

*д.т.н. Литвинский Г.Г.,
к.т.н. Фесенко Э.В.
(ДонГТУ, г. Алчевск, Украина)*

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОТЕРИ УСТОЙЧИВОСТИ НЕСУЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ КРЕПИ ИЗ КОРОБЧАТОГО ПРОФИЛЯ

Лабораторными исследованиями установлены особенности потери устойчивости стержней из коробчатого профиля при их сжатии. Определены критические нагрузки и напряжения, приводящие к общей и местной потере устойчивости. Построены и проанализированы деформационно-силовые характеристики сжатых стержней из трубчатого профиля.

Ключевые слова: *коробчатый профиль, несущая конструкция, потеря устойчивости, критические силы, критические напряжения.*

Большинство подготовительных выработок шахт Украины (свыше 90%) закреплено рамной крепью, изготовленной из стального проката. При этом на каждый километр протяженности выработки в среднем расходуется около 300-350 т металлопроката. В связи с этим проблема его экономии при креплении подземных горных выработок весьма актуальна.

В работах [1, 2] выполнен анализ существующих серийных профилей металлопроката и доказано, что наиболее технологичным и эффективным для рамной крепи является замкнутый тонкостенный профиль квадратного очертания, прочность которого при изгибе со сжатием выше, чем у стандартных спецпрофилей типа СВП в 1,5 – 2 раза, а при кручении – в 16 – 27 раз.

Использование коробчатого профиля для горной крепи позволит сократить расход металла в 1,25 – 1,6 раза при сохранении той же несущей способности рамы, заметно снизить массу отдельных её элементов, трудоемкость, себестоимость и время возведения крепи, увеличить скорость проведения и устойчивость выработок.

Проведенными исследованиями [1, 2] доказано, что необходимо отказаться от конструктивно и экономически неэффективного спецпрофиля СВП, который в настоящее время доминирует в горной промышленности, и заменить его коробчатым профилем квадратной формы для изготовления рамных крепей горных выработок.

Однако остается неизученным, как будут деформироваться при сжатии элементы крепи из тонкостенного коробчатого профиля, каковы предельные нагрузки и характер деформирования его при общей и местной потере устойчивости.

Существующие методики и множество проведенных экспериментов рассматривают, как правило, поведение металла при растяжении и изгибе стержней или плит. Проведенные малочисленные эксперименты по определению поведения металлических труб под действием сжимающих нагрузок показывают большой разброс полученных значений и мало предсказуемый характер поведения образцов во время испытаний.

В связи с этим с позиций оценки эффективности использования трубчатых элементов в конструкциях горной крепи весьма актуальной является проблема изучения поведения тонкостенных несущих трубчатых элементов при сжатии.

Цель исследований состоит в изучении особенностей деформирования и потери устойчивости сжатых несущих элементов рамной крепи горных выработок из квадратного тонкостенного профиля.

Объектом исследований является тонкостенный коробчатый профиль проката квадратной формы поперечного сечения, а **предмет исследований** – несущая способность этого профиля с учетом потери его общей и местной устойчивости под дейст-

вием продольных сжимающих нагрузок. **Задачи исследований** – лабораторными испытаниями установить характер деформирования и изменения несущей способности сжатых стержней из квадратного тонкостенного профиля при потере их общей и местной устойчивости.

Основная идея исследований состоит в учете остаточной несущей способности стержня из квадратного тонкостенного профиля при его деформировании после потери местной или общей устойчивости.

Экспериментальные исследования выполнены в лаборатории кафедры «Строительные геотехнологии» ДонГТУ на прессе МС-1000, который обеспечивает усилие сжатия на образец до 1000 кН. Общий вид пресса показан на рис. 1.



Рисунок 1 – Общий вид пресса МС-1000

Для испытаний использованы трубы 20x20x2 и 40x40x2, длиной 160, 200, 320 мм. Подготовка образцов к испытани-

ям заключалась в обеспечении параллельности торцов трубчатых стержней и их перпендикулярности оси образцов. Эти условия были необходимы для снижения эксцентриситета приложения сжимающей нагрузки относительно оси трубчатого элемента при его испытании.

