

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

А.А. Кикоть

*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.

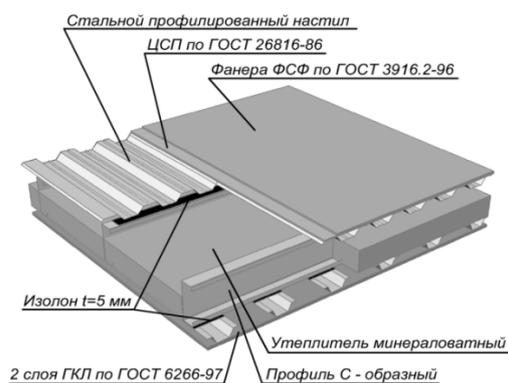


Рисунок 1 – Конструкция междуэтажного перекрытия

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,  $M_{xmax}/A$ , где  $M_{xmax} = W_x \sigma_y$  (1).

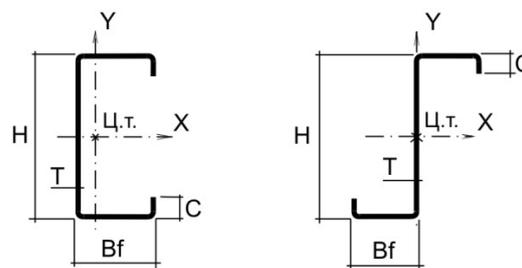


Рисунок 2 – Размеры С- и Z-образных профилей

Варируются 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 фиксированных 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

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

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 С- 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 холодногнутох 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  $M_{xmax}/A$  С- и Z-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.

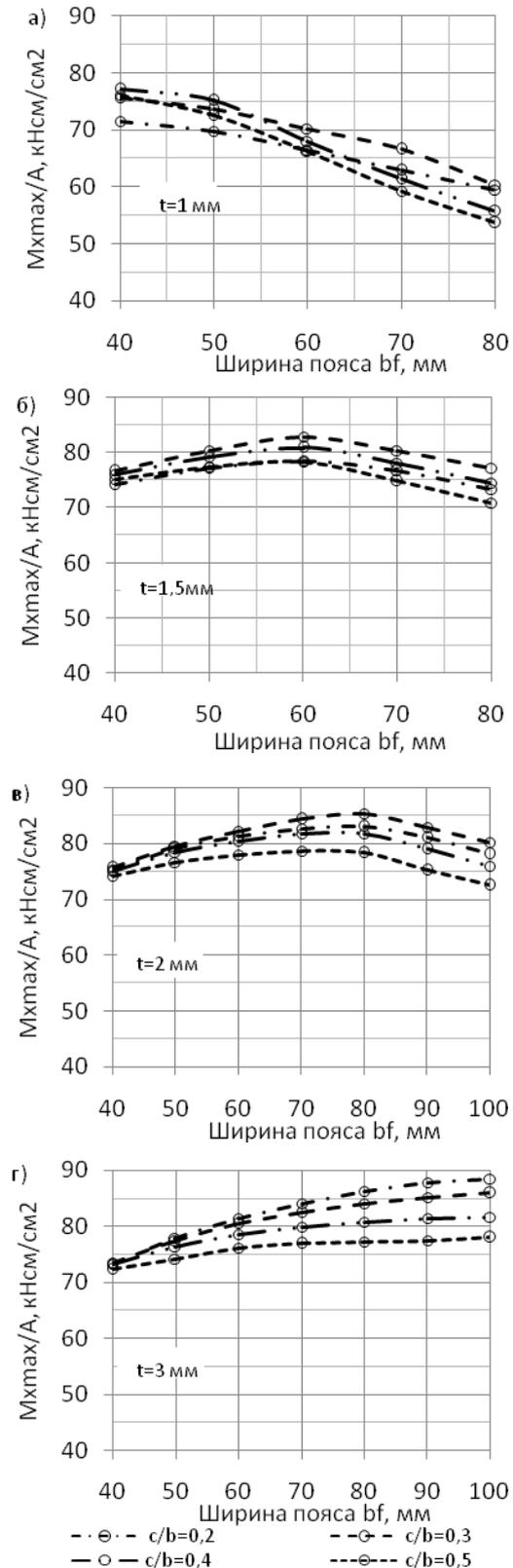


Рисунок 3 – Зависимости эффективности от ширины пояса для  $h=100$  мм и  $\sigma_y = 250$  МПа

