

ВЛИЯНИЕ ШИРИНЫ ПОЯСОВ И ОТГИБОВ В СЕЧЕНИЯХ С- и Z-ОБРАЗНЫХ СТАЛЬНЫХ ТОНКОСТЕННЫХ ХОЛОДНОГНУТЫХ ПРОФИЛЕЙ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ РАБОТЫ В УСЛОВИЯХ ИЗГИБА

А.А. Кикоть

ГОУ ВПО Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова

Показаны и проанализированы закономерности влияния ширины пояса и ширины отгиба С- и Z-образных профилей на эффективность работы в условиях поперечного изгиба при различных толщинах и прочностях стали.

Ключевые слова: С- и Z-образные холодногнутые профили, изгиб, эффективность

Одной из особенностей стальных тонкостенных холодногнутых профилей, вытекающей из способа их изготовления, является многообразие возможных комбинаций размеров поперечного сечения в рамках одной его формы. Очевидно, далеко не каждая вариация размеров будет одинаково эффективна для какой-либо определённой проектной ситуации, характеризующейся фиксированной комбинацией действующих в элементе усилий. Строго говоря, для каждого их соотношения будет своё оптимальное отношение размеров сечения. В данной работе рассматриваются элементы, выполненные из С- и Z-образных холодногнутых профилей, в том числе из оцинкованной стали, подверженные поперечному изгибу. Такие, например, как балки перекрытий (рисунок 1) или прогоны малоуклонных кровель. Считается, что изгибающий момент действует в вертикальной плоскости.

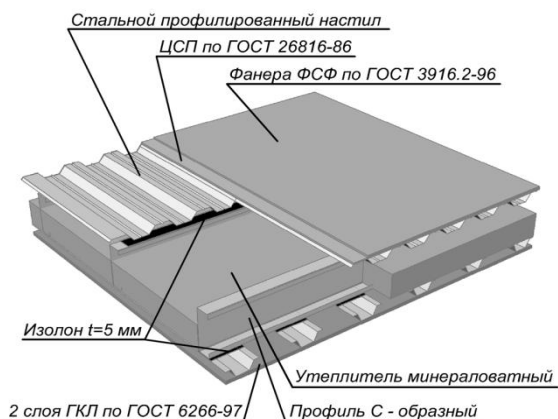


Рисунок 1. Конструкция междуэтажного перекрытия

В основном подобные конструктивные элементы зданий и сооружений решаются

таким образом, что на конструкции из холодногнутых профилей непосредственно опирается стальной профилированный настил с прикреплением как правило через гофру или в каждой гофре. Таким образом, обычно общая устойчивость балок и прогонов обеспечена конструктивно. Возникающие от стеснённого кручения нормальные напряжения во многом зависят от конкретных конструктивных решений элемента и в дальнейшем при исследовании эффективности сечений не учитываются.

Рассматривается симметричное относительно горизонтальной оси С-образное сечение и симметричное относительно центра тяжести Z-образное сечение (рисунок 2).

За критерий эффективности принято отношение максимального изгибающего момента, который способно воспринять сечение в упругой стадии работы стали, к площади поперечного сечения, характеризующей расход материала, M_{\max}/A , где $M_{\max} = W_x \sigma_y$ (1).

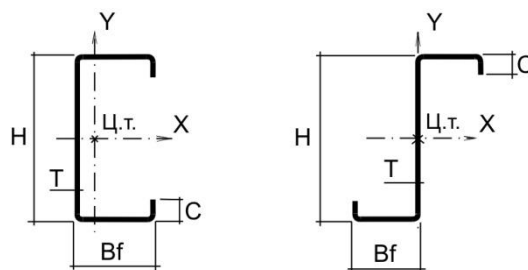


Рисунок 2. Размеры С- и Z-образных профилей

Варьируются следующие параметры сечения: ширина пояса b_f в интервале от 40 до 100 мм, относительная ширина отгиба c/b_f в интервале от 0,2 до 0,5 и толщина t от 1 до 3 мм. Расчёты выполнены для трёх фиксиро-

ванных высот сечения: $h = 100, 200$ и 300 мм и двух значений предела текучести стали $\sigma_y = 250$ и 350 МПа.

