

*д.т.н. Голоднов А.И.,  
Балашова О.С.  
(ДонГТУ, г. Алчевск, Украина)*

## **НЕСУЩАЯ СПОСОБНОСТЬ СЖАТЫХ СВАРНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПРИ НАЛИЧИИ ОСТАТОЧНОГО НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ**

*Розроблена інженерна методика визначення несучої здатності стислих зварних елементів з урахуванням впливу не пружних властивостей сталі та залишкового напруженого стану. Розглядається деформований стан конструкцій. За даними проведеного математичного експерименту отримані рівняння, які дозволяють визначити коефіцієнт подовжнього вигину в залежності від розрахункового опору сталі, гнучкості та ексцентриситету прикладання навантаження. Значення залишкових напружень в перетинах елементів визначаються за відомими методиками.*

**Ключові слова:** *залишкові напруження, стиснуті сталеві елементи, несуча здатність*

*Разработана инженерная методика определения несущей способности сжатых сварных элементов с учетом влияния неупругих свойств стали и остаточного напряженного состояния. Рассматривается деформированное состояние конструкций. По данным проведенного математического эксперимента получены уравнения, позволяющие определить коэффициент продольного изгиба в зависимости от расчетного сопротивления стали, гибкости и эксцентриситета приложения нагрузки. Значения остаточных напряжений в сечениях элементов определяются по известным методикам.*

**Ключевые слова:** *остаточные напряжения, сжатые стальные элементы, несущая способность*

**Анализ исследований и публикаций.** Как известно, технологические процессы изготовления стальных конструкций сопровождаются локальным термическим разогревом (сварка, резание с применением высокотемпературного нагревания, нагрев и т.п.) и вызывают появление остаточного напряженного состояния (ОНС). Остаточные напряжения (ОН) не связаны с действием внешних сил,

являются внутренними напряжениями первого рода, которые уравниваются в объеме элемента и вызывают его деформацию [1].

Остаточные сжимающие напряжения (ОСН), сосредоточенные по кромкам поясов двутавровых элементов, приводят к раннему образованию пластических зон в этих частях сечения и, вследствие удаленности их от осей симметрии, снижению несущей способности. Экспериментально подтверждено снижение несущей способности сжатых двутавровых элементов до 37%. Неблагоприятное влияние ОН определяет разграничение коэффициентов продольного изгиба для расчета сжатых элементов одного профиля. Различие в величинах коэффициентов продольного изгиба для стальных конструкций двутаврового и Н-образного сечения без ОН и с ОСН на кромках поясов свыше 49 МПа может достигать 15...17 % (см. ДБН В.2.3-14:2006 [2]). В нормах проектирования стальных конструкций (СНиП II-23-81\* [3]) методика определения коэффициента продольного изгиба не учитывает наличие ОНС. ОН возникают и при предварительном напряжении, которое применяется в различных конструкциях для улучшения их свойств: расширения области упругой работы материала, перераспределения усилий, уменьшения деформативности, повышения устойчивости. Предварительное напряжение осуществляется на стадии изготовления, монтажа или в процессе эксплуатации [1, 4-7].

**Постановка задачи.** Основной задачей является разработка инженерной, ориентированной на действующие нормы, методики расчета сжатых сварных элементов с учетом неупругих свойств стали и наличия ОНС.

**Цель работы** – усовершенствование методики расчета сжатых сварных элементов с учетом влияния остаточного напряженного состояния (ОНС).

**Изложение материала и его результаты.** Математический эксперимент был выполнен для получения зависимостей для коэффициента продольного изгиба. При этом были учтены результаты ранее выполненных расчетов [1]. В процессе проведения математического эксперимента были выполнены расчеты сжатых элементов различных гибкостей ( $20 \leq \lambda \leq 120$ ) с различным эксцентриситетом приложения нагрузки ( $0,272 \leq m \leq 2,72$ ). Расчетные сопротивления сталей изменялись в пределах от 205 МПа до 410 МПа. Начальный эксцентриситет приложения нагрузки принят равным 1 см. Его величина была обусловлена монтажным допуском в соответствии с [6]. Вид ОНС принимался как с ОСН на кромках поясов, обусловленными сваркой поясных швов, так и ОРН на кромках поясов, обусловленными наплавкой холостых валиков или прогревом кромок.

Всего было просчитано более 500 моделей элементов. В результате анализа полученных данных было установлено следующее (с учетом данных [1]):

- влияние ОН на поведение элементов под нагрузкой для всего диапазона изменения прочностных свойств материала характеризуется похожими зависимостями: зоны ОРН, расположенные на кромках поясов, способствуют увеличению, а зоны ОРН в районе поясных швов способствуют снижению величин критических сил;

- наиболее существенные расхождения в величинах критических сил для сжатых сварных элементов с поясными сварными швами и без поясных швов наблюдаются в диапазоне величин гибкости от 60 до 80;

- для элементов с зонами ОРН на кромках поясов расхождения начинаются с величин гибкости, превышающих 40;

- влиянием ОНС на устойчивость элементов можно пренебречь при условии, когда прогиб элемента при критической нагрузке (величине несущей способности) не превышает 20% от величины начального эксцентриситета (это соответствует величине относительного эксцентриситета  $m$  примерно 2,5...2,7).