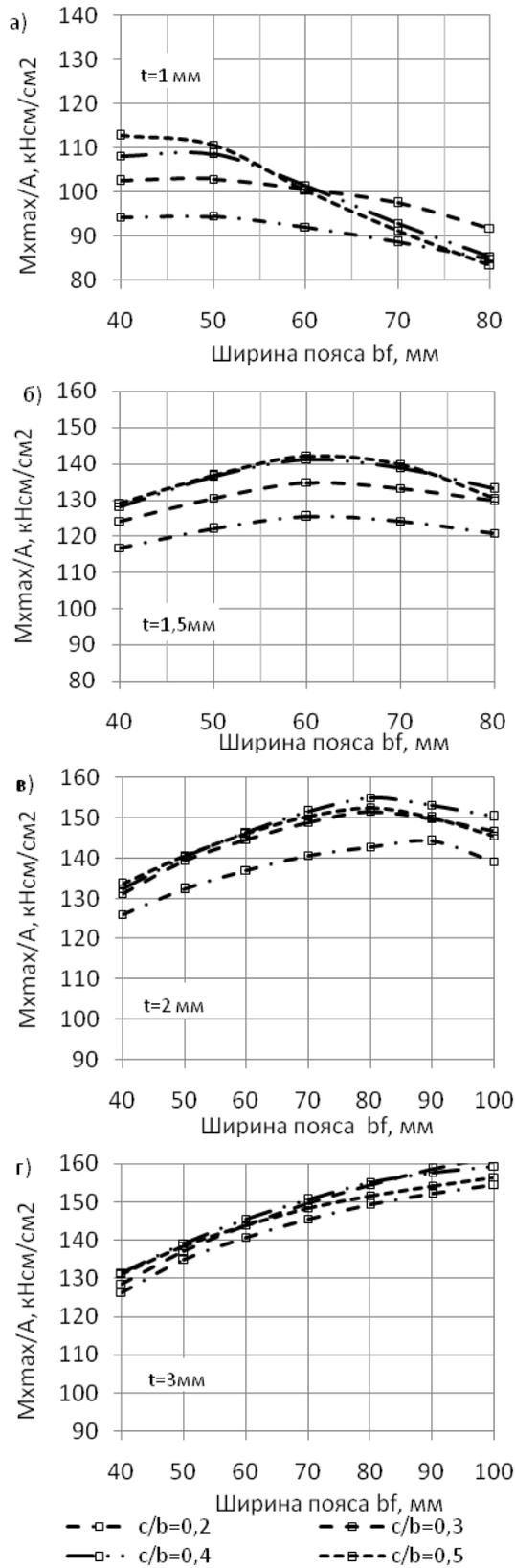


Рисунок 4 – Зависимости эффективности от ширины пояса для  $h=200\text{ мм}$  и  $\sigma_y = 250\text{ МПа}$