Момент сопротивления сечения W_x в формуле (1) определяется в зависимости от того, обеспечена ли местная устойчивость сжатой части стенки, сжатого пояса, отгиба и устойчивость формы сечения [1,2] при напряжениях в сжатом поясе, равных пределу текучести. Если устойчивость всех этих видов обеспечена, то принимается во внимание момент сопротивления полного сечения S или Z-образного профиля. Если устойчивость хотя бы одного (или более) из перечисленных видов не обеспечена, то в расчёт принимается редуцированный момент сопротивления эффективного сечения W_{xeff} .

Параметры эффективного сечения определяются по Eurocode 3 [3]. В котором в целях учёта явления потери устойчивости пластин, составляющих сечение, последние в зависимости от уровня и градиента сжимающих нормальных напряжений, а также граничных условий по продольным граням пластин, в соответствии с концепцией «эффективной ширины», предложенной Т. фон Карманом (Theodor von Karman) [4], разбиваются на эффективные и неэффективные участки [5]. Первые моделируют части сечения, которые после потери устойчивости соответствующей пластины остались устойчивы, и они включаются в состав эффективного сечения. Вторые моделируют выпучившиеся части пластин, и они не включаются в состав эффективного сечения.

Возможность потери устойчивости формы сечения учитывается в [3] путём редуцирования толщины условного ребра жёсткости, в состав которого включается эффективная часть сжатого пояса, примыкающая к отгибу, и эффективная часть самого отгиба. И рассматривается устойчивость стержня на упругом основании с таким сечением.

Все вычисления выполнены с помощью программы расчёта стальных тонкостенных холодногнутых профилей CFSteel [6], в которой для определения редуцированных геометрических характеристик эффективных сечений реализована методика Eurocode 3.

На рисунках 3, 4 и 5 представлены зависимости эффективности M_{xmax} / A C- и Z-

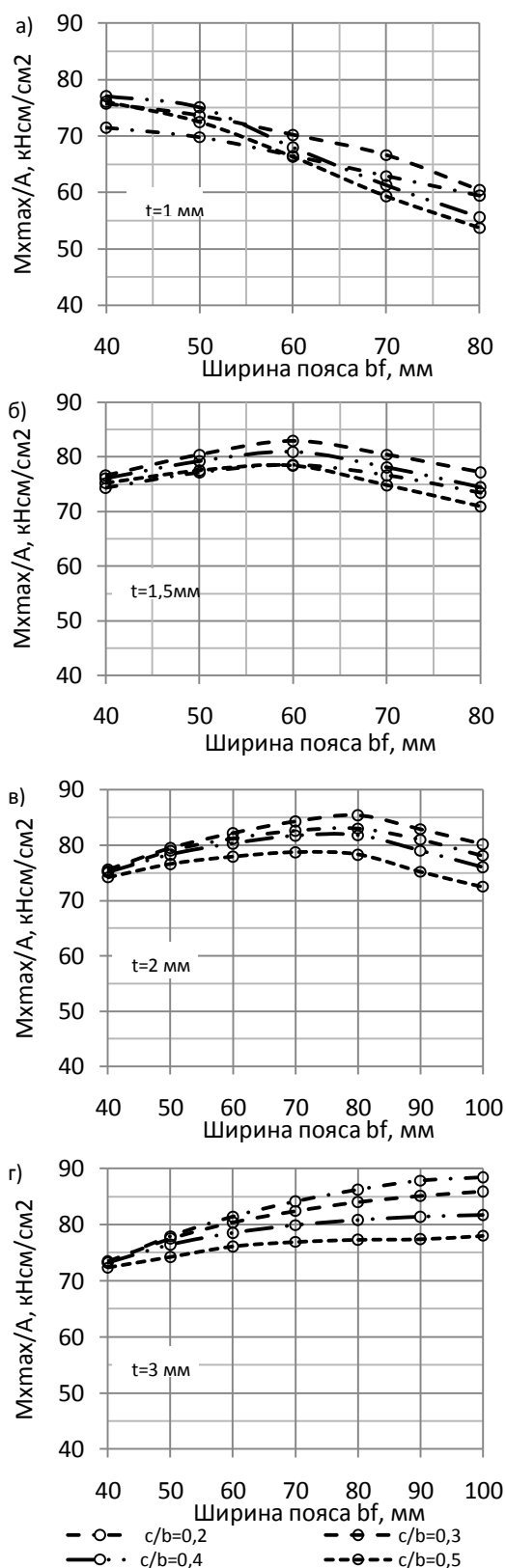


Рисунок 3. Зависимости эффективности от ширины пояса для $h=100$ мм и $\sigma_y = 250$ МПа

