

МЕТОДЫ ПОСТРОЕНИЯ КРИВЫХ ПРЕДЕЛЬНЫХ СОСТОЯНИЙ УЗЛОВ СТАЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПРИ КОМПЛЕКСНОМ ЗАГРУЖЕНИИ

METHODS FOR CONSTRUCTING LIMIT STATE CURVES OF STEEL STRUCTURE JOINTS UNDER MULTI-PARAMETER LOADING

Работа посвящена разработке и оптимизации методов построения кривых предельных состояний для узлов стальных конструкций под действием многопараметрических (комплексных) нагрузок. В рамках работы рассмотрены методы ручного и программного построения кривых на примере опорного узла двутавровой колонны, сравниваются результаты расчетов. Также уделено внимание автоматизации расчетов с использованием программирования. Предложенная методика позволяет значительно упростить построение кривых без потерь в точности расчетов.

Ключевые слова: кривые предельных состояний, узлы стальных конструкций, базы колонн, комплексное нагружение, многопараметрическое нагружение.

This work is dedicated to the development and optimization of methods for constructing limit state curves for steel structure joints under multi-parametric (complex) loading. It explores both manual and software-based methods for constructing these curves using the example of the support joint of an I-beam column, and compares the calculation results. Attention is also given to the automation of calculations through programming. The proposed method significantly simplifies the construction of curves without sacrificing calculation accuracy.

Keywords: limit state curves, steel structure joints, column bases, complex loading, multi-parametric loading, IDEA StatiCa.

Кривые предельных состояний представляют собой графическое отображение граничных условий, при которых рассматриваемые элементы строительных конструкций достигают того или иного предельного состояния. Построение таких кривых является важным этапом анализа несущей способности конструкций. Чаще всего графики демонстрируют работу отдельных элементов стальных конструкций (балок, колонн).

Предметом исследования являются методы построения кривых предельных состояний для узлов стальных конструкций и их оптимизация. В частности, при многопараметрическом (комплексном) нагружении.

Обратимся к теории расчета стальных стержней. В частности к метод исследования прочности отдельных элементов при многопараметрическом нагружении с учетом взаимного влияния усилий [1]. Этот метод позволяет найти зависимость между критическим значением момента (M) и продольной силы (N) при их одновременном воздействии на элементы конструкции.

Таким образом, для наглядного представления работы узла при совместном действии момента и продольной силы, кривые предельных состояний предлагается строить в координатах $M-N$.

В рамках исследования были построены кривые предельных состояний для опорного узла двутавровой колонны. Схема узла представлена на рис. 1. Выбор этого узла обусловлен количеством его параметров: при рассмотрении методов построения кривых для более сложной модели, адаптировать его для менее сложных моделей значительно легче. В качестве комплексного нагружения выбрано сочетание продольной силы и изгибающего момента, действующего в плоскости стенки двутавра.

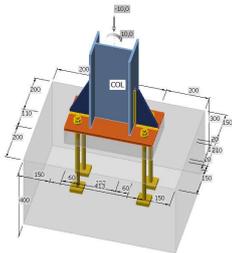


Рис. 1. Рассматриваемый опорный узел

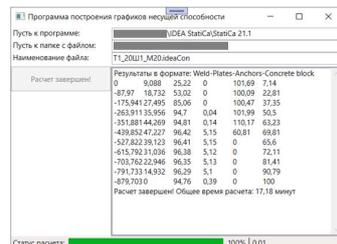


Рис. 2. Результаты программного расчета

Задача построения кривой в общем виде сводится к задаче нахождения наибольшего возможного количества сочетаний продольной силы и момента, при которых один или несколько компонентов узла находятся в предельном состоянии [2]. Вне зависимости от способа построения кривых (по результатам ручных расчетов, по результатам расчетов с использованием ПК, автоматизированное построение) можно выделить следующие шаги:

- Определение максимального значения одного из параметров нагружения;
- Выбор определяющих точек кривой и величин одного из параметров нагружения в этих точках;
- Подбор значений второго параметра в определяющих точках.

Построение кривых по описанному алгоритму возможно осуществить как полностью вручную, так и перебором с использованием программных комплексов. Оба варианта являются затратными по времени и требуют оптимизации.

Построение кривых было оптимизировано с помощью *User API* для *IDEA StatiCa*. Для написания кода, осуществляющего расчет, был выбран язык *C#*.

Логика программы основывается на общем алгоритме, описанном выше. Переменные, используемые в описании алгоритма, представлены в таблице 1. В рамках цикла выполняются следующие шаги. Если *ForceToFind* равно «N», вызывается функция *GetResultsFromLoads*, передавая текущую силу *ActiveForce* и фиксированный момент равный 0. Если *ForceToFind* равно «M», наоборот, фиксируется *ActiveForce*, а в функцию передается *fixedForce* (заданная как i -й отрезок). Эта функция выполняет расчет, возвращая *true*, если узел конструкции выдерживает нагрузку, и *false*, если не выдерживает.