Теоретически задача устойчивости сжатых стержней впервые была решена Эйлером [3], который определил критические силы и напряжения, приводящие к потере устойчивости. Однако это решение справедливо лишь при сжатии стержней до предела пропорциональности, что ограничивает его применимость лишь для длинных гибких стержней, у которых гибкость $\lambda \geq 100$. Для стержней, работающих за пределом упругости, когда их гибкость $\lambda < 100$, обычно пользуются эмпирическими формулами Т. Кармана, Энгессера, Ф.С. Ясинского [3]. Их исследованиями показано, что для коротких жестких не пустотелых стержней с $\lambda < 60$ критическим напряжением является предел текучести стали $\sigma_{кр} = \sigma_T$.

Проведем оценку максимальной гибкости образцов в проведенных нами испытаниях по известному выражению [4]:

$$\lambda = \frac{l_{ef}}{i_{min}}, \quad (1)$$

где l_{ef} – расчетная длина стержня, $l_{ef} = 32$ см;

i_{min} – минимальный радиус инерции сечения, $i_{min} = 1,537$ см.

$$\lambda = \frac{32}{1,537} = 20,8 < 60.$$

Таким образом, критические напряжения для испытанных образцов должны быть равны пределу текучести стали $\sigma_{кр} = \sigma_T \approx 240$ МПа. Лабораторные исследования должны были дать ответ, как поведет себя стержень при возникновении в нем критических напряжений, каков характер предельного деформирования и какой тип по-

тери устойчивости (общая или местная) при этом будет наблюдаться.

Результаты испытаний трубы 20x20x2 мм длиной 160 мм приведены на рис. 2. Для изучения потери устойчивости такой трубы проведено три аналогичных испытания для одинаковых условий, в результате которых получены близкие по форме графики ДСХ.

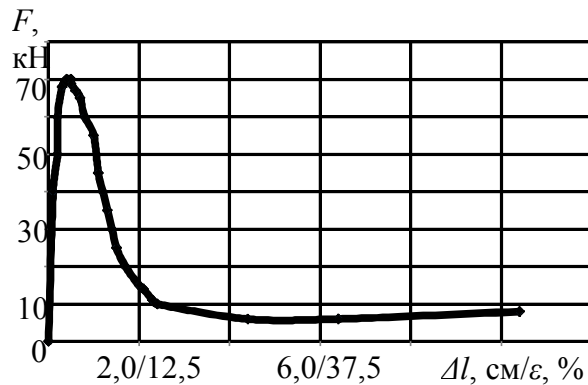


Рисунок 2 – График потери общей устойчивости коробчатой трубы 20x20x2

В момент достижения критической нагрузки $F = 68,8$ кН, абсолютная деформация трубы составила $\Delta l = 0,5$ см, а относительная деформация $\epsilon = 3\%$. Это привело к потере **общей** устойчивости. Дальнейший рост деформаций до $\Delta l \approx 2,2$ см ($\epsilon \approx 14\%$) привел к резкому снижению нагрузок, воспринимаемых трубой, до $F \approx 10$ кН. После этого, как видно из графика (рис. 2), наступает период стабилизации, когда нагрузка постоянна ($F = 8...10$ кН) и приводит к нарастанию деформаций вплоть до «складывания» трубы в плоскости изгиба.

График на рис. 2 характеризует усредненный из трех испытаний результат. Во всех случаях наблюдалась потеря общей устойчивости, поскольку относительная толщина стенки образцов (t/h , где t – толщина стенки трубы, h – высота сечения) была достаточной для предотвращения их локального деформирования. Этим можно объяснить отсутствие местной потери устойчивости во всех экспериментах данной серии.