В процессе выполнения математического эксперимента были установлены следующие зависимости:

- формула для коэффициента продольного изгиба для такого состояния сжатого элемента, при котором в наиболее напряженном сечении, напряжения не превышают предела упругой работы стали (сечение работает упруго, развитие пластических напряжений отсутствует),  $\varphi_{el} = f_1(\bar{R}, m, \bar{\lambda})$ ;

- формула для коэффициента, учитывающего развитие пластических деформаций в наиболее напряженном сечении,  $\gamma_{pl} = f_2(\bar{R}, m, \bar{\lambda})$ ;

- формула для коэффициента, учитывающего увеличение прогиба при развитии пластических деформаций,  $\gamma_{ben} = f_3(\bar{R}, m, \bar{\lambda})$ .

В приведенных выше функциях приняты следующие обозначения:  $\bar{R} = R_y / 410$  – относительное расчетное сопротивление стали (пределы изменения  $205 \leq R_y \leq 410$ );  $m = e \cdot A / W_c$  – относительный эксцентриситет ( $e$  – эксцентриситет;  $A$  – площадь сечения;  $W_c$  – момент сопротивления сечения для наиболее сжатого волокна);  $\bar{\lambda} = \lambda / 100$  – относительная гибкость сжатого элемента (пределы изменения гибкости  $20 \leq \lambda \leq 120$ ).

Такой подход был принят по следующим соображениям. Известно, что коэффициент продольного изгиба зависит от гибкости,

которая, в свою очередь, зависит от приведенной длины элемента и радиуса инерции сечения. При условии упругой работы материала можно считать, что для различных сечений, но с одинаковыми параметрами  $(\bar{R}, m, \bar{\lambda})$ , величина коэффициента продольного изгиба будет одинакова.

В результате последовательной аппроксимации полученных данных методом наименьших квадратов были получены формулы для определения коэффициента продольного изгиба для такого состояния сжатого элемента, при котором в наиболее напряженном сечении напряжения не превышают предела упругой работы стали, формулы для коэффициента, учитывающего развитие пластических деформаций, и формулы для коэффициента, учитывающего увеличение прогиба.

Формула для коэффициента продольного изгиба для такого состояния сжатого элемента, при котором в наиболее напряженном сечении напряжения не превышают предела упругой работы стали, имеет вид:

$$\varphi_{el} = f_1(\bar{R}, m, \bar{\lambda}) = b_1 \cdot \bar{R}_y + c_1. \quad (1)$$

В этой формуле:

$$b_1 = (0,0109 \cdot \bar{\lambda}^2 - 0,0896 \cdot \bar{\lambda} + 0,0232) \cdot m^2 + (-0,0608 \cdot \bar{\lambda}^2 + 0,436 \cdot \bar{\lambda} - 0,108) \cdot m + (0,0952 \cdot \bar{\lambda}^2 - 0,639 \cdot \bar{\lambda} + 0,146); \quad (2)$$

$$c_1 = (-0,069 \cdot \bar{\lambda}^2 + 0,0967 \cdot \bar{\lambda} + 0,0635) \cdot m^2 + (0,308 \cdot \bar{\lambda}^2 - 0,409 \cdot \bar{\lambda} - 0,364) \cdot m + (-0,378 \cdot \bar{\lambda}^2 + 0,456 \cdot \bar{\lambda} + 0,785). \quad (3)$$

Коэффициент, учитывающий развитие пластических деформаций, зависит, в первую очередь, от формы поперечного сечения. Для элементов двутаврового и коробчатого сечений, деформирующихся в плоскости меньшей жесткости, формула для коэффициента  $\gamma_{pl}$  имеет вид:

$$\gamma_{pl} = f_2(\bar{R}, m, \bar{\lambda}) = b_2 \cdot \bar{R}_y + c_2. \quad (4)$$

В этой формуле:

$$b_2 = (-0,320 \cdot \bar{\lambda}^2 + 0,456 \cdot \bar{\lambda} - 0,07) \cdot m^2 + (1,138 \cdot \bar{\lambda}^2 - 1,672 \cdot \bar{\lambda} + 0,248) \cdot m + (-0,196 \cdot \bar{\lambda}^2 + 0,288 \cdot \bar{\lambda} - 0,039); \quad (5)$$

$$c_2 = (0,153 \cdot \bar{\lambda}^2 - 0,105 \cdot \bar{\lambda} - 0,102) \cdot m^2 + (-0,464 \cdot \bar{\lambda}^2 + 0,207 \cdot \bar{\lambda} + 0,558) \cdot m + (0,126 \cdot \bar{\lambda}^2 - 0,227 \cdot \bar{\lambda} + 1,062). \quad (6)$$

Для другой формы поперечного сечения формулы (5)-(6) будут иметь другой вид.

