединяемого КМ $\varepsilon_{\text{пр км}}$ и исходного металла $\varepsilon_{\text{пр мет}}$, а также запасов прочности η_i разных вариантов пар видна следующая зависимость. При большой разнице $\varepsilon_{\text{пр}}$ запасы прочности металла и композита также существенно различаются. А для элементов с примерно равными предельными деформациями $\varepsilon_{\text{пр}}$ металла и КМ запасы прочности примерно одинаковы.

3) Именно это сочетание металла и композита с примерно равными предельными деформациями является наиболее рациональным. По графикам видно, что для варианта 1 наиболее рациональными сочетаниями являются:

- №3 и №4 (пояс лонжерона из В95, $\varepsilon_{\text{пр мет}} = 0,89\% + \text{«усиление»}$ из КМУ-4э или КМУ-11э, $\varepsilon_{\text{пр км}} = 0,75\%$);

- №7 (пояс лонжерона из Д16АТ, $\varepsilon_{\text{пр мет}} = 0,58\% + \text{«усиление»}$ из КМУ-7э, $\varepsilon_{\text{пр км}} = 0,67\%$).

Вариант 2 до исправления

Исход- ный КМ	$\varepsilon_{\text{пр км}}, \%$	№ пары	Присоединяе- мый металл	$\varepsilon_{\text{пр мет}}, \%$	η_1	$\eta_2 (\varepsilon_{\text{пр мет}}, \%)$	$ \eta_1 - \eta_2 $
КМУ-4э	0,75	1	30ХГСА	0,52	0,96	1,37	0,41
		2	Д16АТ	0,58	0,88	1,13	0,25
		3	ОТ4	0,64	1,02	1,2	0,18
		4	В95	0,89	1,34	1,13	0,21
		5	ВТ20	0,91	1,45	1,2	0,25
КМУ-7э	0,67	6	30ХГСА	0,52	1,04	1,33	0,28
		7	Д16АТ	0,58	0,98	1,11	0,14
		8	ОТ4	0,64	1,12	1,17	0,05
		9	В95	0,89	1,49	1,11	0,37
		10	ВТ20	0,91	1,6	1,17	0,43

