

Василенко А. Т. и Замолодчиков Б. И. + ✓  
Б1-9-8638.

С345Г1

В-19



ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

1404/75

Б1-9-8638

ДЕПОНИРОВАННАЯ ПУБЛИКАЦИЯ

Дубна 1975

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ  
ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ

51-9-8638

С345Г1  
В-19

Василенко А.Т., Замолодчиков Б.И.

КОНСТРУКТИВНАЯ СХЕМА ДУАНТА ДЛЯ  
РЕЛЯТИВИСТСКОГО ЦИКЛОТРОНА

Рукопись поступила  
в издательский отдел  
25 февраля 1975 г.

Объединенный институт  
ядерных исследований  
БИБЛИОТЕКА

г. Дубна, 1975 г.

## А Н Н О Т А Ц И Я

Описан способ компенсации весовой нагрузки тонкостенных элементов конструкций, например, крышек дуанта при толщине 13 мм и  $l = 3500$  мм. Приводится методика расчёта жёсткости и прочности крышек дуанта.

На макете сектора толщиной 10 мм и длиной 1500 мм метод компенсации нагрузки позволил получить прогиб не более 0,8 мм в любом сечении сектора.

Из условий формирования магнитного поля в релятивистском циклотроне на энергию протонов в 600 - 700 Мэв вытекает, что диаметр полюсного наконечника электромагнита составляет около 700 см, а высота зазора не должна превышать 15 см.

Для обеспечения интенсивности пучка ускоренных протонов в несколько сотен микроампер необходима амплитуда ускоряющего напряжения на дуанте не менее 100 кв /при двух дуантах/ и апертура около 5 см.

С учётом этих особенностей основные требования к конструкции дуанта представляются в следующем виде:

1. Толщина оснований дуанта должна быть не более 13 мм и полная высота дуанта в межполюсном пространстве не более 76 мм.

2. Межполюсное пространство высотой 50 мм, симметричное относительно средней плоскости зазора, должно быть свободно для движения ускоряемых частиц.

3. Наружные поверхности верхнего и нижнего оснований дуанта из-за прогиба, "волнистости" и др. причин не должны отклоняться от горизонтальных плоскостей, отстоящих от средней плоскости на расстоянии 38 мм, больше чем на +1 мм.

4. Наружные поверхности оснований дуанта должны обладать высокой электропроводностью в направлении, перпендикулярном ускоряющей щели.

5. Должно быть обеспечено водяное охлаждение дуанта, рассчитанное на отвод тепла при потерях электрической мощности в несколько сотен квт. Элементы охлаждения не должны увеличивать конструктивную толщину оснований дуанта.

6. Конструкция дуанта должна позволять разместить в его основаниях около 20 штук сигнальных электродов /площадь в несколько см<sup>2</sup>/ открытых со стороны, обращённой к средней плоскости зазора электромагнита, и такое же количество коаксиального кабеля с внешним диаметром до 1 см для передачи сигналов от электродов к устройствам,

размещённым вне камеры циклотрона.

7. Должна обеспечиваться возможность чистки и ремонта дуанта, а также замена отдельных его элементов с помощью манипуляторов.

Совершенно ясно, что при таком условии обеспечить необходимую жёсткость оснований дуанта без введения дополнительно напряжённых элементов в конструкцию дуанта невозможно.

Одна из возможных конструктивных схем такого дуанта, удовлетворяющая приведенным выше требованиям, основывается на следующих расчётах.

Рассмотрим прямоугольную полосу равного сечения, консольно заделанную /рис. I/.

Изгибающий момент в любом сечении полосы под действием собственного веса на единицу ширины определяется выражением:

$$M(x) = \frac{\gamma_{\text{ср.}} \delta}{2} x^2 \quad /I/$$

где

$\gamma_{\text{ср.}}$  - средний объёмный вес полосы, а прогиб в этом же сечении - выражением:

$$y = \frac{\delta \gamma_{\text{ср.}} \rho^4}{J \cdot E 24} \left[ \frac{x^4}{\rho^4} - 4 \frac{x}{\rho} + 3 \right] \quad /2/$$

$E$  - модуль упругости I-го рода,

$J$  - момент инерции сечения относительно оси  $Z$ .