Рассчитаем критические напряжения, исходя из максимальной нагрузки на образец F_{max} :

$$\sigma_{кр} = \frac{F_{max}}{A}, \quad (2)$$

где A – площадь металла образца, $A = 1,439$ мм

$$\sigma_{кр} = \frac{68,8 \text{ кН}}{1,439 \text{ см}^2} = 47,8 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2} = 478 \text{ МПа}.$$

Как видим, по результатам эксперимента критические напряжения оказались значительно выше ожидаемых ($478 > 240$). Это можно объяснить влиянием на устойчивость замкнутой формы испытываемых образцов и стесненным деформированием их торцов, что позволило образцу выдерживать напряжения, сравнимые с пределом прочности.

Для образцов трубы типоразмера 40x40x2 проведено две серии испытаний – при длине 320 и 200 мм.

Результаты испытаний трубы 40x40x2 длиной 320 мм приведены на рис. 3. После преодоления пиковой начальной прочности трубы началась потеря местной устойчивости в виде волнового изменения несущей способности трубы.

Максимальная нагрузка на эти трубы составила $F_{max} = 124$ кН при деформации $\Delta l = 0,4$ см ($\epsilon = 1,3\%$), что соответствует критическим напряжениям:

$$\sigma_{кр} = \frac{124 \text{ кН}}{2,937 \text{ см}^2} = 42,2 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2} = 422 \text{ МПа}.$$

Как и в предыдущих испытаниях, критические напряжения оказались значительно выше предела текучести стали и близкими к пределу ее прочности. При этих испытаниях произошла не общая, а местная потеря устойчивости труб (рис. 4).

Последовательность возникновения характерной формы потери местной устойчивости была следующей.

После возникновения в образце критических напряжений, в одном из его сечений начинает формироваться изгибная

складка, вызванная появлением признаков местной потери устойчивости. На двух параллельных гранях образца происходит выпирание стенки наружу, тогда как на двух остальных гранях металл изгибается внутрь трубы (рис. 4, а). Этот этап деформирования на ДСХ (рис. 3) сопровождается резким падением воспринимаемых образцом сжимающих нагрузок.

Дальнейшее нагружение приводит к уплощению изгибной складки смыканию ее сторон, (рис. 4, б) и, в конце концов, исчерпанию ее деформативности, что на графике ДСХ отражается как возрастание

нагрузки на образец. После исчерпания возможности дальнейшего деформирования (смятия) складки происходит рост воспринимаемых трубой сжимающих нагрузок до нового пика вплоть до начала формирования новой складки. При этом направление изгиба металла граней поочередно меняется для каждой последующей складке на противоположное (рис. 4, в).

По описанному выше механизму труба деформируется вплоть до полного ее смятия. Количество волн на графике ДСХ трубы (рис. 3) соответствует количеству складок, возникших во время испытаний.

