

## Устойчивость стержней и стержневых систем

### **ВЛИЯНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ВИДОВ НАГРУЖЕНИЙ И УСЛОВИЙ ЗАКРЕПЛЕНИЯ КОНЦОВ ИЗГИБАЕМОГО ДВУТАВРА НА МЕСТНУЮ ПОТЕРЮ УСТОЙЧИВОСТИ СЖАТОЙ ПОЛКИ**

А. А. СУКАЧ, аспирант

кафедра «Металлические конструкции», ФГБОУ ВПО «Московский государственный строительный университет» (ФГБОУ ВПО «МГСУ»),  
Ярославское шоссе, 26, Москва, Россия, 129337

*Выполнено исследование местной потери устойчивости изгибаемых прокатных двутавровых балок по ГОСТ 26020-83 при различных видах нагружения и закрепления концов. Проведен сравнительный анализ полученных решений. Показано, что складки местной потери устойчивости в изгибаемых элементах зависят лишь от уровня критического момента – момента образования складки и не зависят ни от условий закрепления, ни от вида приложенной нагрузки.*

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: местная потеря устойчивости, складка, двутавр,

Задача местной потери устойчивости, как в целом, так и для прокатных изгибаемых элементов считается хорошо изученной [1, 2] и подтвержденной экспериментальными исследованиями. Тем не менее, все источники [1 - 4] ссылаются на исследования Ильюшина А. А [5] и Тимошенко С. П. [6], которые изучали поведение металлических пластинок при различных видах нагружений и закреплений и таким образом обосновали местную потерю устойчивости. Эксперименты с выпучиванием пластинок были выполнены Кольбруннером [7, 8], лабораторией Ланглея [9], Джерардом [10], Шуманом и Бэком [6] и др., в которых не всегда теоретическое обоснование находило подтверждение экспериментально [2].

Местной потерей устойчивости является образование складок не ограниченных опорами, тогда как складку от одного края пластины до другого следует относить к общей потере устойчивости. Таким образом, явление местной потери устойчивости базируется на исследованиях в области общей потери устойчивости металлических пластинок.

*«В отличие от потери устойчивости стенки выпучивание поясного листа со свободными свесами быстро влечет за собой исчерпание работоспособности всей балки; поэтому превышение критического напряжения в поясах не может быть допущено» [3].*

Согласно положениям в [11, 12] и практике проектирования для предотвращения явления местной потери устойчивости выполняют проверку конструктивных требований для сварных балок (для прокатных балок эти требования считаются выполненными по умолчанию) и в случае необходимости устанавливают ребра жесткости, уменьшая пролет пластинки. Тем не менее, у прокатных двутавров образуются локальные складки, хотя свесы у них не выходят за нормативные ограничения.

Можно с уверенностью сказать, что конструктивные требования удовлетворяющие условию местной устойчивости сжатого пояса выполняются для всех прокатных двутавров в том числе и с учетом развития пластических деформация, кроме ограничения по величине ширины полки ( $1/5 < b_f/h < 1/3$  – выделены жирно). Это условие вытекает из положений, что при отношении ширины полки к высоте балки  $b_f/h < 1/5$  мала боковая жесткость балки, что ухудшает условия монтажа и общую устойчивость балки, а при  $b_f/h > 1/3$  будет существ-

венно проявляться неравномерность распределения напряжений по ширине пояса, концы которого будут выключены из работы, что вызывает много вопросов почему. При упругой работе наибольшее значение отношения свеса сжатого пояса к толщине следует принимать  $b_{ef}/t_f = 0,5\sqrt{E/R_y}$ . При учете развития пластических деформаций и при отношении расчетной высоты балки к толщине стенки  $h/t_w \leq 2,7\sqrt{E/R_y}$  наибольшее отношение  $b_{ef}/t_f = 0,3\sqrt{E/R_y}$  [11].

