



УДК 624.014.072

**А.В. Потапов** – аспирант

**Центральный научно-исследовательский институт строительных конструкций имени В.А. Кучеренко (ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко, филиал ФГУП «НИЦ «Строительство»)**

## **УСТОЙЧИВОСТЬ СТАЛЬНЫХ СТЕРЖНЕЙ ОТКРЫТОГО ПРОФИЛЯ С УЧЕТОМ РЕАЛЬНОЙ РАБОТЫ МАТЕРИАЛА**

### **АННОТАЦИЯ**

Статья посвящена экспериментальному исследованию и совершенствованию методов расчета на устойчивость стальных стержней из массовых видов прокатных профилей с учетом реальной работы материала. На основании экспериментальных и теоретических исследований разработан метод расчета на устойчивость стальных стержней открытого профиля с различными типами поперечных сечений при их работе за пределом упругости (упругопластическая стадия работы) с применением ЭВМ.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** Устойчивость, метод расчета, численные исследования, экспериментальные исследования, стальные конструкции.

**A.V. Potapov** – post-graduate student

**Central Scientific-Research Institute for Building Constructions named after V.A. Kucherenko Branch FGUP NITS “Stroitelstvo”, TSNIISK named after V.A. Kucherenko**

## **STABILITY OF STEEL RODS OF OPEN SECTION TAKING INTO ACCOUNT THE REAL WORK OF MATERIAL**

### **ABSTRACT**

The article is devoted to experimental research and perfection of calculation methods on stability of steel rods from mass types of rolled section taking into account the real work of material. On the basis of experimental and theoretical investigations the calculation method on stability of steel rods of open section with different types of cross currents during their work beyond the limit of tension with computer use is developed.

**KEYWORDS:** Stability, method of calculation, numerical investigations, experimental researches, steel constructions.

В сложившихся современных условиях повышенные требования к эффективному использованию материальных ресурсов обеспечиваются за счет снижения материалоемкости, стоимости и повышения качества сырья, конечной продукции, а также повышения производительности труда за счет широкого внедрения и применения новых конструктивных решений.

Поэтому исследование резервов несущей способности и внедрение результатов этих исследований в инженерную практику всегда являлось одним из важнейших направлений строительной науки.

Статья посвящена экспериментальному исследованию и совершенствованию методов расчета на устойчивость стальных стержней из массовых видов прокатных профилей с учетом реальной работы материала.

В применяемых в строительстве металлических конструкциях наиболее распространенными типами

сечений стержневых элементов являются открытые прокатные и холоднокатаные профили, поэтому основной задачей остается совершенствование методов расчета таких стержней на устойчивость с целью более эффективного использования материала.

В ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко на основании экспериментальных и теоретических исследований разработан метод расчета на устойчивость стальных стержней открытого профиля с различными типами поперечных сечений при их работе за пределом упругости (упругопластическая стадия работы) с применением ЭВМ.

Проблема расчета стержневых элементов, деформируемых за пределом упругости, имеет длительную историю, тем не менее, в современной практике такие расчеты носят приближенный характер, значительно влияя на точность конечных результатов. С возрастающими мощностями современных электронно-вычислительных комплексов появилась



масса возможностей, позволяющих с большой точностью решать сложные задачи, решение которых было затруднено или невозможно.

Разработанный метод расчета на устойчивость стальных тонкостенных стержней основан на синтезе уравнений равновесия внутренних и внешних сил в сечении стержня и уравнений устойчивости. Это дает возможность определить предельную нагрузку для сжатых и сжато-изгибаемых стержней с любой изначально заданной точностью при любой стадии упругопластического деформирования и любой диаграммой «напряжение-деформация».

В реализации данного метода учитывается возможность потери устойчивости, как в стадии упругого деформирования, так и в стадии неупругого деформирования, то есть с учетом развития пластических деформаций.