ВЛИЯНИЕ ШИРИНЫ ПОЯСОВ И ОТГИБОВ В СЕЧЕНИЯХ С- и Z-ОБРАЗНЫХ СТАЛЬНЫХ ТОНКОСТЕННЫХ ХОЛОДНОГНУТЫХ ПРОФИЛЕЙ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ РАБОТЫ В УСЛОВИЯХ ИЗГИБА

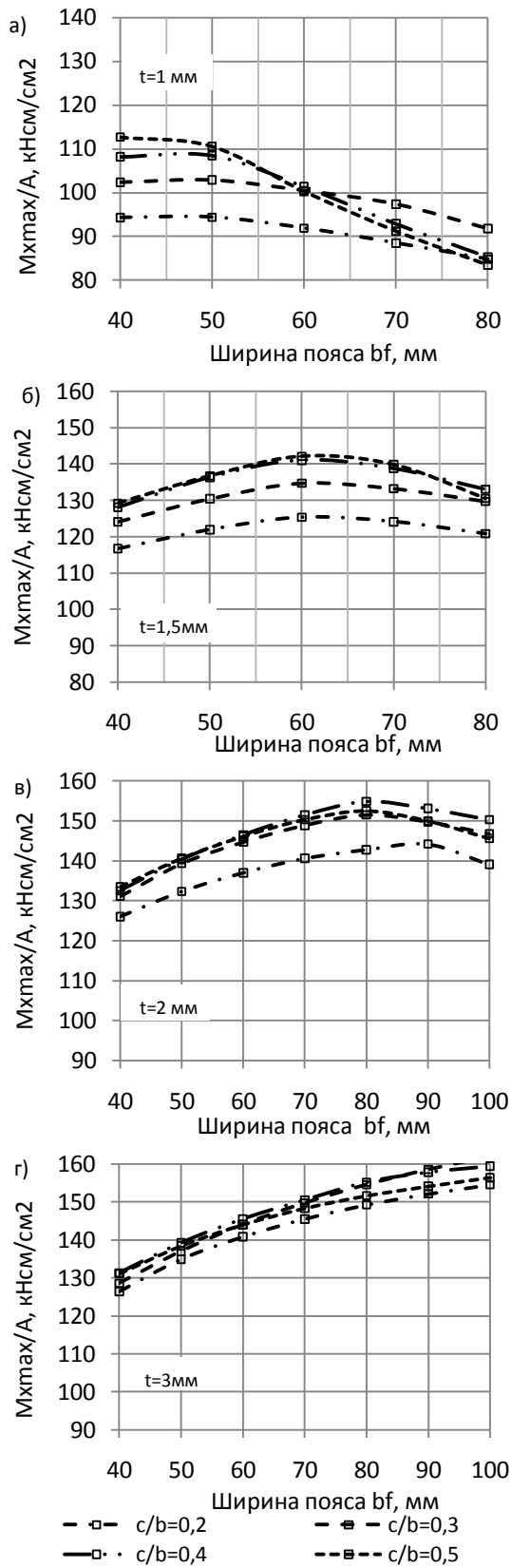


Рисунок 4. Зависимости эффективности от ширины пояса для $h=200$ мм и $\sigma_y = 250$ МПа