Вариант 2 ДО исправления

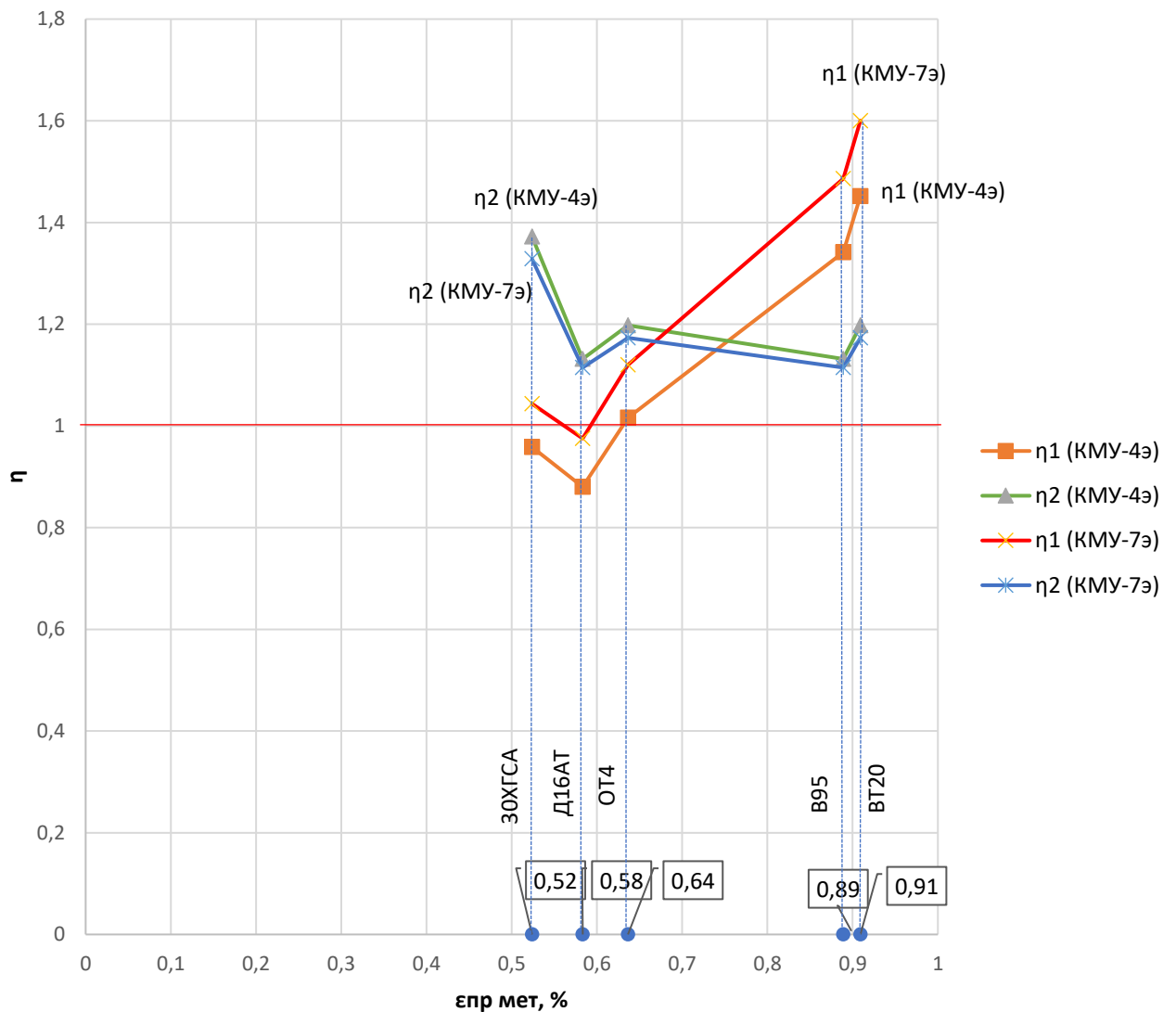


Рис.6 Зависимость запаса прочности элементов от предельной деформации металлов до исправления

Вариант 2 после исправления

Исход- ный КМ	$\varepsilon_{\text{пр км}}, \%$	№ пары	Присоеди- няемый металл	$\varepsilon_{\text{пр мет}}, \%$	η_1	$\eta_2 (\varepsilon_{\text{пр мет}}, \%)$	$ \eta_1 - \eta_2 $	$ \varepsilon_{\text{пр км}} - \varepsilon_{\text{пр мет}} \%$
КМУ-4э	0,75	1	30ХГСА	0,52	1	1,43	0,43	0,23
		2	Д16АТ	0,58	1	1,29	0,29	0,17
		3	ОТ4	0,64	1,02	1,2	0,18	0,11
		4	В95	0,89	1,34	1,13	0,21	0,14
		5	ВТ20	0,91	1,45	1,2	0,25	0,16
КМУ-7э	0,67	6	30ХГСА	0,52	1,04	1,33	0,28	0,14
		7	Д16АТ	0,58	1	1,14	0,14	0,08
		8	ОТ4	0,64	1,12	1,17	0,05	0,03
		9	В95	0,89	1,49	1,11	0,37	0,22
		10	ВТ20	0,91	1,6	1,17	0,43	0,24