Если в верхнем слое полосы  $\Delta$  создать каким-то способом дополнительные растягивающие напряжения такой интенсивности, что их момент относительно оси  $Z$  в любом сечении был бы равен изгибающему моменту, то в этом случае прогиб полосы в любом сечении будет равен нулю.

Для случая, когда  $\Delta \ll \delta$ , дополнительное растягивающее напряжение в слое  $\Delta$  составит:

$$\sigma_{(x)} \approx \frac{2M(x)}{\delta \Delta} = \frac{\gamma_{\text{ср}}}{\Delta} x^2$$

/3/

Конструктивно эти дополнительные растягивающие напряжения в верхнем слое можно создать натяжными лентами, одним концом прикреплёнными в полосе в некоторых точках вдоль оси  $x$ , а другим концом — к основанию полосы. Количество лент и координаты мест их закрепления на полосе определяют точность компенсации изгибающего момента. Во избежание продольного изгиба полосы должна быть обеспечена поперечная связь ленты с полосой на всей их длине.

Из уравнения /3/ следует, что для уменьшения дополнительных растягивающих напряжений необходима конструкция с малым  $\gamma_{\text{ср}}$ , что может быть достигнуто как при применении материалов с малым удельным весом, так и при использовании пустотелых полос.

Наиболее технологичная конструкция приведена на рис. 2. Основания дуанта могут быть составлены из ряда таких полос, как это показано на рис. 3.

В этом случае:

а/ волнистость наружных поверхностей оснований дуанта может быть очень малой;

б/ электропроводность наружных поверхностей дуанта обеспечивается или омеднением, или использованием меди как конструктивного материала;

в/ вода, для охлаждения дуанта, может быть пропущена через некоторые полости в основаниях дуанта;

г/ через другие полости могут быть пропущены высокочастотные кабели

д/ замена каждой полосы требует минимального числа простых операций.

При конструктивном выполнении элементов дуанта, показанном на рис. 2, максимальное напряжение в лентах определяется из следующего расчета:

$$\sigma = \frac{M_{\max}}{\left(\frac{\delta}{2} - \frac{3}{2}\Delta\right)\Delta} = \frac{3,5 \gamma l^2}{\delta - 3\Delta} ; \quad /4/$$

если принять  $\gamma_{\text{ср}} = \gamma \frac{3,5\Delta}{\delta}$

где  $\gamma$  - удельный вес конструкционного материала. Например, при  $\delta = 1,3$  см,  $l = 350$  см

а/ элемент изготовлен из листовой меди толщиной 1 мм:

$$\sigma = \frac{3,5 \gamma l^2}{\delta - 3\Delta} = \frac{3,5 \cdot 8,9 \cdot 10^{-3} \cdot 3,5^2 \cdot 10^4}{1,3 - 0,3} = 3800 \text{ кг/см}^2,$$

что превосходит допускаемые напряжения;

б/ элемент изготовлен из листового титана толщиной 0,5 мм:

$$\sigma = \frac{3,5 \cdot 4,5 \cdot 10^{-3} \cdot 3,5^2 \cdot 10^4}{1,3 - 0,15} = 1660 \text{ кг/см}^2,$$

что допустимо / для титана  $\sigma_{\text{доп}} = 2000 - 2200 \text{ кг/см}^2$  /;

в/ элемент изготовлен из листового дюралюминия толщиной 1 мм:

$$\sigma = \frac{3,5 \cdot 2,7 \cdot 10^{-3} \cdot 3,5^2 \cdot 10^4}{1,3 - 0,3} = 1150 \text{ кг/см}^2,$$

что также допустимо.

Если основания дуанта выполнить в виде полукругов, образованных элементами в форме секторов, то напряжения в натяжных лентах значительно снизятся /рис. 4/. В этом случае /рис. 5/ изгибающий момент в любом сечении сектора под действием собственного веса определится выражением

$$M(x) = \frac{\gamma_{\text{ср}} \cdot \delta}{6l} x^3 \quad / \text{ при } a = l / \quad /5/$$

Прогиб в этом же сечении будет

$$\gamma = \frac{\gamma_{\text{ср.}} \delta \rho^4}{3 \cdot 24 \cdot E \cdot J} \left[ \frac{x^4}{\rho^4} - 4 \frac{x}{\rho} + 3 \right]$$

/6/

где  $J$  - момент инерции основания сектора относительно оси  $Z$  .  
Из формулы /5/ видно, что в случае секторных элементов максимальный изгибающий момент и максимальное напряжение в натяжных лентах будет в 3 раза меньше, чем в случае прямоугольных элементов, и, следовательно они могут быть выполнены из листового титана, листового дюралюминия, из листовой нержавеющей стали и даже из меди.