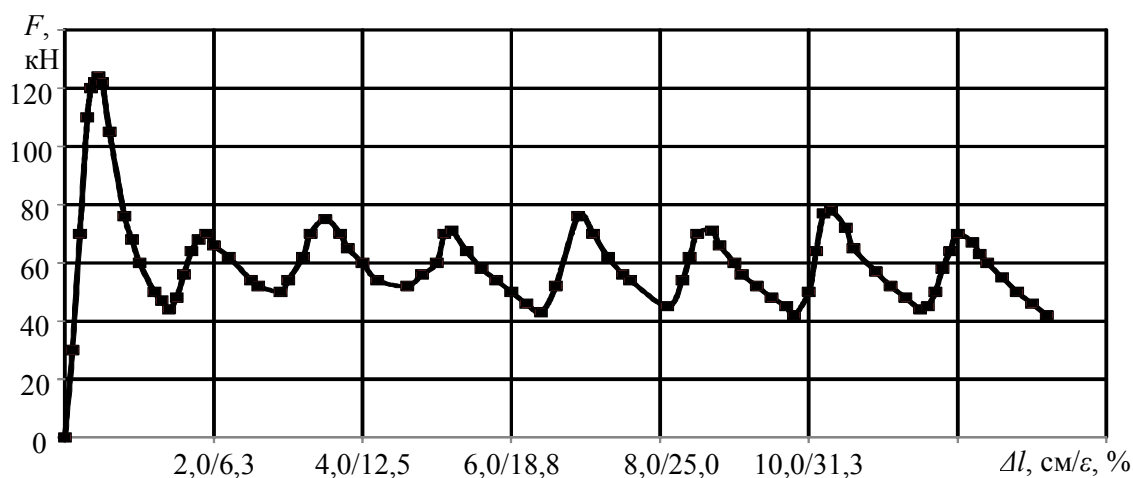


Рисунок 3 – График деформирования труб сечением 40x40x2 мм и длиной 320 мм при потере местной устойчивости

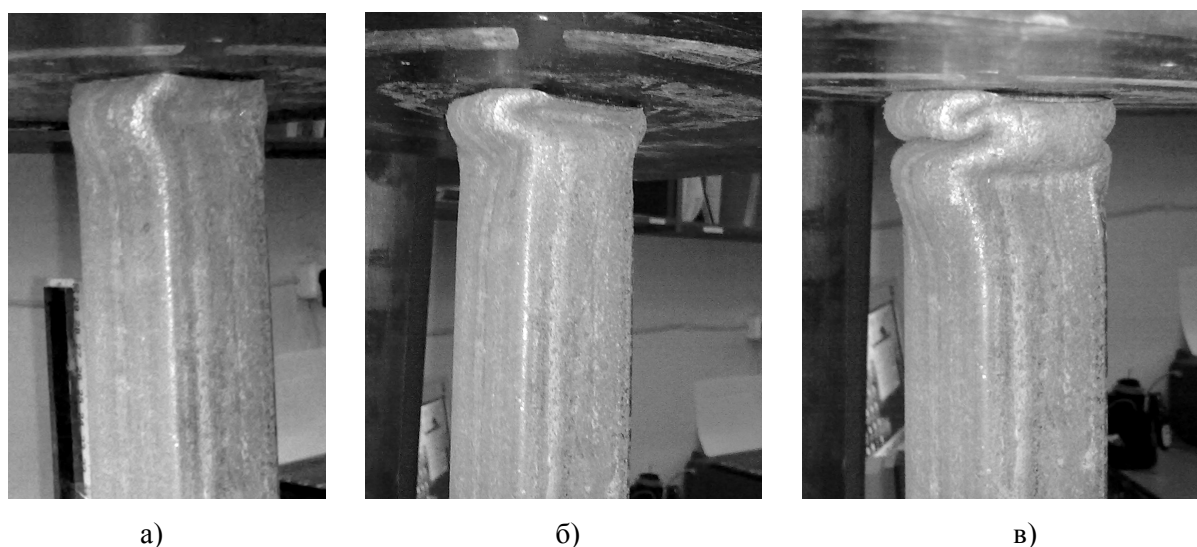


Рисунок 4 – Этапы потери местной устойчивости квадратной трубы

При таком деформировании нагрузка, воспринимаемая образцом колеблется от 43 до 78 кН, что соответствует напряжениям $\sigma = 145 \dots 265$ МПа, что примерно находится близко к пределу текучести.

Таким образом, несущая конструкция из замкнутого коробчатого профиля при ее деформировании по местной потере устойчивости под действием продольных сжимающих сил способна воспринимать нагрузки от 35 до 63% от максимальных вплоть до полного ее смятия.

Всего было проведено 3 испытания образцов труб данного типоразмера длиной 320 мм. Результаты испытаний двух из них оказались близкими (рис. 3). При испытании одного из образцов, после достижения максимальной нагрузки $F_{max} = 130$ кН, он начал терять общую устойчивость, т.е. его ДСХ имела вид, аналогичный графику на рис. 2. Это объясняется недостаточной точностью обработки срезов образца, что привело к возникновению эксцентриситетов приложения нагрузки во время испытаний и изгибу образца (общая потеря устойчивости).

