

УДК 624.072.002.2

ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ И РАСЧЕТА КОНСТРУКЦИЙ ПРИ ИХ УСИЛЕНИИ ПОД НАГРУЗКОЙ

ОСОБЛИВОСТІ РОБОТИ І РОЗРАХУНКУ КОНСТРУКЦІЙ ПРИ ЇХ ПІДСИЛЕННІ ПІД НАВАНТАЖЕННЯМ

FEATURES OF WORK AND CALCULATION OF CONSTRUCTIONS AT THEIR STRENGTHENING ON-LOADING

Иванов Б.В., Голоднов А.И., д.т.н., проф. (Луганский национальный аграрный университет)

Иванов Б.В., Голоднов О.И., д.т.н., проф. (Луганський національний аграрний університет)

Ivanov B.V., Golodnov A.I., doctor of technical sciences, professor (Luhansk national agrarian university)

Приведены особенности работы и расчета сжатых стальных конструкций, которые усиливаются под нагрузкой с использованием сварки. Даны предложения по учету остаточных напряжений и деформаций

Наведено особливості роботи та розрахунку стислих сталевих конструкцій, які підсилюються під навантаженням з використанням зварювання. Наведено пропозиції щодо врахування залишкових напружень і деформацій

Features over of work and calculation of the compressed steel constructions which increase on-loading with the use of welding are brought. Given suggestion on the account of residual stresses and deformations

Ключевые слова:

Стальные сжатые элементы, остаточные напряжения и деформации, усиление
Сталеві стислі елементи, залишкові напруження і деформації, підсилення
Steel compressed elements, residual stresses and deformations, strengthening

Состояние вопроса и задачи исследования. При анализе работы усиленных под нагрузкой конструкций естественно проводить их сравнение с обычными конструкциями, до начала нагружения имеющими точно такую же конструктивную схему и те же сечения элементов [1]. Очевидно, что обычная

стержневая система может рассматриваться в расчетном отношении как частный случай усиленной под нагрузкой системы.

При традиционном подходе к расчету обычной статически неопределимой системы усилия в элементах определяются в предположении ее работы как упругой и линейно деформируемой. Затем, по найденным усилиям каждый элемент рассчитывают на прочность и устойчивость с учетом пластических деформаций. На простых примерах можно показать, что такой подход неприменим к усиленным под нагрузкой системам и что их необходимо в общем случае рассчитывать с учетом физической и геометрической нелинейности работы материала и конструкции в целом. Термин «геометрическая нелинейность» здесь и в дальнейшем будет употребляться лишь в смысле учета влияния деформаций системы на усилия в ее элементах, т.е. учета особенностей работы сжато-изогнутых элементов (при использовании в то же время для кривизны продольной оси элемента обычного приближенного выражения).

Следовательно, системы, расчетные схемы которых изменяются вместе с изменением нагрузок, не подчиняются обобщенному закону Гука и не являются линейно деформируемыми. При условии упругой работы до и после усиления такие конструкции иногда допустимо рассматривать как линейно деформируемые лишь на каждом отдельном этапе нагружения между моментами введения или удаления дополнительных связей и определять усилия в их элементах простым суммированием результатов, полученных на отдельных этапах расчета. Однако для ряда систем подобный подход даже в упругой стадии работы неприменим. К таким системам относятся, например, сжато-изогнутые стержни.

В силу нелинейности работы сжато-изогнутых стержней деформации системы, полученные на предыдущем этапе, могут оказать существенное влияние на распределение усилий в ее элементах и, следовательно, расчет по недеформированной схеме становится недопустимым. Простейшей иллюстрацией может служить отдельный сжато-изогнутый стержень, расчетная схема которого изменяется под нагрузкой. Допустим, что в результате усиления к стержню в его деформированном состоянии присоединена дополнительная связь, изменяющая условия закрепления стержня, и нагрузка после усиления возросла вдвое. Очевидно, что определение усилий в сечениях и реакций в связях суммированием результатов расчета по разным схемам приведет к неверным результатам и что при расчете усиленного стержня должны быть учтены его начальные изгибные деформации [1].

В ряде случаев при статическом расчете необходимо учитывать не только общие деформации, полученные элементами системы к моменту усиления, но и особенности распределения напряжений и деформаций в сечениях. Например, центрально-сжатый стержень, несимметрично усиленный под

нагрузкой N_0 путем увеличения сечения, после усиления и дополнительного загрузения силой N_1 начнет работать в условиях внецентренного сжатия. Любой стержень, усиленный под нагрузкой путем увеличения его сечения, становится «внутренне» статически неопределимым, и нахождение усилий, перемещений и напряжений в сечениях невозможно без учета особенностей его деформирования [1].

Эффективность усиления конструкций и их элементов под нагрузкой значительно повышается, когда используется упругопластическая стадия работы материала. Упруго работающие элементы усиления сдерживают развитие пластических деформаций в основных элементах исходной системы, что вызывает перераспределение усилий в системе в целом и в усиленных элементах. Пластические деформации в усиленных под нагрузкой конструкциях могут появляться при нагрузках, весьма далеких от предельных, и сопровождать работу усиленной конструкции в значительном диапазоне нагружения. Это и определяет рациональность использования упругопластической стадии работы усиленных конструкций.