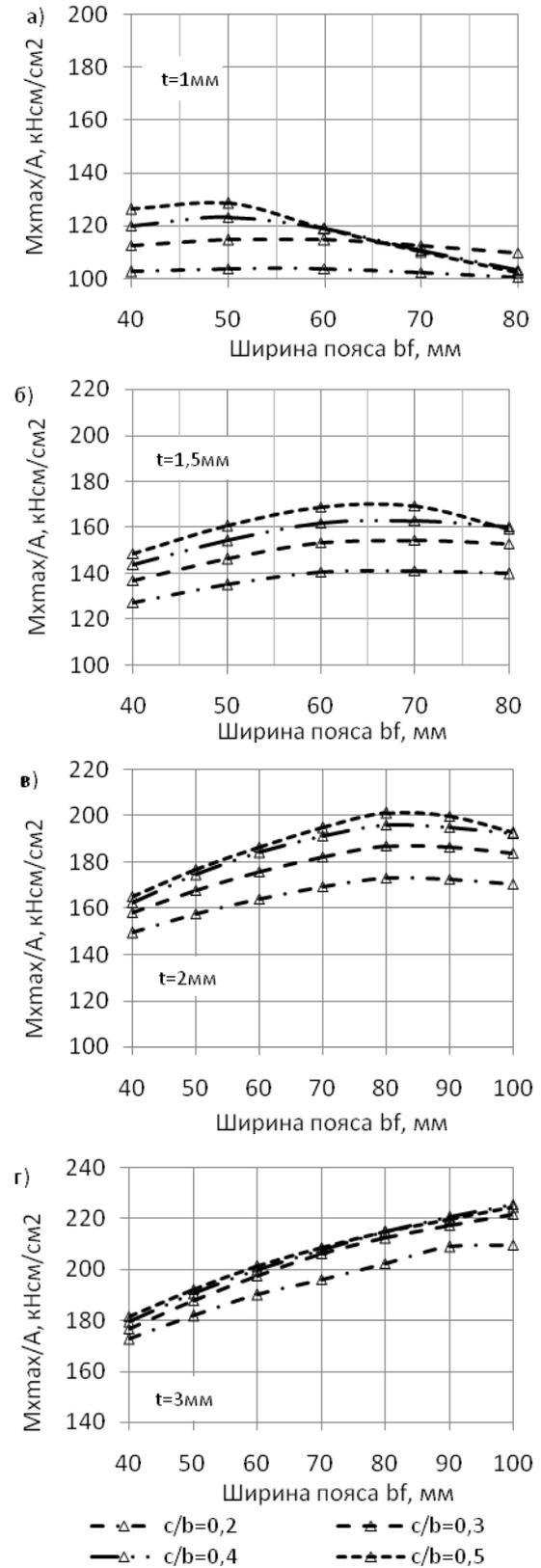


Рисунок 5 – Зависимости эффективности от ширины пояса для  $h=300\text{ мм}$  и  $\sigma_y = 250\text{ МПа}$

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

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 более). С увеличением ширины поясов оптимумы постепенно смещаются в область  $c/b_f = 0,3...0,4$  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 резким 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.

Таблица 1 – Степень повышения эффективности с ростом предела текучести с  $\sigma_y = 250$  МПа до 350 МПа при  $h=200$  мм

t, мм	b <sub>f</sub> , мм	c/b <sub>f</sub>			
		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 <sub>f</sub> , мм	c/b <sub>f</sub>			
		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

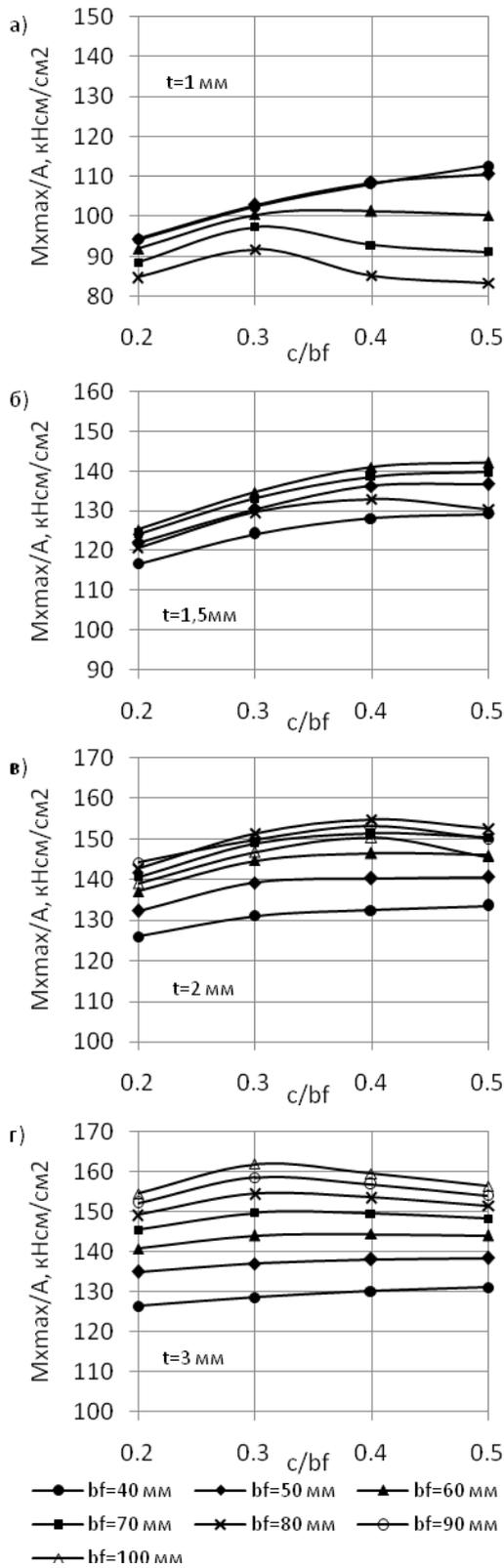


Рисунок 6 – Зависимости эффективности от ширины отгиба при  $h = 200$  мм и  $\sigma_y = 250$  МПа