Как и коэффициент, учитывающий развитие пластических деформаций, коэффициент, учитывающий увеличение прогиба, зависит от формы поперечного сечения. Для элементов двутаврового и коробчатого сечений, деформирующихся в плоскости меньшей жесткости, формула для коэффициента  $\gamma_{ben}$  имеет вид:

$$\gamma_{ben} = f_3(\bar{R}, m, \bar{\lambda}) = a_3 \cdot m^2 + b_3 \cdot m + c_3. \quad (7)$$

В этой формуле:

$$a_3 = (-0,496 \cdot \bar{R}^2 + 4,534 \cdot \bar{R} - 1,181) \cdot \bar{\lambda}^2 + (1,018 \cdot \bar{R}^2 - 4,179 \cdot \bar{R} + 0,924) \cdot \bar{\lambda} + (-0,0354 \cdot \bar{R}^2 + 0,509 \cdot \bar{R} - 0,053); \quad (8)$$

$$b_3 = (2,498 \cdot \bar{R}^2 - 19,07 \cdot \bar{R} + 5,385) \cdot \bar{\lambda}^2 + (-5,263 \cdot \bar{R}^2 + 18,696 \cdot \bar{R} - 5,150) \cdot \bar{\lambda} + (0,645 \cdot \bar{R}^2 - 2,968 \cdot \bar{R} + 0,7); \quad (9)$$

$$c_3 = (-1,583 \cdot \bar{R}^2 + 17,467 \cdot \bar{R} - 5,312) \cdot \bar{\lambda}^2 + (4,191 \cdot \bar{R}^2 - 16,312 \cdot \bar{R} + 6,003) \cdot \bar{\lambda} + (-0,623 \cdot \bar{R}^2 + 3,047 \cdot \bar{R} - 0,0089). \quad (10)$$

Формулы (8)-(10) для другой формы поперечного сечения будут иметь другой вид.

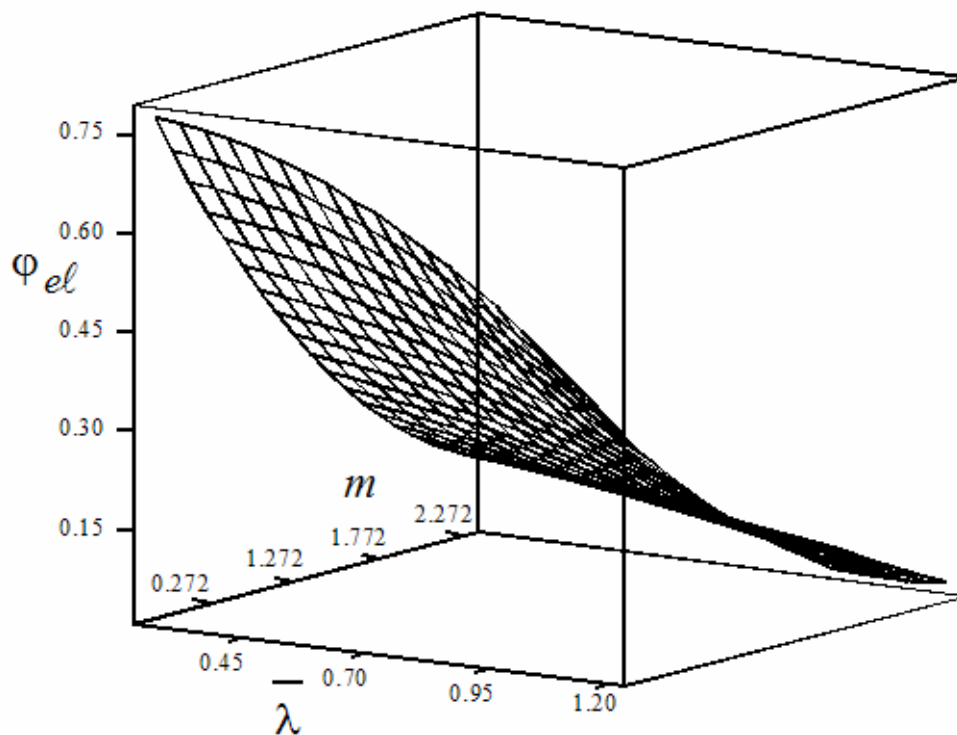
Зависимости для установленного интервала варьируемых функций при относительных расчетных сопротивлениях стали равных 0,5, 0,75 и 1, полученные по формулам (1), (4) и (7), приведены на рисунках 1, 2, 3.

В общем виде формулу для вычисления коэффициента продольного изгиба для интервала величин гибкости  $20 \leq \lambda \leq 120$ , расчетных сопротивлений стали  $205 \leq R_y \leq 410$  МПа и относительных