Устойчивость сжатых поясов следует считать обеспеченной гибкостью свеса  $\bar{\lambda}_f = (b_{ef}/t_f)\sqrt{R_{yf}/E} \leq \bar{\lambda}_{uf} = 0,5\sqrt{R_{yf}/\sigma_c}$  и также, если при  $2,2 \leq \bar{\lambda}_{inv} \leq 5,5$  выполняется условие  $\bar{\lambda}_f = (b_{ef}/t_f)\sqrt{R_{yf}/E} \leq \bar{\lambda}_{uf} = 0,17 + 0,06\bar{\lambda}_{inv}$  [12]. Данные условия выполняются для всех исследуемых двутавровых балок.

В табл. 1 приведен только «балочный» сортамент, хотя стоит отметить, что выводы по конструктивным требованиям выполняются и на широкополочные балки.

Согласно исследованиям [13, 14] явление местной потери устойчивости – это явление особого рода, когда теряется устойчивость (выпучивается) отдельной части элемента (например, небольшого участка сжатой полки изгибаемой балки), при этом устойчивости всей же сжатой полки сохраняется, т. е. можно назвать это явление как «местное выпучивание».

В данной работе исследуется несущая способность сжатых поясов однопролетных шарнирно опертых балок двутаврового сечения ГОСТ 26020-83 нагруженных сосредоточенной силой  $P$ , приложенной к стенке балки, в середине пролета  $L/2$  и распределенной силой  $q$ , также приложенной к стенке балки. При таком типе нагружения полки оказываются совершенно не нагруженными внешними силами. Постановка задачи, решение дифференциальных уравнений, математическая модель и составленный программный код для решения поставленной задачи приведены в работах [14, 15, 16].

В исследованиях [14, 16] приведен анализ напряженно-деформированного состояния такой балки. *«Результаты проведенного анализа говорят о том, что касательные напряжения следует считать первичными», в задачах местной потери устойчивости сжатых поясов, «определяемыми только перерезывающими силами, а продольные напряжения являются вторичными, они могут накапливать от концов к середине балки в соответствии с величинами касательных напряжений или длиной балки».*

Для решения такой задачи из сжатой полки вырезается полоса и рассматривается как балка (брус) на упругом основании с постоянным коэффициентом жесткости основания по длине балки [14, 15] (последний учитывает подкрепляющее влияние полки в работе пояса на местную устойчивость). В качестве нагрузки на полосу принимается погонное усилие, задаваемой в виде безразмерного величины:  $\tilde{q}_0$ , зависящее от безразмерной длины балки  $\tilde{s}$  [14, 15]. Задача решается численно при помощи языка программирования VBA (Visual Basic for Application) на 500 шагах интегрирования с шагом деформирования стержня  $\tilde{u}_x = -0,0000005$  согласно математической модели и составленным по ней процедурам [14, 15]. То есть решается задача устойчивости стержня на упругом основании, в которой стержень разделяется на много мелких элементов (шаги интегрирования) и для них определяются параметры напряженно деформированного состояния на каждом шаге деформирования стержня.

Некоторые полученные значения критических моментов для балок разных длин при разных нагружениях приведены в сравнительной табл. 1.

Анализируя полученные данные видно, что образование складки местной потери устойчивости, зависит от величины момента. Эти значение для каждого двутавра хоть и не совпали «один в один», но получились очень близкими друг другу (разница в значениях не превышает 10 %).

Табл. 1. Сравнение результатов несущей способности балок по ГОСТ 26020-83 по критерию местной потери устойчивости для различных видов нагружения и закрепления концов