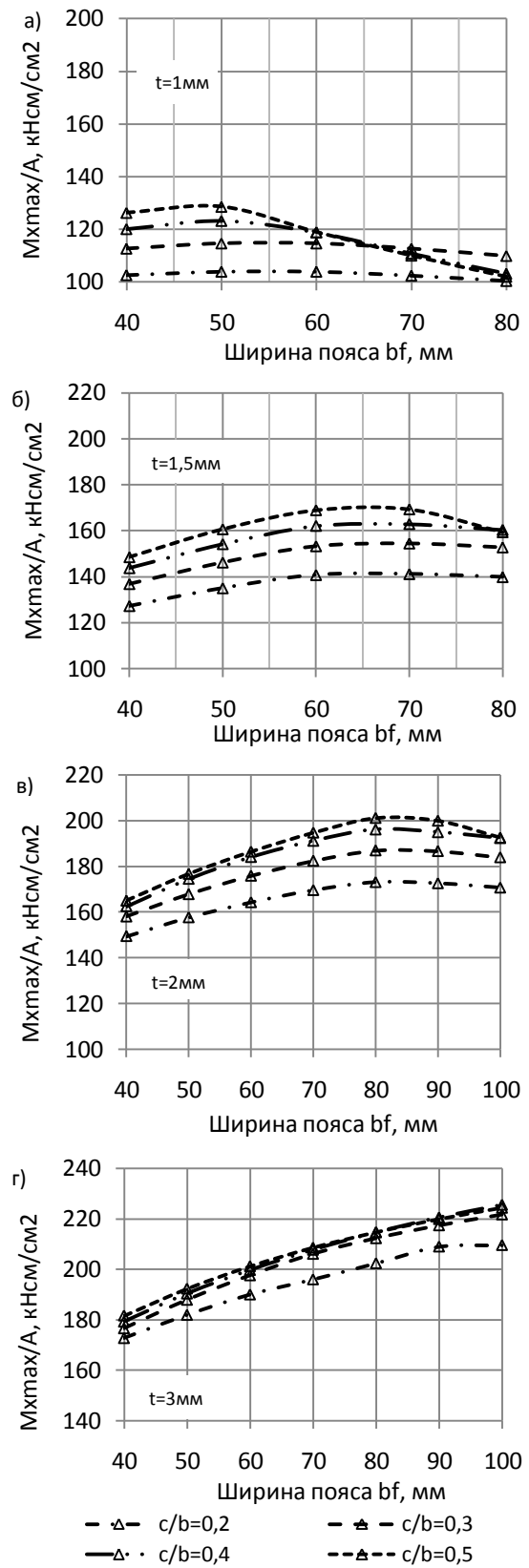


Рисунок 5. Зависимости эффективности от ширины пояса для $h=300$ мм и $\sigma_y = 250$ МПа

образных сечений от ширины пояса при высотах $h = 100, 200$ и 300 мм соответственно и $\sigma_y = 250$ МПа.

При толщине $t = 1$ мм максимальное отношение M_{xmax}/A достигается при относительно узких поясах (40, 50 мм). При более широких поясах их часть теряет устойчивость и выключается из работы. Причём снижение эффективности тем больше, чем шире отгиб, так как в этом случае добавляется ещё и потеря устойчивости отгиба. Это видно на рисунках, где графики эффективности для $c/b_f = 0,4$ и $0,5$ быстро снижаются после $b_f = 50$ мм. В то время как при узких отгибах $c/b_f = 0,2$ ширина пояса мало влияет на эффективность особенно при $h = 200$ и 300 мм.

При толщине $t = 1,5$ мм и $h = 100$ мм наблюдается оптимум при $b_f = 60$ мм, а в случае $h = 200$ и 300 мм – при $b_f = 60...70$ мм.

С увеличением толщины до $t = 2...3$ мм экстремум для всех высот продолжает смещаться в сторону больших ширин поясов. Для $t = 2$ мм и $h = 100$ мм это $b_f = 80$ мм; для $h = 200$ и 300 мм $b_f = 80...90$ мм. При $t = 3$ мм оптимумы достигаются при $b_f > 100$ мм.

Из приведённых результатов можно заметить, что при низких профилях ($h = 100$ мм) более эффективными оказываются относительно узкие пояса, а при увеличении высоты – более широкие.

С увеличением предела текучести до $\sigma_y = 350$ МПа характер зависимостей эффективности от ширины пояса в целом сохраняется, но оптимальные ширины поясов сдвинуты в сторону меньших значений на $5...10$ мм. При этом значения M_{xmax}/A более высокие. Степень повышения эффективности с ростом предела текучести может быть оценена по таблицам 1 и 2, где представлены отношения эффективности при $\sigma_y = 350$ МПа к этим показателям при $\sigma_y = 250$ МПа. Минимальные значения $1,14$ имеют место для профилей малых толщин ($t = 1$ мм) с широкими поясами и отгибами, где возникают большие неэффективные зоны в сжатых компонентах сечения. С повышением толщины эффективность повышается и достигает значения $1,4$, что соответствует отношению $\sigma_{y350}/\sigma_{y250} = 1,4$.