При заданных диаграммах работы материалов можно проследить процесс развития пластических деформаций в усиленном стержне и построить диаграмму его работы. Для усиленных под нагрузкой стержней характерны повышенная деформативность, снижение предела упругой работы и упругопластическая работа в значительном диапазоне нагрузок. Эти особенности работы носят общий характер и равным образом справедливы для сжатых, изгибаемых, сжато-изогнутых и иных стержней, усиленных под нагрузкой. В тех случаях, когда предельное состояние элементов определяется условиями статической прочности (изгибаемые и растянутые элементы, сжатые элементы весьма малой гибкости), развитие пластических деформаций сглаживает неравномерности распределения напряжений в сечениях, и начальная нагрузка не сказывается на несущей способности усиленных элементов. Однако раннее развитие пластических деформаций приводит к снижению приведенного модуля упругости, уменьшению размеров упругого ядра и, следовательно, должно существенно сказываться на устойчивости усиленных стержней.

В действующем нормативном документе Украины ДБН В.2.6-163:2010 [2] не приведены методики учета остаточного напряженного состояния при расчетах стальных конструкций.

Основная часть. Процесс усиления также может оказать существенное влияние на работу усиленных стержней. Например, при усилении стержня, имеющего остаточный прогиб f_{res} , элементы усиления для обеспечения их прилегания должны быть предварительно прижаты к изогнутому стержню с помощью струбцин и т.п. [1]. Внутренне уравновешенная система сил, создаваемая стяжными устройствами, приведет к изгибу элементов усиления

и обратному выгибу основного стержня. В результате кривизна их в любом сечении совпадает и прогиб стержня будет характеризоваться новой величиной $f_1 \leq f_{res}$. После присоединения элементов усиления с помощью болтов, сварки и т.п. стяжные устройства снимают. Возникающий при усилении обратный выгиб является существенным разгружающим фактором и должен учитываться при расчетах.

Присоединение элементов усиления с помощью сварки зачастую является наиболее технологически приемлемым способом усиления. Наплавка сварных швов приводит к возникновению остаточных сварочных напряжений и деформаций. Неравномерность деформаций отдельных волокон, вызванная наличием мощного точечного источника тепла, приводит к дополнительному выгибу элементов в результате сварки. Действующие нормативные документы не учитывают влияние остаточных сварочных напряжений и деформаций, а сварочные прогибы предлагают устранять технологическими мерами (например, закреплением элементов при сварке или путем правки). Однако при усилении не демонтированных или не разгруженных конструкций эти меры практически неосуществимы.

Таким образом, даже при усилении конструкций без нагрузки иногда необходим учет сварочных деформаций. Однако особенно существенно их влияние при усилении элементов под нагрузкой. Появление зон термопластичности при сварке связано с выключением части сечения из работы, что может в отдельных случаях привести к потере несущей способности элемента в процессе усиления. Начальная нагрузка вызывает возрастание сварочных деформаций как из-за остаточных напряжений в зоне швов [3], так и вследствие появления дополнительных моментов при изгибе стержня. Все это обуславливает необходимость учета сварочных напряжений и деформаций при оценке несущей способности и деформативности системы и ее элементов как в процессе усиления, так и при работе после усиления. В обычных конструкциях пластические деформации появляются лишь в состояниях, весьма близких к предельным. Если уровень нагрузок не превышает характеристический, то конструкции работают упруго, что и определяет допустимость применения в большинстве случаев традиционных методов расчета. Для усиленных под нагрузкой конструкций ввиду особенностей традиционные методы расчета в общем случае являются принципиально не применимыми. Расчет таких конструкций желательно выполнять как единых физически и геометрически нелинейных систем, прослеживая историю их нагружения и усиления, т.е. с учетом накапливаемых на каждом этапе работы напряжений, деформаций и перемещений элементов системы.

Решение задачи возможно в условно-приближенном и условно-точном вариантах. При условно-приближенном решении форма изогнутой оси

принимается в виде полуволны синусоиды. Влияние закрепления концов учитывается коэффициентом приведения длины [3].

С учетом принятой предпосылки о синусоидальной форме изогнутой оси элемента не представляет затруднений определение выгиба и величины критической нагрузки. Прогиб элемента в направлении осей X или Y (соответственно f_x или f_y) можно определить по формуле:

$$f = \frac{(L^2 \cdot \kappa)}{\pi^2}, \quad (1)$$

где f – выгиб элемента в направлении осей X или Y (соответственно f_x или f_y); L , κ – приведенная длина и кривизна элемента соответственно в направлении осей X (L_x , κ_x) или Y (L_y , κ_y).

Общий прогиб элемента можно определить по формуле:

$$f_{red} = \sqrt{f_x^2 + f_y^2}. \quad (2)$$

Общий алгоритм решения задачи определения несущей способности элемента, деформирующегося в плоскости большей или меньшей жесткости, может быть представлен в следующем виде.