про- филь	Значение критического момента $M_1$ для балки нагруженной сосредоточенной силой в середине пролета, кНм						Значение критического момента $M_2$ для балки нагруженной распределенной нагрузкой, кНм					
	1 метр	2 метра	3 метра	4 метра	6 метров	9 метров	1 метр	2 метра	3 метра	4 метра	6 метров	9 метров
23Б1	53.74	52.88	52.61	52.93	-	-	48.48	49.09	49.40	49.41	-	-
35Б2	134.94	136.35	131.99	135.95	142.10	-	126.53	125.51	125.84	125.17	129.45	-
50Б2	370.31	356.44	341.82	346.71	357.79	-	322.63	324.63	321.97	329.31	323.05	-
90Б1	1377.78	1406.52	1393.80	1409.98	1390.69	1457.02	1394.71	1335.75	1412.13	1288.43	1288.99	1377.50
100Б4	2580.95	2575.08	2646.13	2658.67	2607.02	2660.17	2427.27	2454.40	2436.78	2496.81	2415.91	2430.44
26Ш1	101.57	102.52	99.15	98.77	101.45	-	96.05	90.00	94.85	94.62	96.97	-
40Ш2	400.64	416.23	415.79	394.96	418.79	411.38	412.39	396.83	376.29	386.24	382.79	384.26
60Ш4	1177.57	1164.66	1221.31	1160.02	1210.85	1176.18	1153.93	1157.57	1130.38	1151.70	1144.65	1137.44

Также следует отметить, что решения для жестких концов заземления балки оказались аналогичными шарнирным, следовательно, при образовании складки местной потери устойчивости изгибаемых элементов важно только значение критического момента образования складки, а длины балок, способ закрепления и вид нагрузки на образование складки не влияют.

#### Л и т е р а т у р а

1. Стрелецкий Н. С. Работа сжатых стоек // М: Гос. изд. литературы по строительству и строительным материалам. 1959.
2. Фридрих Блейх. Устойчивость металлических конструкций // М: Гос. изд. физ.-мат. литературы. 1959.
3. Броуде В. М. Предельные состояния стальных балок // М.- Л.: ГИЗ литературы по строительству и архитектуре, 1953. – 214 с.
4. Броуде В. М. Устойчивость пластинок в элементах стальных конструкций // М.: Машстройиздат, 1949. – 240 с.
5. Ильюшин А. А. Пластичность. М: ОГИЗ. – 1948.
6. Тимошенко С. П. Устойчивость упругих систем. – М.: Гостехиздат, 1946.
7. Kollbrunner C. F. Das Ausbeulen des auf Druck beanspruchten freistehenden Winkels, Mittellungen 4, Institut für Baustatik, Eidgenossische Technische Hochschule, Zurich, 1935, and Das Ausbeulen der auf einseitigen, gleichmassig verteilten Druck beanspruchten Platten im elastischen und plastischen Bereich, Mittellungen 17, Institut für Baustatik, Eidgenossische Technische Hochschule, Zurich, 1946.
8. Kollbrunner C. F., Herrmann G. Stabilität der Platten im plastischen Bereich, Theorie von A., Ilyshin mit Vergleichswerten von durchgeführten Versuchen, Mittellungen 20, Institut für Baustatik Eidgenossische Technische Hochschule, Zurich, 1947.
9. Heimerl G.J. Determination of Plate Compressive Strength, NACA Tech. Note 1480, 1947.
10. Gerard G. Secant Modulus Method for Determining Plate Instability above the Proportional Limit. Jour. Aeronaut. Sci., 1946, Vol. 13, p. 38.
11. СНиП II-23-81\* (1990) Стальные конструкции/ Госстрой СССР. – М.: ЦИТП Госстрой СССР, 1991.

12. Свод правил, *СП 16.13330.2011*, Актуализированная редакция СНиП II-23-81\* // Минрегион России, 2011.
13. *Грудев И. Д., Плаксин Ю. В.* Объяснение и расчет образования складки в днище резервуара, используемого для хранения мазута на ТЭЦ // ПГС, 2010. – №5. – С. 23-24.
14. *Грудев И. Д.* Несущая способность сжатых элементов стержневых конструкций: монография// М-во образования и науки РФ, ФГБОУ ВПО «МГСУ». Москва: МГСУ, 2012. – 386 с. (Библиотека научных разработок и проектов НИУ МГСУ).
15. *Грудев И. Д.* Предельное состояние двутавра при изгибе // ПГС. – 2011. – №6.
16. *Грудев И. Д.* Анализ напряжений в балке двутаврового сечения в условиях поперечного изгиба// РААСН, Вестник Отделения Строительных Наук. – 2011. – №15.