Влияние ширины отгиба на эффективность работы профилей на изгиб для $h = 200$ и 300 мм при $\sigma_y = 250$ МПа представлено на рисунках 6 и 7. Видно, что на характер этой зависимости значительное влияние оказывает ширина пояса. При относительно узких поясах ($b_f = 40, 50$ мм) более эффективными оказываются широкие отгибы ($c/b_f = 0,5$ и бо-

лее). С увеличением ширины поясов оптимумы постепенно смещаются в область $c/b_f =$

Таблица 1

Степень повышения эффективности с ростом предела текучести с $\sigma_y = 250$ МПа до 350 МПа при $h=200$ мм

t, мм	b _f , мм	c/b _f			
		0,2	0,3	0,4	0,5
1	40	1,19	1,22	1,23	1,23
	50	1,19	1,20	1,18	1,16
	60	1,19	1,18	1,15	1,15
	70	1,19	1,17	1,14	1,15
	80	1,20	1,14	1,18	1,14
1,5	40	1,24	1,26	1,28	1,32
	50	1,24	1,26	1,27	1,31
	60	1,20	1,22	1,22	1,25
	70	1,18	1,20	1,20	1,18
	80	1,17	1,19	1,15	1,15
2	40	1,36	1,38	1,40	1,40
	50	1,34	1,36	1,40	1,40
	60	1,33	1,35	1,38	1,40
	70	1,30	1,33	1,36	1,39
	80	1,26	1,28	1,31	1,34
3	40	1,38	1,40	1,40	1,40
	50	1,36	1,40	1,40	1,40
	60	1,35	1,40	1,40	1,40
	70	1,35	1,39	1,40	1,40
	80	1,34	1,37	1,40	1,40
	90	1,34	1,36	1,40	1,40
100	1,33	1,35	1,40	1,40	

Таблица 2

Степень повышения эффективности с ростом предела текучести с $\sigma_y = 250$ МПа до 350 МПа при $h=300$ мм

t, мм	b _f , мм	c/b _f			
		0,2	0,3	0,4	0,5
1	40	1,21	1,21	1,22	1,23
	50	1,21	1,19	1,20	1,16
	60	1,21	1,17	1,15	1,15
	70	1,20	1,16	1,15	1,14
	80	1,20	1,15	1,16	1,15
1,5	40	1,24	1,26	1,27	1,28
	50	1,24	1,26	1,27	1,27
	60	1,19	1,22	1,23	1,23
	70	1,19	1,20	1,21	1,17
	80	1,19	1,19	1,16	1,15
2	40	1,24	1,26	1,28	1,31
	50	1,24	1,26	1,28	1,31
	60	1,24	1,26	1,27	1,30
	70	1,23	1,25	1,26	1,29
	80	1,19	1,22	1,22	1,24
3	40	1,37	1,40	1,40	1,40
	50	1,36	1,39	1,40	1,40
	60	1,35	1,37	1,41	1,40
	70	1,34	1,36	1,40	1,40
	80	1,33	1,35	1,39	1,40
	90	1,30	1,35	1,38	1,40
100	1,31	1,34	1,37	1,40	

ВЛИЯНИЕ ШИРИНЫ ПОЯСОВ И ОТГИБОВ В СЕЧЕНИЯХ С- и Z-ОБРАЗНЫХ СТАЛЬНЫХ ТОНКОСТЕННЫХ ХОЛОДНОГНУТЫХ ПРОФИЛЕЙ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ РАБОТЫ В УСЛОВИЯХ ИЗГИБА