### Приложение

Для проверки расчётов был выполнен секторный элемент из дюралюминия. Конструкция и размеры элемента приведены на рис. 6. Эпюра изгибающих моментов после компенсации представлена на рис. 7, при этом напряжение в натяжных лентах /стальная лента сечением  $10 \times 1$  мм<sup>2</sup> составляет  $780 \text{ кг/см}^2$ . При такой компенсации прогиб в любом сечении не превышал 0,8 мм, в то время как максимальный прогиб сектора без компенсации равнялся 9,6 мм:

Элемент дополнительно нагружался равномерно распределённой нагрузкой  $3,2 \cdot 10^{-3} \text{ кг/см}^2$ . В этом случае без компенсации максимальный прогиб составлял 21 мм. После компенсации прогиб в любом сечении не превышал 2,3 мм, при этом напряжение в натяжных лентах составляло  $1700 \text{ кг/см}^2$ .

Попытка добиться компенсации прогиба при большей дополнительной нагрузке привела к разрыву натяжного устройства.

**Работа выполнена в 1961 году.**

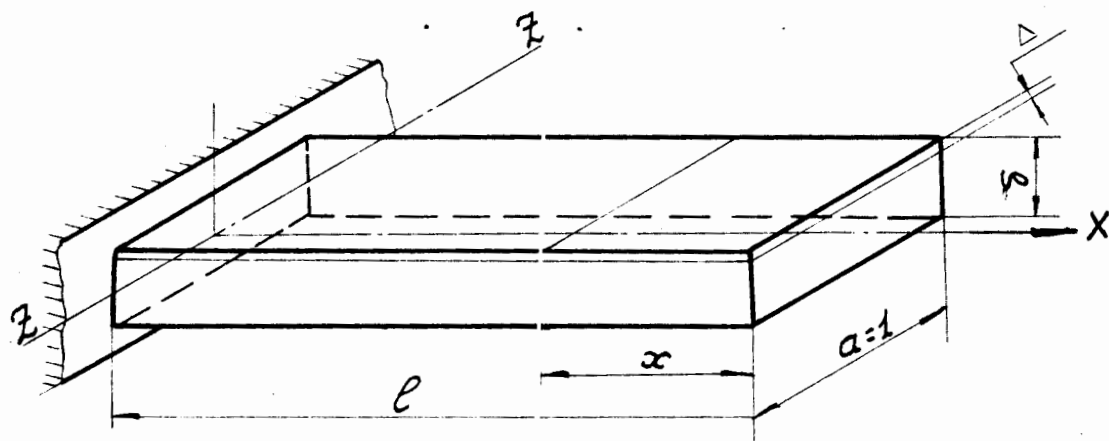


Рис. 1

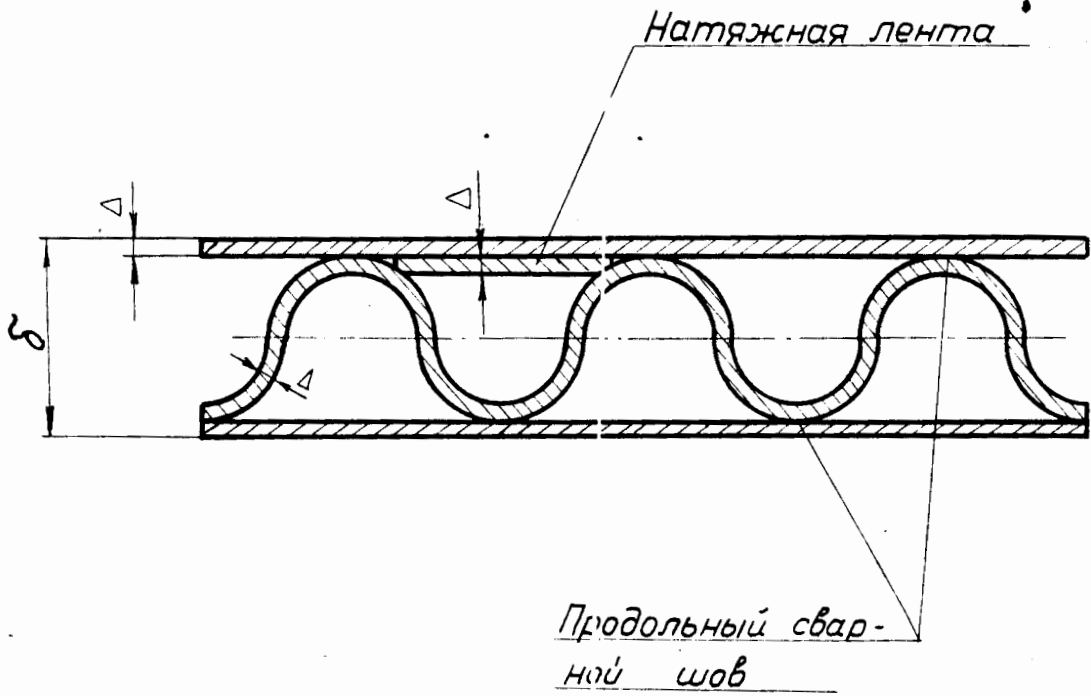


Рис 2

Поперечное сечение элемента основания  
дусанта

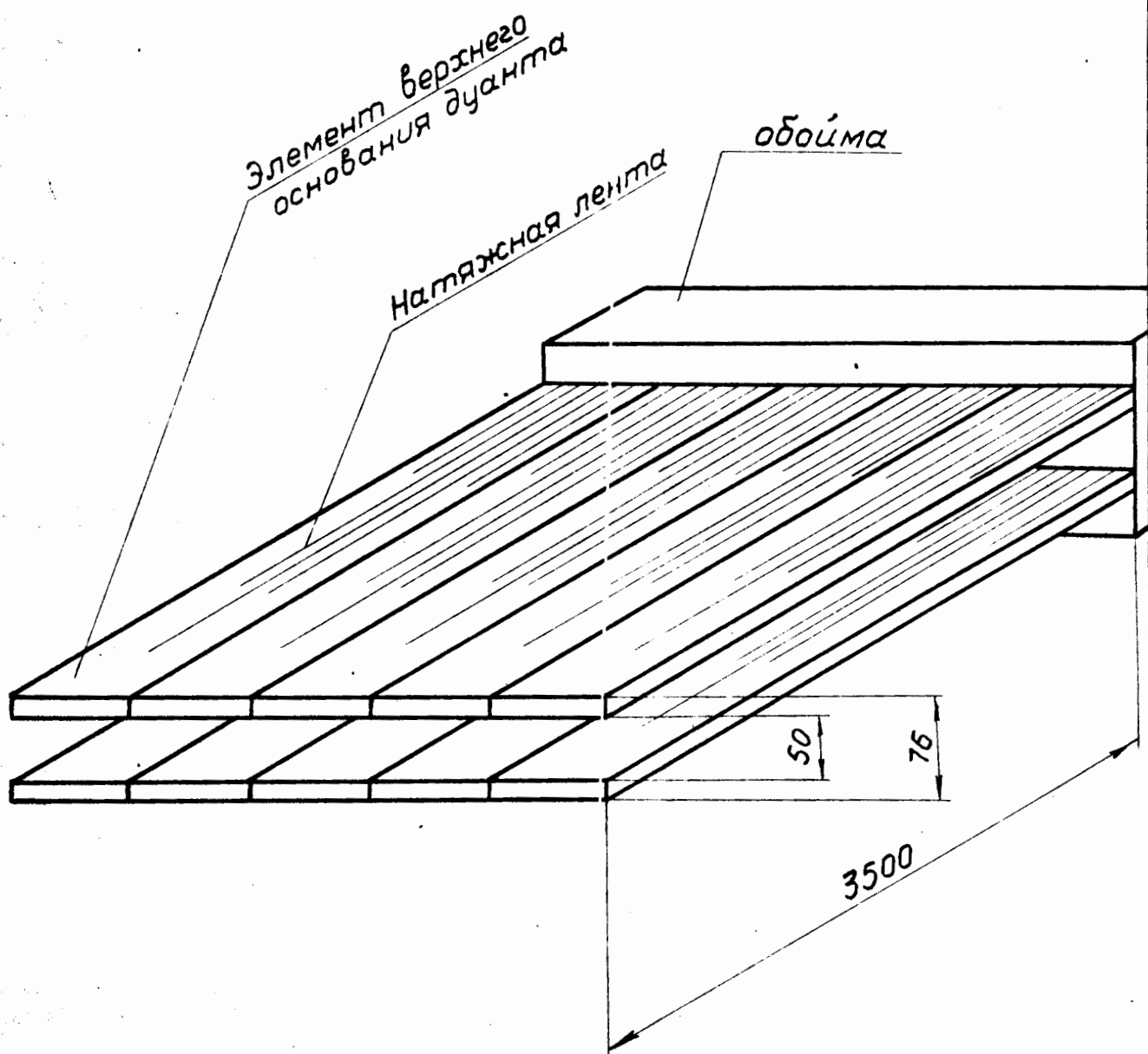


Рис.3

Конструктивная схема  
дуанта

Сектор основанця  
дуанта

Обойма

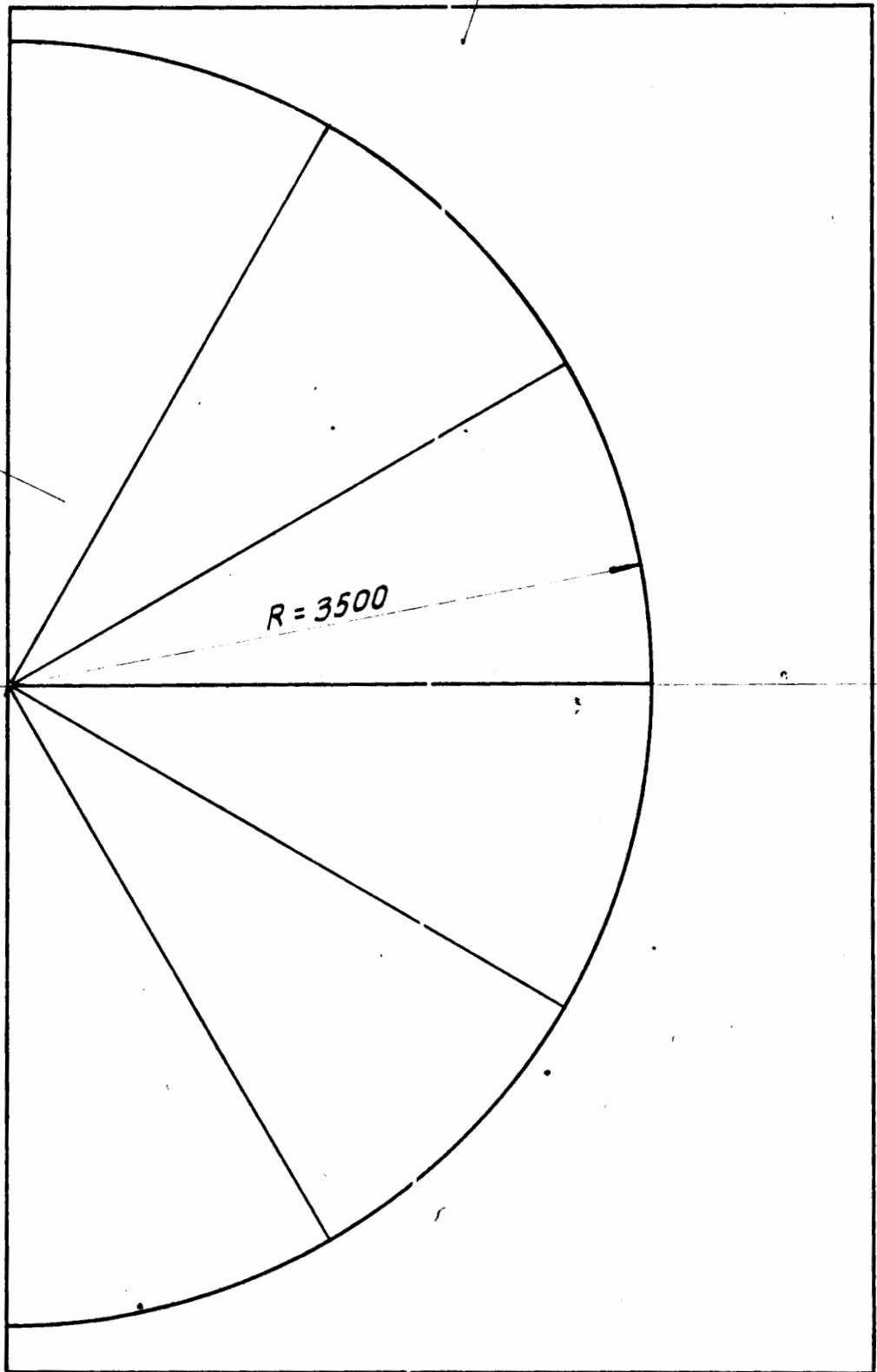


Рис. 4  
Дуант  
Вид в плане.