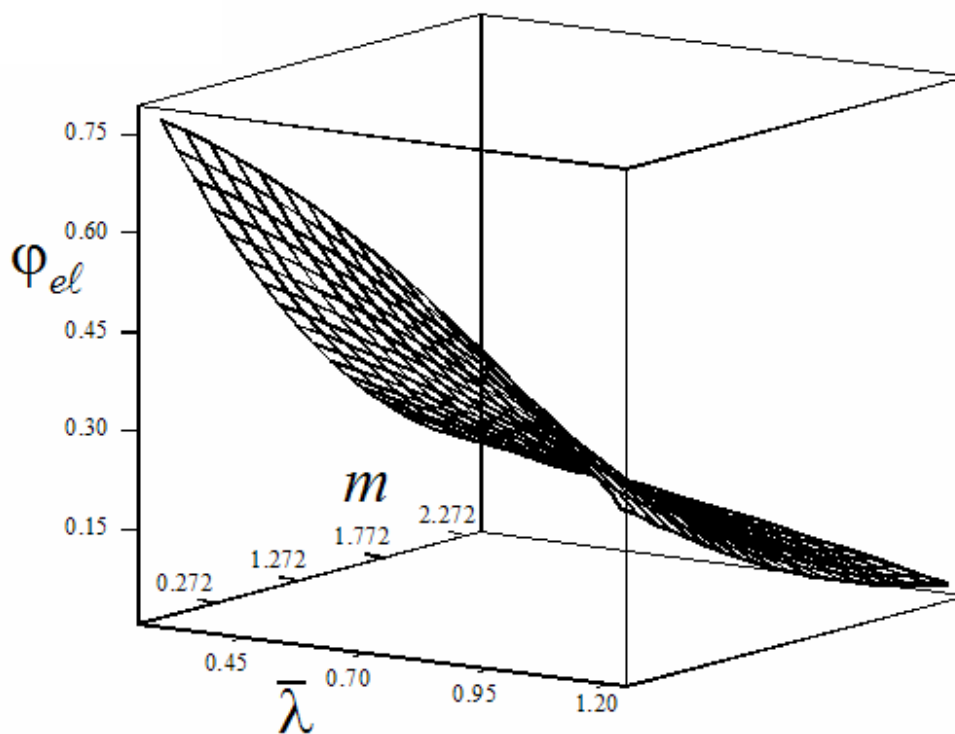
эксцентриситетов  $0,272 \leq m \leq 2,7$  можно записать в виде:

$$\Phi_{e,t} = \Phi_{el} \cdot \gamma_{pl} \quad (11)$$

$\bar{R} = 0.5$



$\bar{R} = 0.75$



$\bar{R} = 1$

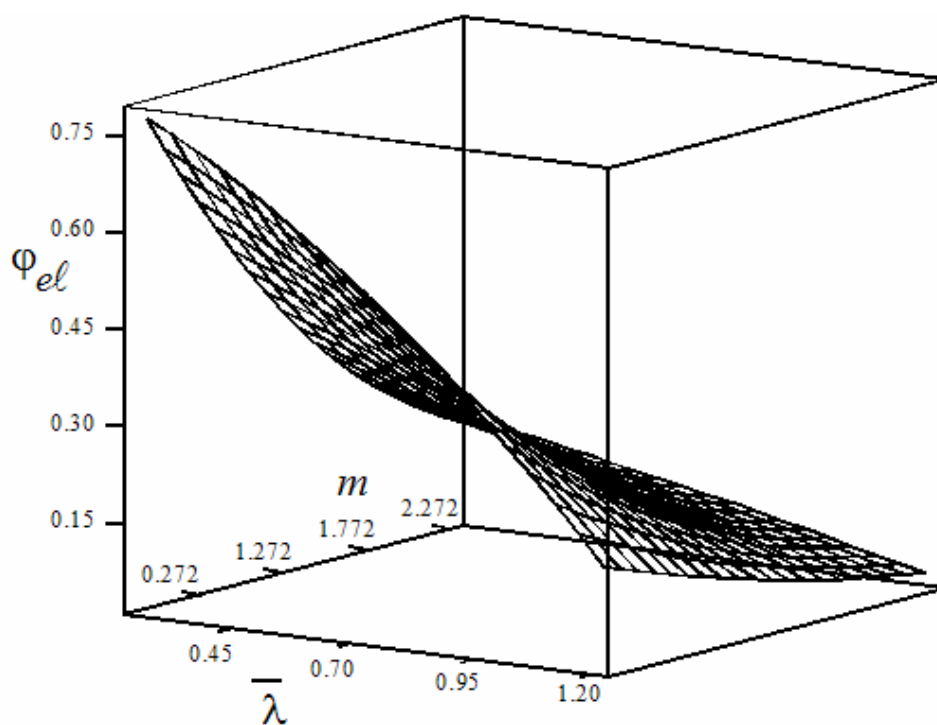
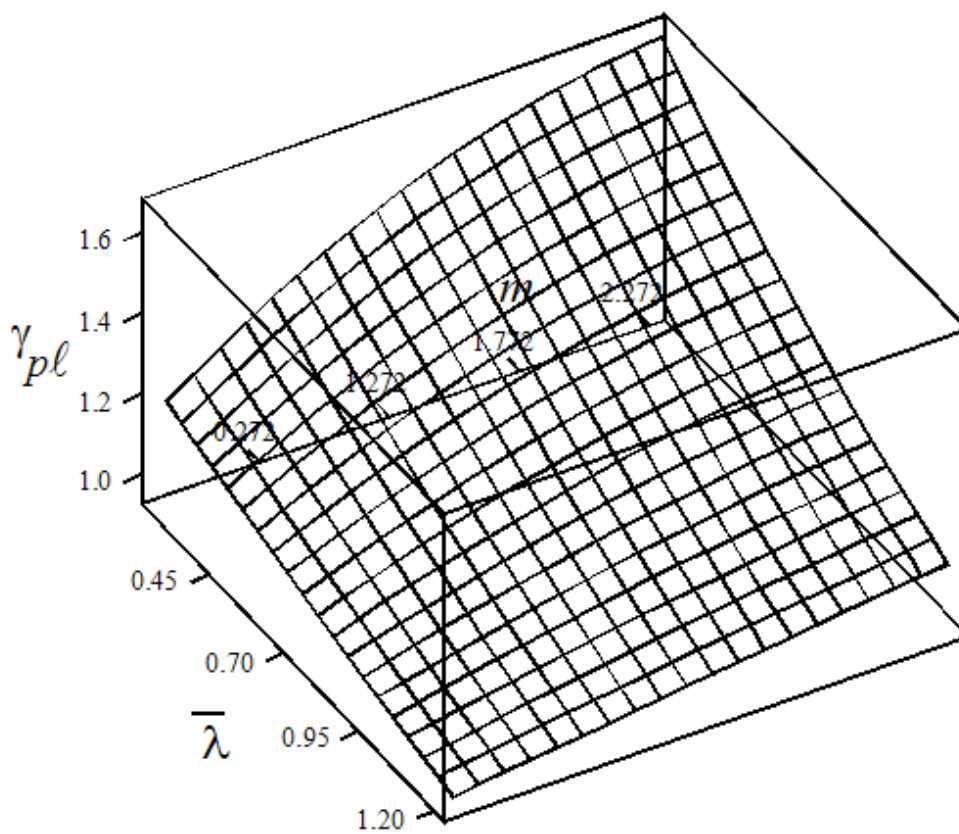
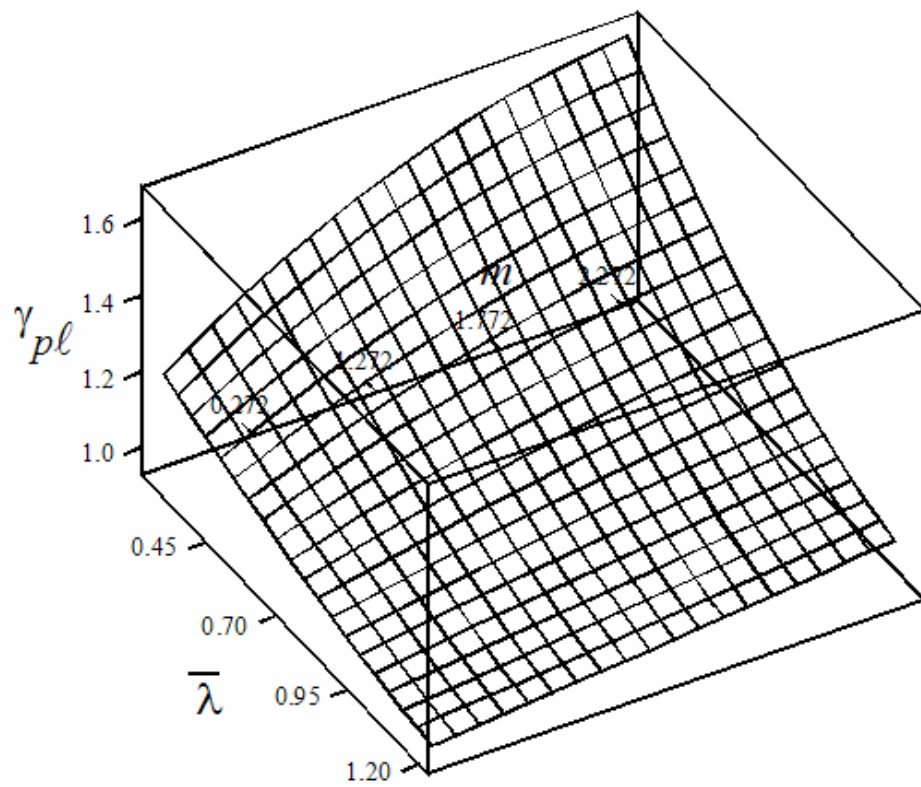


Рисунок 1 - Зависимости  $\varphi_{el} = f_1(\bar{R}, m, \bar{\lambda})$  для установленного интервала варьируемых функций