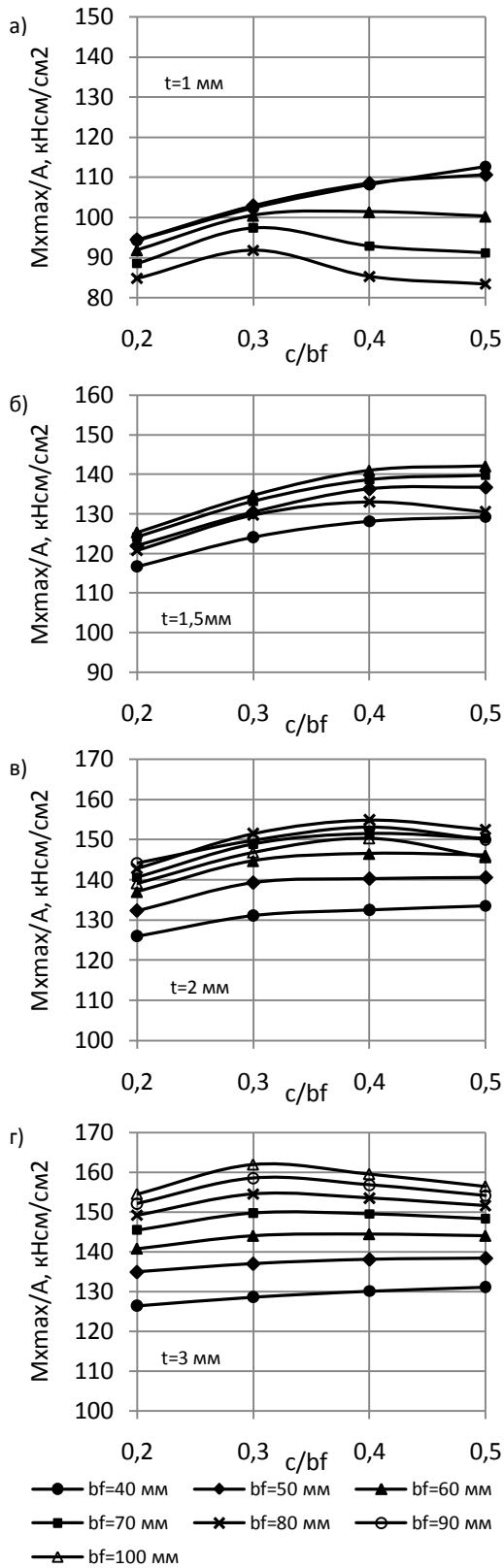


Рисунок 6 – Зависимости эффективности от ширины отгиба при $h = 200$ мм и $\sigma_y = 250$ МПа