#### References

1. *Streleckij, NS* (1959). *Rabota szhatyh stoek*. Moscow: Gos. izd. literatury po stroitel'stvu i stroit. materialam.
2. *Blejh Fridrih* (1959). *Ustojchivost' metallicheskih konstrukcij*. [H. Bleich. Buckling strength of metal structures]. Moscow: Gos. izd. fiz.-mat. literatury.
3. *Broude, VM* (1953). *Predel'nye sostojanija stal'nyh balok*. Moscow: GIZ Literatury po stroitel'stvu i arhitekture, 214 p.
4. *Broude, VM* (1949). *Ustojchivost' plastinok v elementah stal'nyh konstrukcij*. Moscow: Mashstrojizdat, 240 p.
5. *Il'jushin AA* (1948). *Plasticity*. Moscow: OGIZ.
6. *Timoshenko, SP* (1946). *Ustojchivost' uprugih sistem*. [Stability of elastic system] Moscow: Gostehizdat.
7. *Kollbrunner, CF* (1946). Das Ausbeulen des auf Druck beanspruchten freistehenden Winkels, Mittellungen 4, Institut für Baustatik, Eidgenössische Technische Hochschule, Zurich, 1935, and Das Ausbeulen der auf einseitigen, gleichmassig verteilten Druck beanspruchten Platten im elastischen und plastischen Bereich, Mittellungen 17, Institut für Baustatik, Eidgenössische Technische Hochschule, Zurich, 1946.
8. *Kollbrunner, CF, Herrmann, G* (1947). Stabilität der Platten im plastischen Bereich, Theorie von A., Ilyshin mit Vergleichswerten von durchgeführten Versuchen, Mittellungen 20, Institut für Baustatik Eidgenössische Technische Hochschule, Zurich.
9. *Heimerl, GJ* (1947). Determination of Plate Compressive Strength. NACA Tech. Note 1480.
10. *Gerard G* (1946). Secant Modulus Method for Determining Plate Instability above the Proportional Limit. *Jour. Aeronaut. Sci.*, Vol. 13, p. 38.
11. СНиП II-23-81\* (1991). Steel Structures/ Gosstroj SSSR. – M.: CИTP Gosstroja SSSR.
12. *Svod pravil, SP 16.13330.2011*, Aktualizirovannaja redakcija SNiP II-23-81\* // Minregion Rossii, 2011
13. *Grudev, ID, PlaksinJuV* (2010). Ob'jasnenie i raschet obrazovanija skladki v dnishhe rezervuare, ispol'zuemogo dlja hranenija mazuta na TJeC. *PGS*, №5, p. 23-24.
14. *Grudev, ID* (2012). *Nesushhaja sposobnost' szhatyh jelementov sterzhnevnyh konstrukcij: monografija*. M-vo obrazovanija i nauki RF, FGBOU VPO «MGSU». Moscow: MGSU, 386 p. (Библиотека научных разработок и проектов НИУ МГСУ).
15. *Grudev ID* (2011). Predel'noe sostojanie dvutavra pri izgibe. *PGS*, №6.
16. *Grudev, ID* (2011). Analiz naprjazhenij v balke dvutavrovogo sechenija v uslovijah poperechnogo izgiba. *RAASN, Vestnik Otdelenija Stroitel'nyh Nauk*, № 15.

#### EFFECT OF DIFFERENT TYPES OF EXTERNAL LOADS AND SECURING THE ENDS OF BEND I-BEAM ON THE LOCAL BUCKLING

Sukach A.A.

*Moscow State University of Civil Engineering ( «MGSU» )*

Research of local buckling of bending I-beams with the application of GOST 26020-83 for different types of external loads and securing the ends. A comparative analysis of the obtained solutions is presented. It is shown that local buckling creases in bent elements depend only on the level of the critical moment – the moment of formation of folds and do not depend on fixing conditions, not on the type of loads application, and do not depend on the method of application of the load (for example, the top or the bottom shelf).

KEY WORDS: local buckling, fold, I-beam, critical moment.