$\bar{R} = 0.5$



$\bar{R} = 0.75$



$\bar{R} = 1$

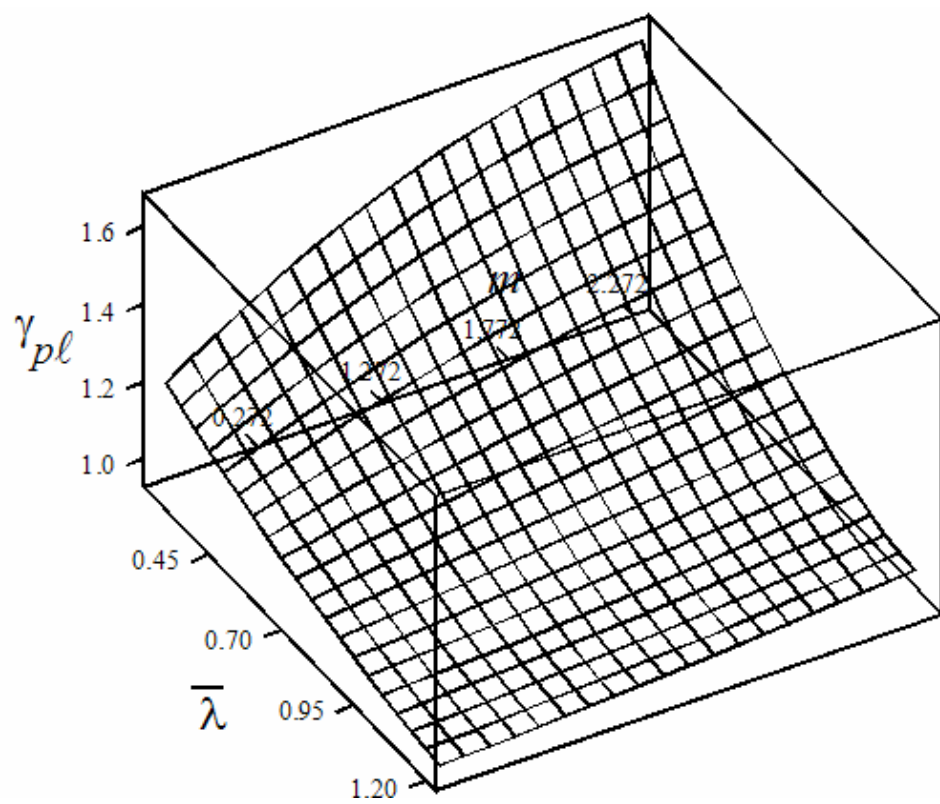
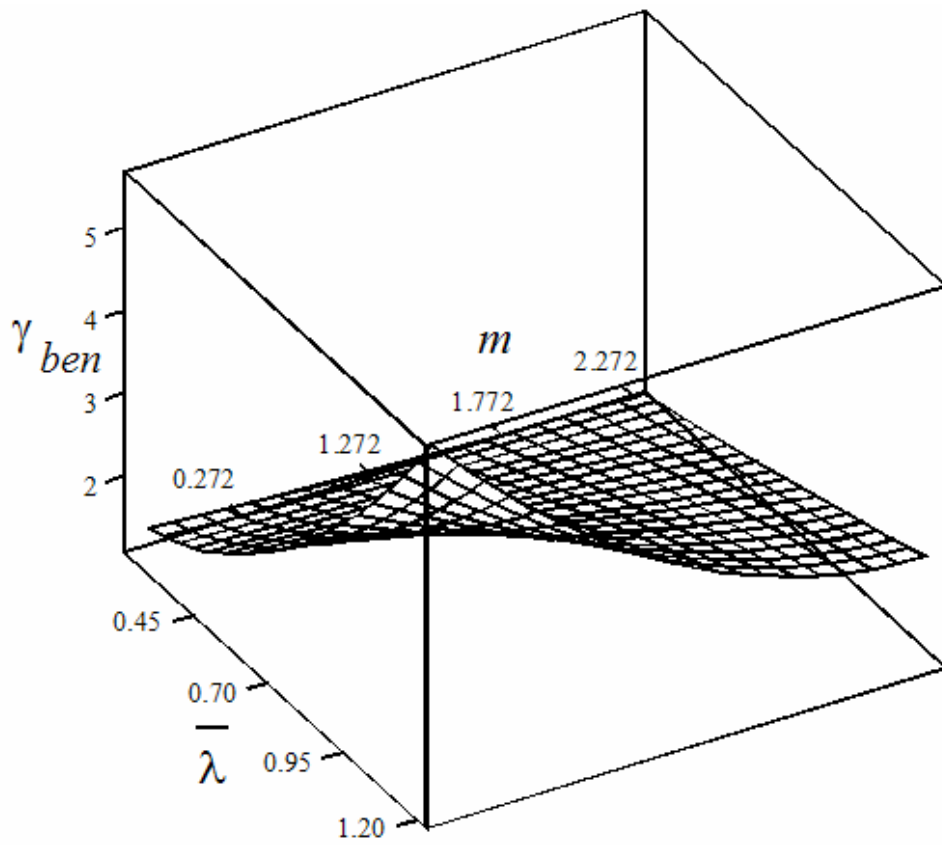