1. Задаются: геометрическими параметрами элемента, технологическими параметрами (катет шва, наличие наплавки валика или прогрева кромок, начального выгиба), прочностными и деформативными характеристиками материалов, условиями на концах и эксцентриситетом нагрузки.

2. Вычисляют распределение остаточных напряжений в сечениях двуглавых элементов по известным предложениям, например, [3]. Для других поперечных сечений (например, в виде квадратной или прямоугольной трубы или коробчатого профиля) можно воспользоваться предложениями, изложенными в работе [4].

3. Задаются радиусом кривизны сечения ρ_j , где j -номер этапа расчета. Находят величину кривизны по формуле:

$$\kappa_j = \frac{1}{\rho_j}. \quad (3)$$

4. При условно-приближенном решении принимают кривизну второго расчетного сечения κ_j и находят прогиб по формуле (1). При условно-точном решении выполняют вычисления по методике, приведенной в монографии [3].

Условия на концах элемента при условно-приближенном решении учитываются коэффициентом приведения длины.

5. Зная кривизну расчетного сечения и прогиб элемента, находят величину действующего продольного усилия, используя известные уравнения равновесия внутренних и внешних сил в сечении: $\sum X = 0$ и $\sum M_0 = 0$.

6. Последовательно уточняя параметры напряженно-деформированного состояния «второго расчетного сечения», а при условно-точном решении – кривизны всех сечений [3], кроме наиболее нагруженного, для которого $K_i = K_j$ (где i – номер сечения по длине стержня), получают опорную (j) точку зависимости " $P - f$ " («нагрузка–прогиб»).

7. Изменяют радиус кривизны наиболее нагруженного сечения $\rho_{j+1} = \rho_j - \Delta\rho$ ($\Delta\rho$ – шаг по радиусу кривизны) и по формуле (3) находят кривизну K_{j+1} .

8. Производят вычисления по пунктам 5...6 алгоритма и получают новое значение опорной ($j+1$)-й точки кривой " $P - f$ ".

9. Сравнивают значение нагрузки P на двух смежных этапах расчета:

- если $P_{j+1} - P_j > 0$, производят вычисления по п. 7;

- если $P_{j+1} - P_j < 0$, возвращаются на предыдущее значение радиуса кривизны ρ_j , изменяют $\Delta\rho = 0,5 \cdot \Delta\rho$ и продолжают вычисления по п. 7.

Расчет считается законченным после выполнения условия:

$$\left| \frac{P_{j+1} - P_j}{P_j} \right| < \eta, \quad (4)$$

где $\eta = 0,001 - 0,01$ – необходимая точность расчета.

Дальнейший расчет при увеличивающейся кривизне позволяет получить точки на ниспадающей (после потери устойчивости сжатого элемента) ветви кривой деформирования " $P - f$ ".

При изгибе элемента в двух плоскостях кривую деформирования " $P - f$ " строят с использованием формулы (2).

Полученные в ходе такого расчета данные позволяют получить зависимости «нагрузка–прогиб». Наличие зависимостей позволит выбрать «активную» плоскость деформирования, т.е. плоскость минимальной или максимальной жесткости, в которой наиболее вероятно будет происходить основное деформирование [4, 5].

Выводы.

1. Усиление стальных конструкций путем наращивания сечения с помощью сварки является основным способом усиления конструкций. При таком воздействии возникают остаточные напряжения и деформации,

которые могут привести к обратному эффекту, т.е. к обрушению конструкции во время усиления.

2. В действующем нормативном документе Украины по расчету стальных конструкций ДБН В.2.6-163:2010 [2] отсутствуют предложения по учету остаточного напряженного состояния при расчетах стальных конструкций. Частичному решению этой задачи и посвящена разработанная и изложенная в настоящей статье методика.

1. Ребров И.С. Усиление стержневых металлических конструкций: Проектирование и расчет. – Л.: Стройиздат, Ленингр. отделение, 1988. – 288 с. 2. ДБН В.2.6-163:2010. Державні будівельні норми України. Конструкції будівель і споруд. Сталеві конструкції. Норми проектування, виготовлення і монтажу / Мінрегіонбуд України. – К.: Мінрегіонбуд України, 2010. – 202 с. 3. Голоднов А.И. Регулирование остаточных напряжений в сварных двуглавых колоннах и балках. – К.: «Сталь», 2008. – 150 с. 4. Балашова О.С. К определению остаточного напряженного состояния в сварных элементах коробчатого профиля / О.С.Балашова, А.И.Голоднов // Современное промышленное и гражданское строительство. – 2010. – Т. 6. – №3. – С. 153-157. 5. Голоднов А.И. Расчет стержневых элементов при сжатии с эксцентриситетом в двух плоскостях / А.И.Голоднов, О.С.Балашова // Збірник наукових праць Українського науково-дослідного та проектного інституту сталевих конструкцій імені В.М. Шимановського. – К.: Вид-во «Сталь», 2009. – Вип. 3. – С. 232–244.