Вся процедура расчета включает две стадии. На 1-й стадии стержень искривляется под возрастающей нагрузкой. На 2-й стадии выполняется проверка устойчивости полученного деформированного (искривленного) состояния стержня, при этом выявленная неустойчивость свидетельствует о достижении предельной нагрузки.

Анализ деформирования стержня на 1-й стадии вскрывает общую картину развития деформаций и выполняется с применением секущего модуля  $E_s = y/e$ . Анализ устойчивости, достигнутой на 1-й стадии деформированного состояния, выполняется с учетом возможности существования новой формы равновесия, сколь угодно близкой к полученной при расчете форме равновесия. Такой анализ, основанный на поиске новой формы равновесия, выполняется с применением линеаризованных, или варьированных уравнений. Поскольку поиск новой формы равновесия осуществляется в малой окрестности формы равновесия, полученной на 1-й стадии, то в варьированных уравнениях применяется касательный модуль  $E_t = dy/de$ , а сами варьированные уравнения в качестве неизвестных содержат вариации прогибов и поворота. При этом вариации всех нагрузок принимаются равными нулю, а значения нагрузок остаются такими, как они были получены на 1-ой стадии расчета.

Необходимость применения касательного модуля  $E_t$  при анализе устойчивости со всей очевидностью следует из работы Н. Хоффа [1], где подтвержден факт потери устойчивости сжатых стержней при работе материала по касательному модулю.

Так как рассматриваемый метод расчета ориентирован на применение ЭВМ, то применение каких-либо аппроксимирующих выражений для аналитического представления физической зависимости «напряжение-деформация» не имеет смысла. На зависимость  $y - e$  не должно накладываться каких-либо ограничений и эта зависимость, получаемая на разрывной машине, должна соответствовать данному материалу.

Для рассматриваемых задач вполне подходит зависимость «напряжение-деформация», определенная из опытов на одноосное растяжение или сжатие.

Представление зависимости  $y - e$  осуществляется в виде кусочно-линейной функции, при этом точность представления этой зависимости должна быть такой, чтобы можно было вычислить значения как секущих модулей  $E_s = y/e$ , так и касательных  $E_t = dy/de$  в любом диапазоне изменения деформации  $e$ .

Точность расчета решения задач напрямую зависит от точности представления зависимости  $y - e$ , которая задается набором узловых точек (узлов диаграммы).

Количество точек аргумента  $e$ , в которых известны соответствующие значения напряжений  $y$ , выбирается минимально необходимым в зависимости от характера диаграммы «напряжение-деформация» и должно допускать линейную интерполяцию между узловыми точками.

При расчете данной задачи в ЭВМ вводится в табличном виде зависимость  $y - e$  для требуемого материала.

В пределах упругих деформаций зависимость между напряжением и деформацией выражается через модуль упругости:

$$E = y/e.$$

В остальной части диаграммы, где зависимость  $y - e$  носит нелинейный характер, напряжения и деформации будут выражаться через секущий модуль:

$$E_s = y/e.$$

Величина секущего модуля  $E_s$  зависит от значения деформации  $e$  в любой точке сечения, так как  $E_s$  есть не что иное, как тангенс угла между секущей и абсциссой  $e$  (рис. 1).

На опытной базе ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко проведен ряд экспериментов, посвященных данной тематике. Целью экспериментов было определение фактического напряженно-деформированного состояния сжатых стальных стержней открытого профиля и сравнение полученных данных с теоретическими изысканиями.