Если текущий расчет дал результат *false*, и это первый случай недопустимого усилия, значение *ActiveForce* сохраняется в *Nfalse*. Если получен результат *true*, обновляется *Ntrue*.

Далее необходима корректировка величины следующего шага.

Если два последних расчета показывают одинаковый результат (*true* или *false*), шаг увеличивается ($k = 2$). Если результаты противоположные, шаг уменьшается ($k = 0,5$). В случае, если диапазон (*Ntrue* и *Nfalse*) определен, шаг корректируется так, чтобы искать значения в середине этого диапазона.

Расчет завершается, когда текущая относительная погрешность (*ActiveTolerance*) становится меньше заданной точности (*Tolerance*).

Текущая погрешность (*ActiveTolerance*) вычисляется по формуле

$$ActiveTolerance = \frac{|ActiveForce - Nprevious1|}{|ActiveForce|} \quad (1)$$

Величина силы с учетом шага (после проверки) определяется по формуле

$$ActiveForce = Nprevious1 \pm k \cdot |Nprevious1 - Nprevious2|, \quad (2)$$

где знак перед коэффициентом соответствует знаку величины *Nprevious*.

Для случая, когда диапазон уже определен, величина силы определяется по формуле

$$ActiveForce = Ntrue + 0,3 \cdot (Nfalse - Ntrue). \quad (3)$$

Таблица 1 – Входные параметры и переменные основной функции

Входные параметры функции	
<i>ForceToFind</i>	Строка, описывающая тип величины, которую необходимо вычислить («M» / «N»).
<i>FixedForce</i>	Фиксированная сила или момент, значение которой не изменяется во время расчета.
<i>StartValue</i>	Начальное значения для итерационного поиска величины (может быть случайным, может вводиться вручную по предположениям).
<i>Tolerance</i>	Заданная погрешность, в пределах которой результат считается подходящим.
Переменные функции	
<i>ActiveForce</i>	Текущая величина силы/момента, проверяемая в i -ой итерации, изначально равна <i>StartValue</i> .
<i>ActiveTolerance</i>	Текущая относительная погрешность расчета, изначально равна удвоенному значению <i>Tolerance</i> .
<i>Nprevious1</i> и <i>Nprevious2</i>	Предыдущая и предшествующая ей переменные величины нагрузки.
<i>PreviousResult1</i> и <i>PreviousResult2</i>	Логические переменные, хранящие результаты соответствующих проверок.
<i>Ntrue</i> и <i>Nfalse</i>	Крайние значения усилий, для которых проверка проходит или не проходит соответственно.

Результаты программного расчета в интерфейсе программы по описанному алгоритму представлены на рис. 2. Среднее отклонение полученных значений от результатов ручного перебора с помощью ПК составило менее 1%. Это расхождение обусловлено более высокой точностью программного расчета. Также несколько комбинаций силы и момента были проверены ручным расчетом. Отклонение составило менее 5%, что говорит о корректной работе программы. На рис. 3 представлены кривые несущей способности опорного узла двутавровой колонны, построенные на основе ручного расчета и программного расчета.

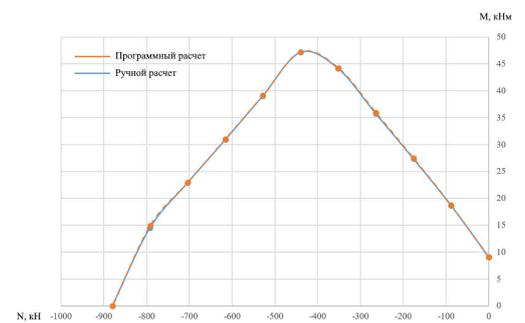


Рис. 3. Кривые несущей способности узла

Выводы:

- Разработан метод построения кривых предельных состояний для узлов стальных конструкций с учетом многопараметрического нагружения;
- Сравнение результатов автоматизированных расчетов с ручным перебором показало их высокую точность — расхождения составляют менее 1%, что подтверждает корректность предложенной методики;
- Предложенный метод может быть адаптирован для других типов узлов и условий нагружения, что открывает перспективы его дальнейшего развития и применения в инженерной практике.

Литература

1. Белый, Г. И. Развитие методов расчета стержневых элементов стальных конструкций при многопараметрическом нагружении // Г. И. Белый // Вестник гражданских инженеров. – 2020. – № 3(80). – С. 43-54. – DOI 10.23968/1999-5571-2020-17-3-43-54. – EDN WUMZWU.
2. Насырова, И. Ю. Компонентный метод конечных элементов в BIM проектировании на примере программы IDEA StatiCa // И. Ю. Насырова, П. В. Баров, Г. М. Бажин // Молодёжные инновации: Сборник материалов семинара молодых учёных XXII Международной научной конференции, Ташкент, 18–21 апреля 2019 года. – Ташкент: Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, 2019. – С. 464-471. – EDN ACHULK.