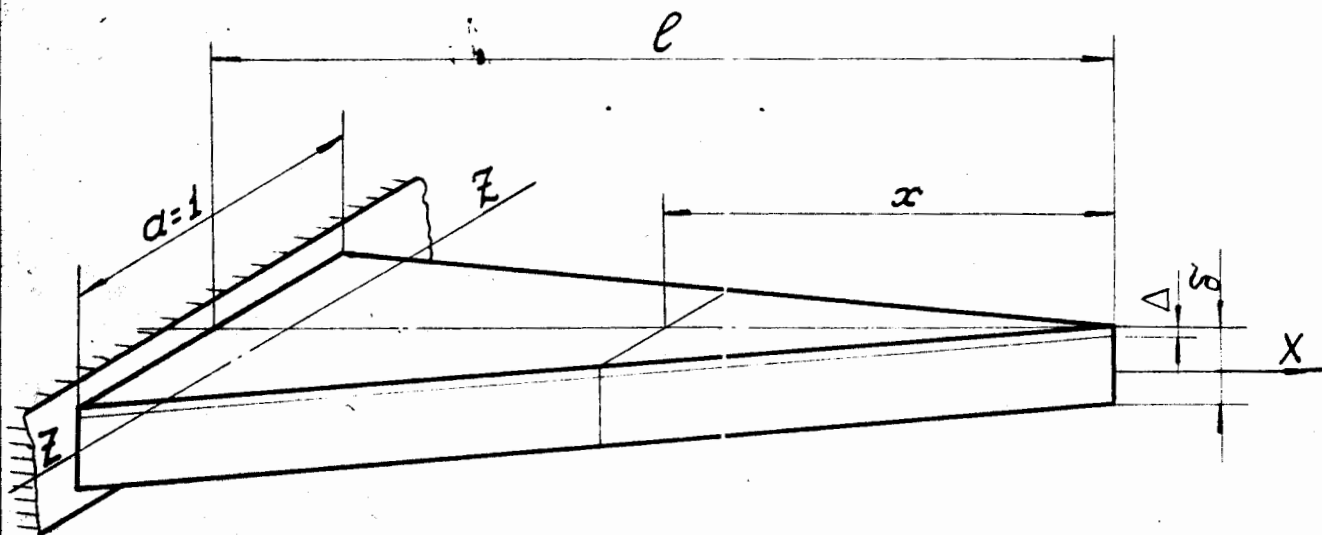


Рис. 5

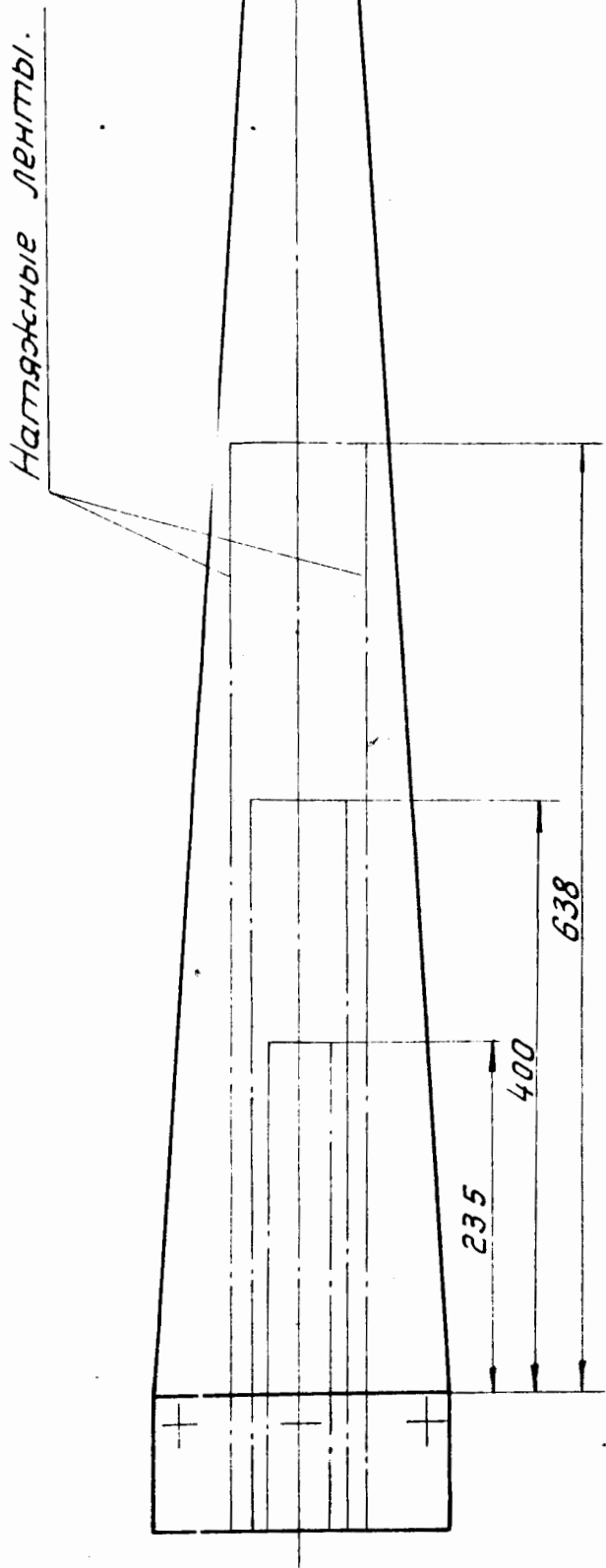
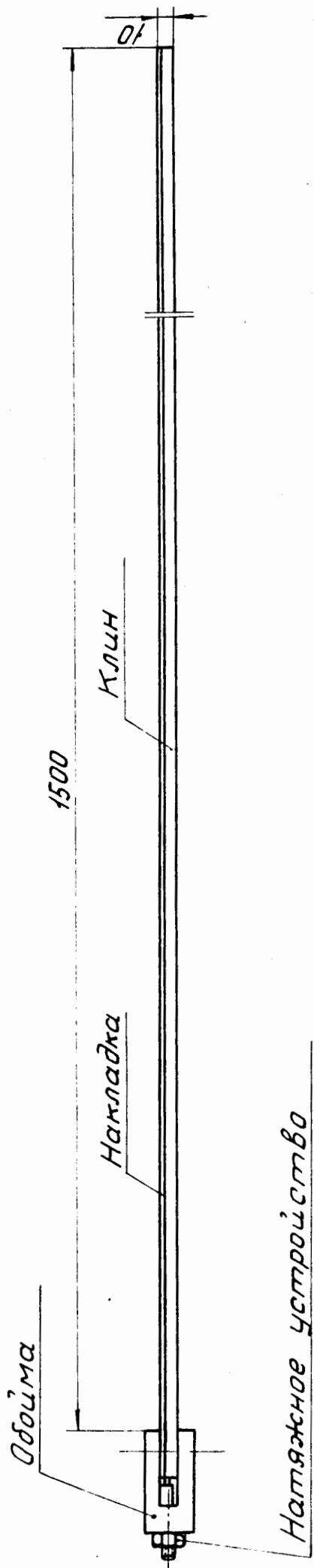