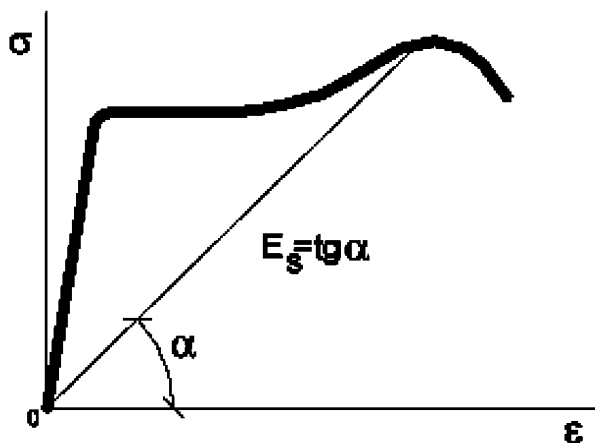


Рис. 1

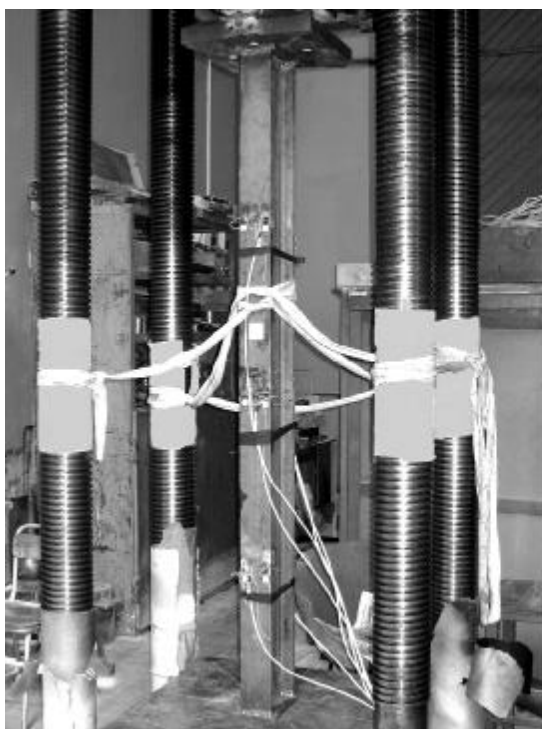


Рис. 2

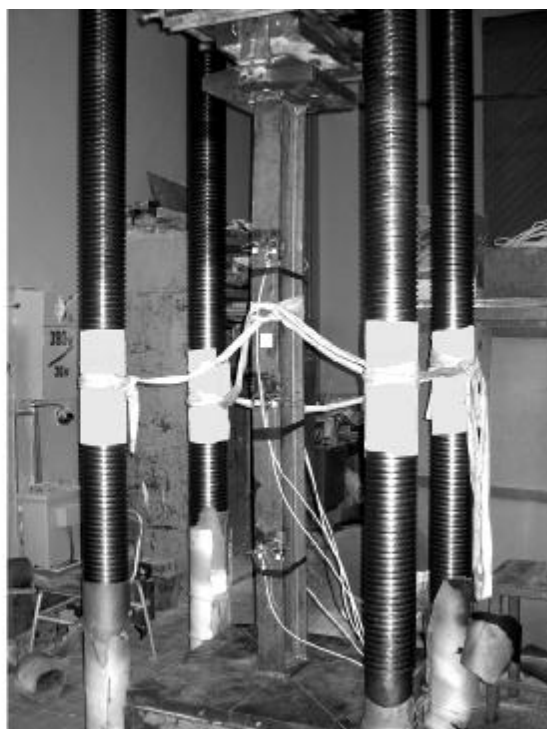


Рис. 3

Основной целью проведения экспериментальных исследований центрально и внецентренно-сжатых стержней с различными эксцентриситетами являлось определение предельных нагрузок, при которых стержень теряет устойчивость с фиксацией формы изгиба и углов поворота.

В соответствии с поставленной целью решались следующие задачи:

1) определение предельных нагрузок, при которых стержень теряет устойчивость для проверки достоверности результатов теоретических исследований;

2) получение значений относительных фибровых деформаций в различных точках поперечных сечений стержней;

3) получение значений линейных перемещений и углов поворота поперечных сечений стержней;

4) получение диаграмм растяжения/сжатия «напряжение-деформация».