Отдельной серией (3 эксперимента) проведены испытания образцов такого же типоразмера трубы, но меньшей длины – 200 мм. Все эксперименты показали близкие результаты, аналогичные графикам на рис. 3. Общий вид таких образцов после испытаний показан на рис. 5.



Рисунок 5 – Образцы трубы 40x40x2 после испытаний

Выводы

1. Проведенные испытания показали, что коробчатый профиль после потери местной устойчивости сохраняет достаточно большой запас прочности и может значительно деформироваться под действием сжимающей нагрузки.

2. Общая потеря устойчивости коробчатого профиля сопровождается резким падением его несущей способности и поэтому недопустима с точки зрения работы горной крепи в условиях больших смещений породного контура.

3. Характер потери устойчивости (общая или местная) несущей конструкции из замкнутого коробчатого профиля при ее нагружении продольными сжимающими силами зависит от соотношения размеров поперечного сечения трубы и толщины ее стенки, а также от гибкости и условий приложения нагрузок – наличие эксцентриситетов, начального изгиба.

4. Стержень из коробчатого профиля под действием продольных сжимающих нагрузок, когда он деформируется по механизму местной потери устойчивости, периодически, по мере возникновения изгибных складок на стенках профиля, изменяет свою несущую способность от 35 до 63% от максимальной, причем волновой характер смены максимумов и минимумов имеет почти постоянный период и среднюю амплитуду вплоть до момента полного смятия трубы.

5. Задачами дальнейших исследований являются: определение влияния геометрических параметров сечения и длины трубы на особенности местной потери устойчивости; установление механизмов потери устойчивости стержней из коробчатого профиля при совместном действии на них сжимающих нагрузок и изгибающих моментов.

Библиографический список

1. Литвинский Г.Г. Исследование эффективности прокатных профилей для рамной крепи горных выработок / Г.Г. Литвинский, Э.В. Фесенко // Уголь Украины. – 2012. – №11. – С. 11 – 14.
2. Литвинский Г.Г. Оптимальный прокатный профиль для рамной крепи / Г.Г. Литвинский, Э.В. Фесенко // Вісті Донецького гірничого інституту. – Донецьк: ДВНЗ «ДонНТУ», 2013. – Вып. 1(32). – С. 198 – 203.
3. Беляев Н.М. Сопротивление материалов. – М.: Главная редакция физико-математической литературы изд-ва «Наука», 1976. – 608 с.
4. Маилян Р.Л. Строительные конструкции: учебное пособие / Р.Л. Маилян, Д.Р. Маилян, Ю.А. Веселев. Изд. 2-е. – Ростов н/Д: Феникс, 2005. – 880 с.

Рекомендована к печати д.т.н., проф. Бабиюком Г.В.

Статья поступила в редакцию 02.07.13.

д.т.н. Литвинський Г.Г., к.т.н. Фесенко Е.В. (ДонДТУ, м. Алчевськ, Україна)

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВТРАТИ СТІЙКОСТІ НЕСУЧИХ ЕЛЕМЕНТІВ КРІПЛЕННЯ З КОРОБЧАСТОГО ПРОФІЛЮ

Приведено результати досліджень по вивченню механізмів втрати стійкості несучих конструкцій із замкнутого коробчастого профілю, визначено критичні навантаження і напруження, що призводять до втрати їх стійкості, побудовано та проаналізовано деформаційно-силові характеристики стрижнів з трубчастого профілю.

***Ключові слова:** стрижень, труба, несуча конструкція, критичні сили, критичні напруження, профіль металопрокату.*

Litvinsky G.G., Fesenko E.V. (DonSTU, Alchevsk, Ukraine)

EXPERIMENTAL STUDIES OF STABILITY LOSS OF BEARING ELEMENTS SUPPORTS FROM BOX SECTION

Laboratory studies revealed features for the loss of stability of rods from box section when it was compressed. Critical loads and stresses to the overall and local stability of the bars were identified. Deformation and strength characteristics of compressed box-rods are built and analyzed.

***Key words:** box section, the supporting structure, the loss of stability, critical power, critical voltage, the local resistance.*