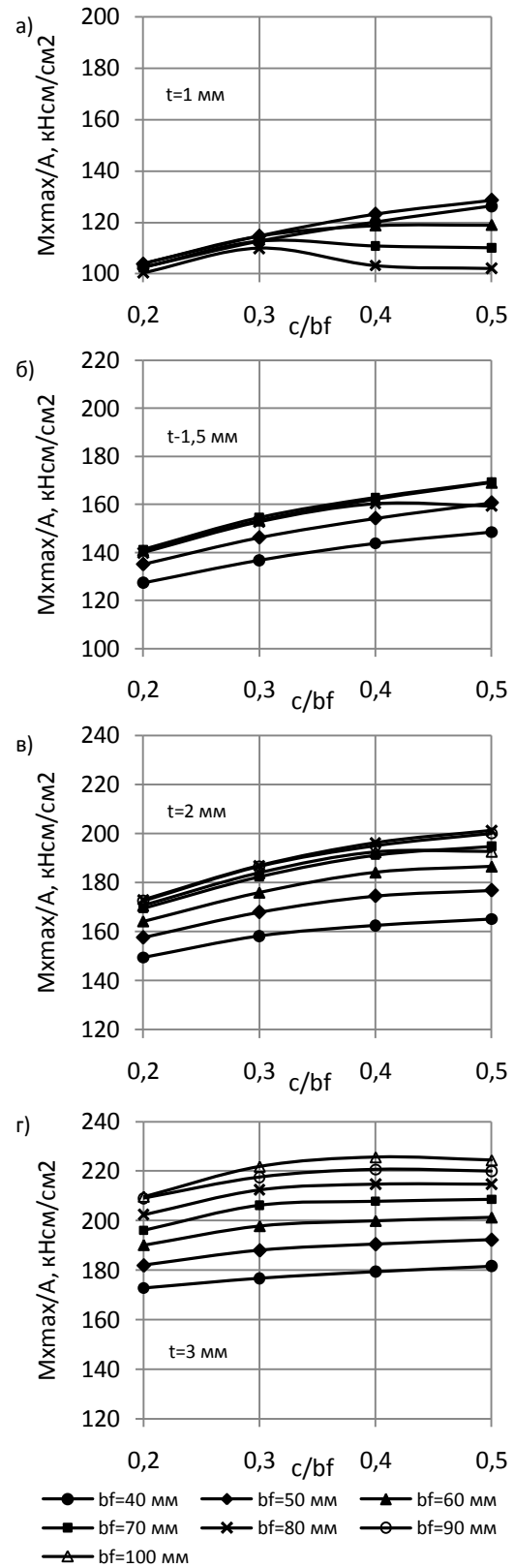


Рисунок 7 - Зависимости эффективности от ширины отгиба при $h = 300$ мм и $\sigma_y = 250$ МПа

0,3...0,4 при $h = 200$ мм. Увеличение высоты профиля для широких поясов и $t \geq 2$ мм сдвигает оптимумы в зону $c/b_f = 0,4...0,5$. Но эти тенденции не являются ярко выраженными.

Для поясов с $b_f \geq 70$ и $t = 1$ мм заметен экстремум при $c/b_f = 0,3$, что определяется режимом увеличением ширины участка на отгибе, теряющего устойчивость, при $c/b_f = 0,4$ и $0,5$.

С повышением прочности стали до $\sigma_y = 350$ МПа характер зависимостей M_{xmax}/A от c/b_f в целом сохраняется.

ВЫВОДЫ

Эффективность работы С- и Z-образных профилей на изгиб зависит от ширины поясов, ширины отгибов, высоты сечения, а также толщины и прочности стали.

Характер влияния ширины поясов на эффективность во многом зависит от толщины стали. При относительно тонких сталях ($t \leq 1$ мм) наиболее эффективны профили с узкими поясами. Наоборот, при больших толщинах эффективны широкие пояса, в которых неэффективная часть либо мала, либо вообще отсутствует (пояс не теряет устойчивость). При толщинах $t = 1,5...2,0$ мм наиболее эффективны пояса с $b_f = 60...90$ мм (в зависимости от высоты сечения и прочности стали).

Увеличение высоты сечения также влечёт за собой повышение ширины эффективных поясов.

Повышение прочности стали приводит к пропорциональному росту эффективности только при относительно больших толщинах. При малых толщинах эффективность растёт медленнее из-за потери местной устойчивости. Также, упрочнение стали приводит к снижению ширины эффективных поясов.

Влияние ширины отгибов на эффективность зависит от ширины поясов, высоты профиля и толщины стали. При поясах небольшой ширины ($b_f = 40, 50$ мм) при всех высотах и толщинах наиболее эффективны широкие отгибы $c/b_f = 0,5$ и более. С увеличением ширины поясов и со снижением высоты профиля оптимумы сдвигаются в сторону меньших ширин отгибов ($c/b_f = 0,3...0,4$). Отгибы шириной $c/b_f < 0,25$ в большинстве случаев нецелесообразны.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Adany, S. Buckling mode classification of members with open thin-walled cross-section by using Finite Strip Method. Research Report / S. Adany // Johns Hopkins University, 2004.- 99 p
2. Кикоть, А.А. Программа расчёта прогибов изгибаемых элементов из стальных тонкостенных холодногнутых профилей / А.А. Кикоть, М.Н. Корницкая, Е.В. Мурзин // Проектирование и строительство в Сибири, 2010.- №4. – С.37-39
3. EN 1993-1-3:2004 Eurocode 3. Design of steel structures. Part 1-3: General rules. Supplementary rules for cold-formed members and sheeting / European Committee for Standardisation CEN, Brussels, 2004.- 125 p
4. Karman Th, Sechler E.E., Donnel L.H. Transactions American Society Mech. Eng., vol. 54, 1932.- P. 53
5. EN 1993-1-5:2003 Eurocode 3. Design of steel structures. Part 1-5: Plated structural elements / European Committee for Standardisation CEN, Brussels, 2003.- 53 p.
6. Верификация программы CFSteel v.1.1, 2010.- 20 с