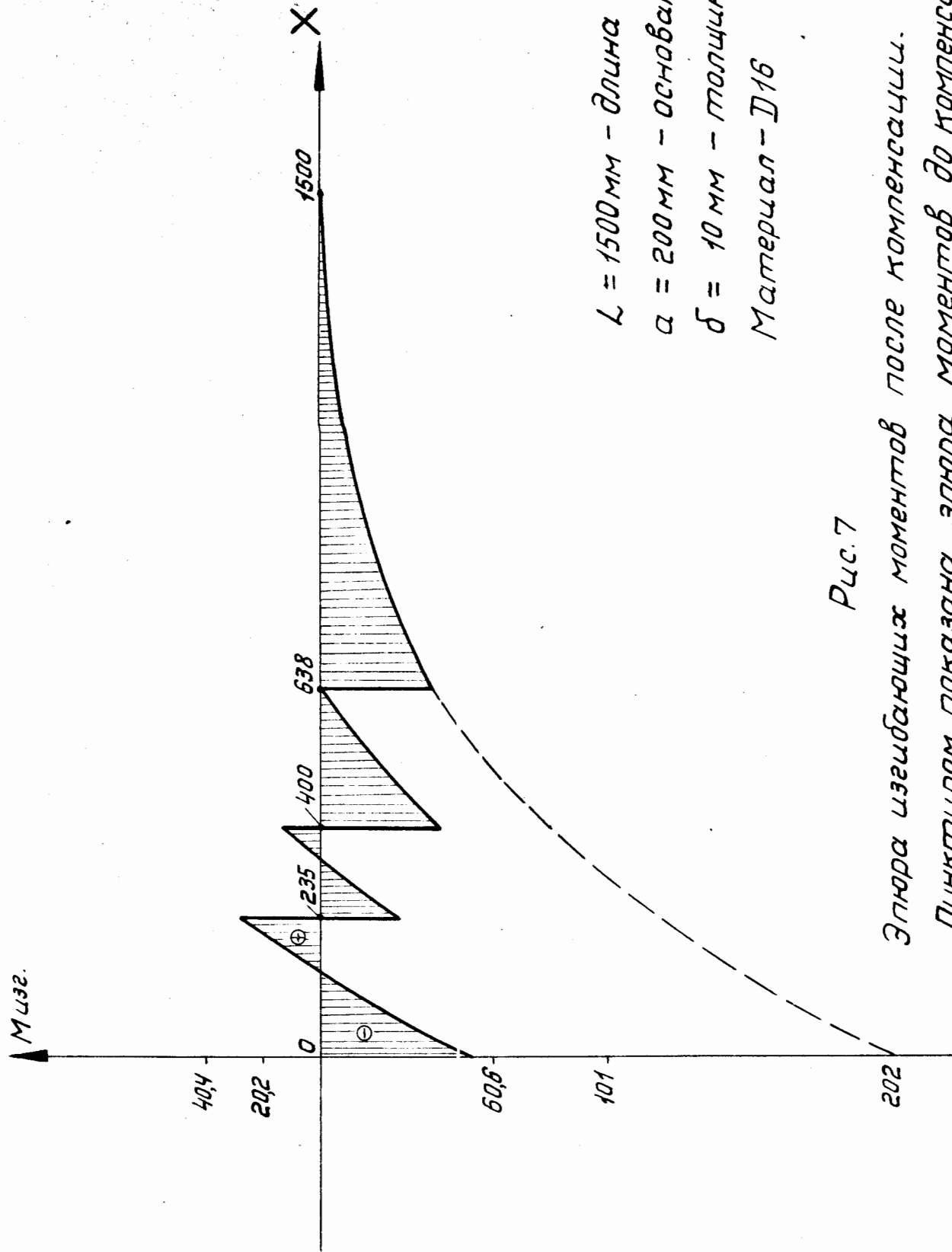


Рис. 6



$L = 1500$  мм - длина клина  
 $a = 200$  мм - основание клина  
 $b = 10$  мм - толщина клина  
 Материал - Д16

Рис. 7

Эпюра изгибающих моментов после компенсации.  
 Пунктиром показана эпюра моментов до компенсации.