Вариант 2 ПОСЛЕ исправления

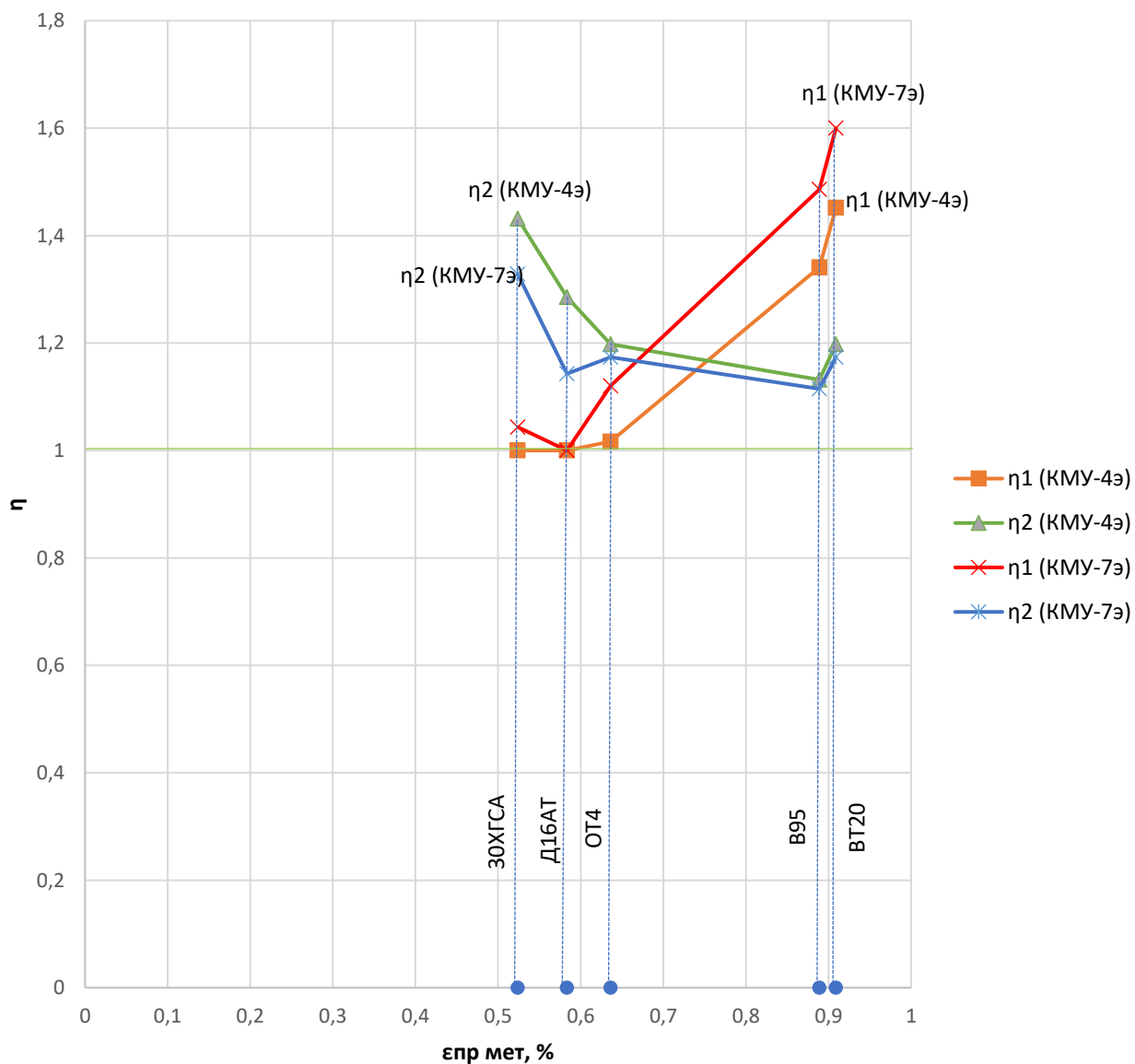


Рис.7 Зависимость запаса прочности элементов от предельной деформации металлов после исправления

Выводы:

1) Из графиков 6 и 7 видно, что все элементы из КМ увеличивают запас прочности при добавлении к ним элементов из металла.

2) При сравнении величин предельных деформаций присоединяемого металла $\varepsilon_{\text{пр мет}}$ и исходного металла $\varepsilon_{\text{пр км}}$, а также запасов прочности η_i разных вариантов пар наблюдается следующая зависимость. При большой разнице $\varepsilon_{\text{пр}}$ запасы прочности металла и композита также существенно различаются. А для элементов с примерно равными предельными деформациями $\varepsilon_{\text{пр}}$ металла и КМ запасы прочности примерно одинаковы.

3) Именно это сочетание металла и композита с примерно равными предельными деформациями является наиболее рациональным. По графикам видно, что для варианта 2 наиболее рациональные сочетания:

- №3 (пояс лонжерона из КМУ-4э, $\varepsilon_{\text{пр км}} = 0,75\%$ + «усиление» из ОТ-4, $\varepsilon_{\text{пр мет}} = 0,64\%$);

- №8 (пояс лонжерона из КМУ-7э, $\varepsilon_{\text{пр км}} = 0,67\%$ + «усиление» из ОТ-4, $\varepsilon_{\text{пр мет}} = 0,64\%$).

Итак, из графиков 4-7 видна общая зависимость: «Чем меньше отличаются относительные предельные деформации металла и КМ, тем меньше разница в их запасах прочности. Следовательно, такие сочетания являются наиболее рациональными с точки зрения весового проектирования».

9. Выводы

Анализируя результаты проведенных расчетов, можно убедиться в том, что методы распределения усилий между элементами по жесткости, совместных деформаций и редуccionных коэффициентов дают одни и те же результаты.

Анализируя полученные графические зависимости, убеждаемся в том, что с точки зрения весового проектирования наиболее рациональной будет составная конструкция, у материалов которой отличие предельных относительных деформаций наименьшее.

10. Список литературы

- 1) Е.С. Войт, И.М. Алявдин, А.И. Ендогур, Ю.И. Попов, И.А. Шаталов «Задачник к лабораторно-практическим занятиям по курсу «Конструирование агрегатов планера»: Учебное пособие» - М.: Изд-во МАИ, 1987
- 2) Укороченный пример лабораторной работы №1
- 3) Укороченные полные характеристики КМ и металлов
- 4) Конспект лекций по дисциплине «Основы проектирования конструкций самолёта из композиционных материалов», читаемых профессором Поповым Ю.И.
- 5) Ю.И. Попов, Г.Н. Кравченко, В.В. Казанцев «Оценка несущей способности составной конструкции самолета из металла и композита»: статья в журнале «Полёт», выпуск №4 от 2020 года