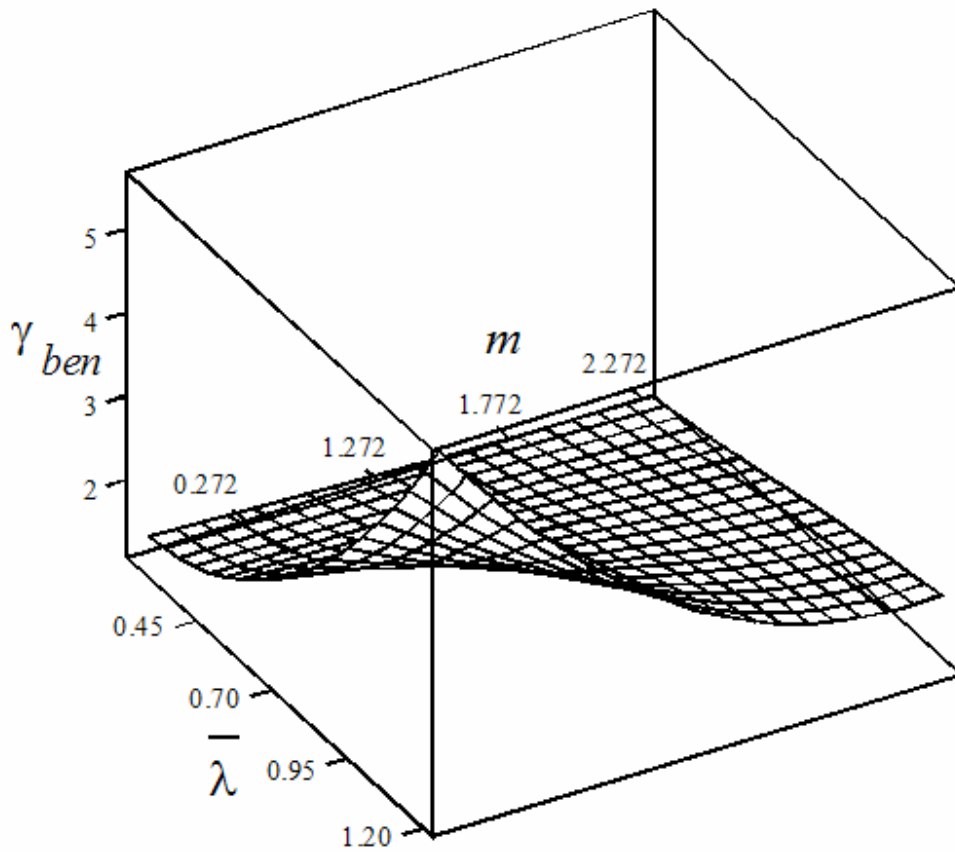
Рисунок 2 - Зависимости  $\gamma_{pl} = f_2(\bar{R}, m, \bar{\lambda})$  для установленного интервала варьируемых функций



$$\bar{R} = 0.5$$



$$\bar{R} = 0.75$$



$$\bar{R} = 1$$

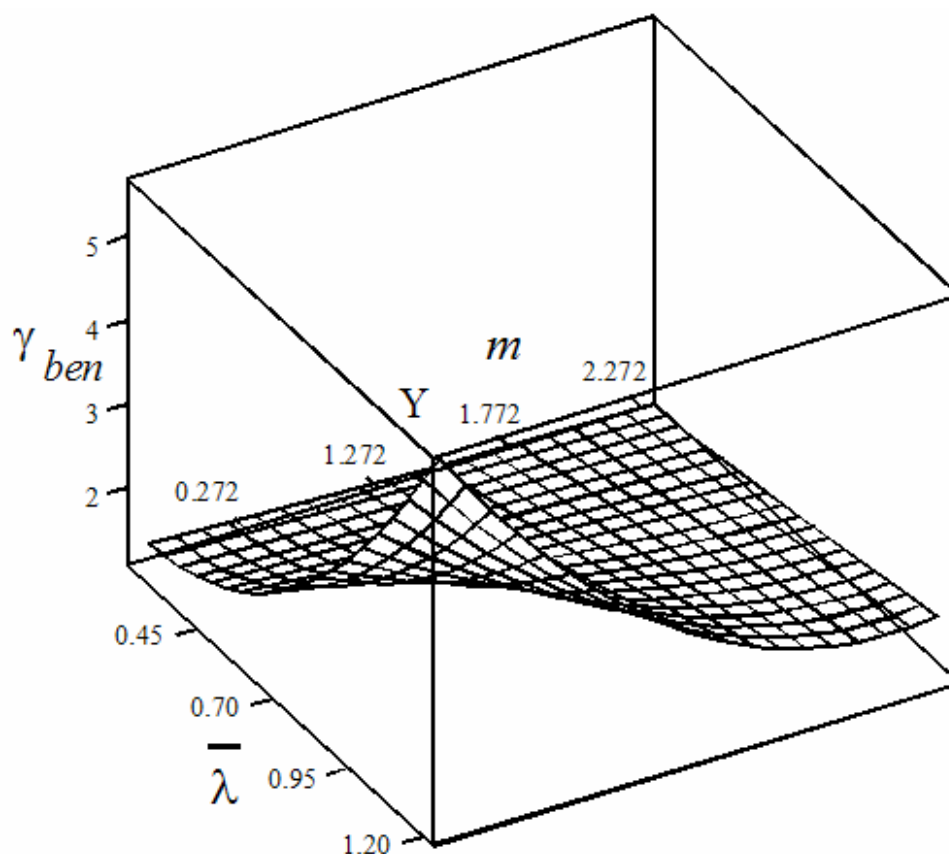


Рисунок 3 - Зависимости  $\gamma_{ben} = f_3(\bar{R}, m, \bar{\lambda})$  для установленного интервала варьируемых функций

Аппроксимирующие функции были подвергнуты последующей статистической обработке с целью определения математического ожидания  $K_{el} = \varphi_{el} / \varphi_{el,exp}$ ,  $K_{pl} = \gamma_{pl} / \gamma_{pl,exp}$ ,  $K_{ben} = \gamma_{ben} / \gamma_{ben,exp}$  и среднеквадратического отклонения (здесь  $\varphi_{el}, \gamma_{pl}, \gamma_{ben}$  – величины коэффициентов, полученные соответственно по формулам (1), (4), (7);  $\varphi_{el,exp}, \gamma_{pl,exp}, \gamma_{ben,exp}$  – соответствующие величины коэффициентов, полученные в ходе проведения математического эксперимента).