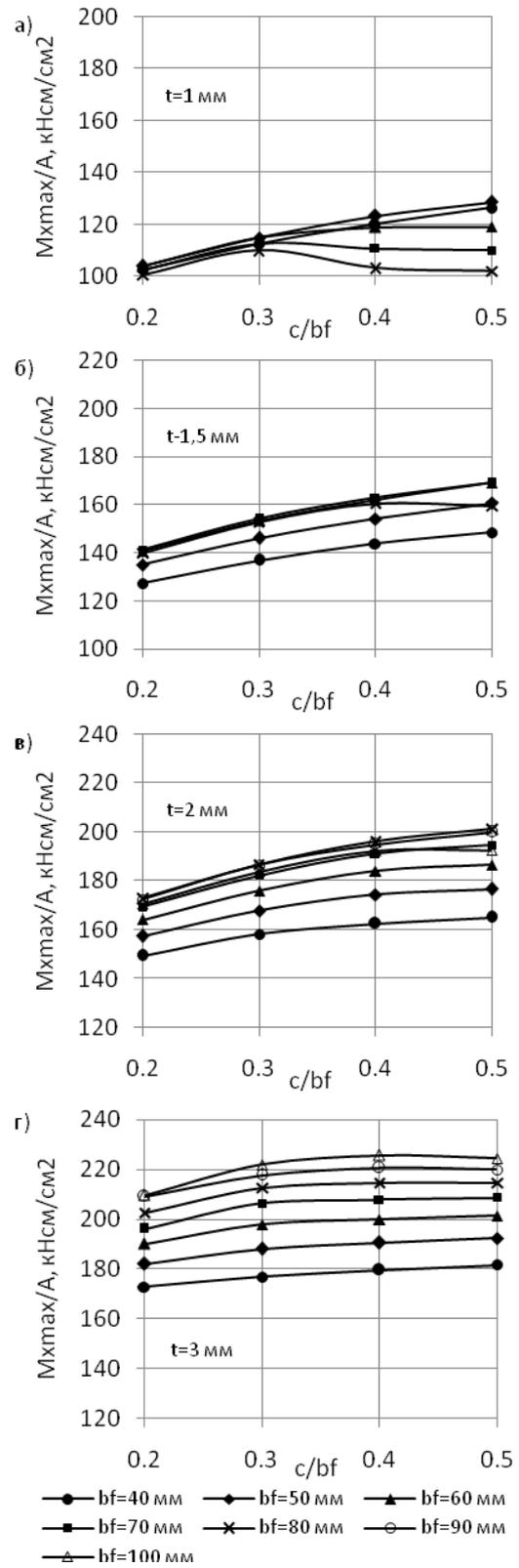


Рисунок 7 – Зависимости эффективности от ширины отгиба при  $h = 300$  мм и  $\sigma_y = 250$  МПа

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

## 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  $t = 1,5 \dots 2,0$  мм наиболее эффективны пояса с  $b_f = 60 \dots 90$  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 не-

большой 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 ( $c/b_f = 0,3 \dots 0,4$ ). 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 холодногнуемых 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.

УДК 666.9.022.6(075.8)

## СОСТАВ ПРОДУКТОВ ГИДРАТАЦИИ ПОРТЛАНДЦЕМЕНТА С ДОБАВКОЙ ЗОЛ БУРЫХ УГЛЕЙ КАНСКО-АЧИНСКОГО БАССЕЙНА

В.К. Козлова, А.А. Лихошерстов, А.В. Вольф, Е.Е. Андрюшина, Е.В. Шкрабко

*Рассмотрен состав продуктов гидратации портландцемента с добавкой золы бурых углей Канско-Ачинского бассейна. Показано, что свободный оксид кальция в золах не полностью гидратируется при всех режимах твердения, кроме автоклавной обработки. Необходимо введение химических добавок.*

*Ключевые слова: оксид кальция, эттрингит.*

## ВВЕДЕНИЕ

В связи с дефицитом активных минеральных добавок (доменного гранулированного шлака и других), их высокой стоимостью производители цемента проявляют всё больший интерес к рассмотрению возможно-

сти использования зол тепловых электростанций в производстве портландцемента, золопортландцемента, многокомпонентных композиционных цементов. В настоящее время в Западной и Восточной Сибири работает ряд крупных тепловых электростанций, сжигающих бурые угли Канско-Ачинского бассейна.