Для испытаний были изготовлены стержни из прокатных двутавров 20Б1 по СТО АСЧМ 20-93 (серия «А»), прокатных швеллеров № 22 по ГОСТ 8240-89 (серия «Б») и равнополочных уголков сечением 125x125x10 мм по ГОСТ 8509-93 (серия «В») с гибкостью в плоскости наименьшей жесткости сечения приблизительно 80, 85 и 90 соответственно.

К торцам стержней приваривались опорные пластины толщиной 10 мм. Торцы стержней фрезеровались для равномерной передачи усилий через пластину.

Для выявления действительной диаграммы стали «напряжение-деформация» из испытанных стержней было взято по 9 плоских образцов каждой серии длиной около 400 мм, которые испытывались на растяжение на испытательной машине «Амслер». Таким образом, для каждого стержня была получена своя действительная диаграмма работы стали.

В эксперименте рассматривались шарнирно опертые стержни, к которым продольная сжимающая нагрузка прикладывалась к центру тяжести поперечного сечения (центральное сжатие), а также с одноосным и двухосным эксцентриситетами. При внецентренном сжатии нагрузка прикладывалась в плоскостях как наименьшей, так и наибольшей жесткости сечения стержня.

Испытания центрально и внецентренно-сжатых стержней с различными эксцентриситетами проводились для каждой серии.

При проведении экспериментов использовалась разработанная система сбора информации с тензорезисторов для определения относительных фибровых деформаций, возникающих в строительных конструкциях при испытаниях на прочность и устойчивость. Измеренные сигналы с тензорезисторов через преобразующие устройства поступали по стандартному последовательному каналу RS 232 в ПК. Для сбора и обработки информации с тензорезисторов разработано специальное программное обеспечение, которое автоматически обрабатывало массив считанных данных и преобразовывало в файл



(например, MS Excel), пригодный для дальнейшей математической обработки.

При проведении экспериментов, наряду с тензорезисторами, использовались также и механические тензометры с базой 20 мм для сравнения полученных результатов. Сравнение результатов показало, что точность проведения измерений при помощи тензорезисторов значительно выше, чем у механических тензодатчиков.

Анализ результатов экспериментальных данных показал, что форма изогнутой оси испытанных стержней соответствует принятой схеме закрепления (шарнирное закрепление стержней).

При испытаниях не наблюдалась местная потеря устойчивости стержней.

В большинстве случаев зона остаточных пластических деформаций после снятия нагрузки совпадала с положением максимального изгибающего момента по длине стоек, что соответствовало схемам нагружения.

Общий вид исследуемого стержня в прессе до испытания приведен на рис. 2, после испытания – на рис. 3.

#### **Выводы:**

Разработанный теоретический метод расчета на устойчивость и проведенные экспериментальные исследования показали высокое схождение результатов. Расхождение в значениях критической силы, при которой стержень теряет устойчивость, в среднем составляет около 15 %.

Разработанный «машинный» метод определения критической силы по действительной диаграмме работы материала «напряжение-деформация» рассчитан на проведение массовых вычислений с целью практического использования результатов расчета.

Расчетные предпосылки, принятые для теоретического решения задачи, соответствуют общепринятым допущениям, принимаемым при решении подобных задач.

Данный «машинный» метод расчета можно внедрять в современные программные комплексы и использовать в инженерных расчетах.

#### **Литература**

1. Хофф Н. Продольный изгиб и устойчивость. – М., 1955. – 154 с.
2. Почтовик Г.Я. и др. Методы и средства испытания строительных конструкций. – М.: Высшая школа, 1973. – 160 с.
3. Власов В.З. Тонкостенные упругие стержни. – М.: Государственное издательство строительной литературы, 1940. – 276 с.
4. Тимошенко С.П. Устойчивость стержней, пластин и оболочек. – М.: Наука, 1971. – 808 с.
5. Насонкин В.Д. Предельная нагрузка для сжатых стержней, деформируемых за пределом упругости // Строительная механика и расчет сооружений, 2007, № 2. – С. 24-28.