В ходе выполненных расчетов (обработке подверглась выборка из 216 значений)  $\varphi_{el}$  и  $\varphi_{el,exp}$  математическое ожидание коэффициента  $K_{el} = 1,0002$ , а его среднеквадратическое отклонение  $\sigma = 0,0351$ . Математическое ожидание коэффициента  $K_{pl} = 0,9972$  для выборки из 216 значений  $\gamma_{pl}$  и  $\gamma_{pl,exp}$ , а его среднеквадратическое отклонение  $\sigma = 0,0102$ . Математическое ожидание коэффициента  $K_{ben} = 1,005$  для

выборки из 216 значений  $\gamma_{ben}$  и  $\gamma_{ben,exp}$ , а его среднеквадратическое отклонение  $\sigma=0,0765$ . Полученные данные статистической обработки свидетельствуют о достаточно высокой точности полученных аппроксимирующих функций.

Затем были подвергнуты последовательной обработке данные о величинах несущей способности для элементов с ОНС различных видов, что позволило получить выражение для коэффициента условий работы:

$$\beta_{f,rs} = \sqrt{1 + \frac{\sigma_{str}^{(f)'}(\sigma_{com}^{(f)}, \sigma_{res,str}^{(f)})}{R_y^f}} \cdot \beta_\lambda \cdot \beta_m, \quad (12)$$

где  $\sigma_{str}^{(f)'}$  – замененные прямоугольные ОРН (ОСН) на краях поясов (ОРН принимаются со знаком «плюс», ОСН – со знаком «минус»);  $\sigma_{res,str}^{(f)}$  – растягивающие напряжения в поясах при предварительном напряжении вытяжкой поясов способом упреждающего разогрева;  $\beta_\lambda$  – коэффициент, учитывающий влияние гибкости;  $\beta_m$  – коэффициент, учитывающий влияние эксцентриситета приложения нагрузки.

Коэффициенты  $\beta_m$  и  $\beta_\lambda$  можно определить по следующим формулам:

$$\beta_m = 1,08 - 0,318 \cdot m - 0,0299 \cdot m^2. \quad (13)$$

$$\beta_\lambda = -5,126 \cdot \bar{\lambda}^2 + 7,1765 \cdot \bar{\lambda} - 1,185. \quad (14)$$

Тогда несущая способность сжатого элемента с учетом влияния ОНС определяется по формуле:

$$N = \gamma_c \cdot \beta_{f,rs} \cdot \varphi_{e,t} \cdot R_y^f \cdot A. \quad (15)$$

Таким образом, предложенная методика учета ОНС, возникающего в сварных элементах, при расчетах на устойчивость позволяет использовать рекомендуемые действующими нормами [3] подходы, дополняя их в части учета влияния ОНС. Для элементов без ОНС вычисленные коэффициенты продольного изгиба близки к тем, что приведены в таблице 72 [3].

## Выводы

На основе проведенных исследований можно сделать выводы.

1. Остаточные напряжения неизбежно возникают в элементах стальных конструкций в процессе изготовления вследствие применения технологических операций, связанных с локальным разогревом.

2. Обычно влияние неупругих свойств стали и ОНС на несущую способность сжатых элементов производится путем увеличения или

уменьшения коэффициента продольного изгиба  $\varphi(\varphi_e)$ . Такой способ требует применения формул для определения степени влияния ОНС на величину коэффициента  $\varphi(\varphi_e)$ , основанных, как правило, на данных экспериментальных исследований.

3. Предложена инженерная методика учета влияния неупругих свойств стали и ОНС путем увеличения или уменьшения расчетного сопротивления стали с помощью соответствующих коэффициентов. Методика позволяет путем несложных расчетов оценить степень влияния ОНС на несущую способность сжатых элементов с достаточной для практических целей точностью.

### **Библиографический список**

1. Голоднов А.И. *Регулирование остаточных напряжений в сварных двутавровых колоннах и балках* / Голоднов А.И.. – К.: Сталь, 2008. – 150 с.

2. ДБН В.2.3-14:2006. *Споруди транспорту. Мости та труби. Правила проектування* / Мінбуд України. – К.: Мінбуд України, 2006. – 359 с.

3. СНиП II-23-81\*. *Стальные конструкции* / Госстрой СССР. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1990. – 96 с.

4. А.с. 729327 СССР, МКИ E04 C 21/12. *Способ предварительного напряжения металлических колонн* / И.И. Набоков, Е.П. Лукьяненко, В.А. Нелидов, В.А. Муляев (СССР); опубл. 25.04.80, Бюл. № 14. – 2 с.

5. *Методические рекомендации по применению облегченных предварительно напряженных сварных двутавров для реконструкции промышленных предприятий* / [Набоков И.И., Голоднов А.И., Лукьяненко Е.П. и др.]. – К.: НИИСП Госстроя УССР, 1988. – 45 с.

6. СНиП 3.03.01-87. *Несущие и ограждающие конструкции* / Госстрой СССР. – М.: Стройиздат, 1989. – 192 с.

7. Балашова О.С. *К расчету сжатых сварных элементов различного сечения* / О.С. Балашова // *Сборник научных трудов Донбасского государственного технического университета*. - 2010. - Вып. 30. – С. 241–248.

*Рекомендована к печати д.т.н., проф. Должиковым П.Н.*