



УЧЕТ УПРОЧНЕНИЯ СТАЛИ В ТОНКОСТЕННЫХ ХОЛОДНОДЕФОРМИРУЕМЫХ ПРОФИЛЯХ

В статье представлено экспериментально-теоретическое исследование упрочнения стали по сечению тонкостенных холоднодеформируемых профилей и определение коэффициента упрочнения материала профиля.

Тонкостенные холоднодеформируемые профили, упрочнение материала, экспериментально-теоретическое исследование, коэффициент упрочнения.

Технология возведения зданий из легких стальных тонкостенных конструкций завоевала широкую популярность в Европе, но отсутствие нормативной базы по проектированию этих конструкций в России сдерживало их использование при возведении разнообразных типов зданий и ограничивалось строительством зданий малоэтажных [1]. С выходом нового свода правил СП 260.1325800.2016 [2] по проектированию и расчету тонкостенных профилей появилась возможность использовать их в несущих конструкциях зданий большей этажности и с большими пролетами [3, 4]. Дополнительный экономический эффект при применении этих профилей можно получить при учете упрочнения стали, которое возникает в процессе изготовления профилей. При этом в [2] допускается возможность использования упрочнения стали в сечении тонкостенных профилей только на основании экспериментальных исследований. Коэффициенты упрочнения отдельных зон профиля следует определять по результатам статистической обработки результатов экспериментальных данных. Учет упрочнения материала при растяжении приводит к уменьшению требуемой площади расчетного сечения тонкостенных профилей, уменьшению их массы и повышению экономической эффективности конструкций.

Подобные статистические исследования проведены для материала гнутых профилей толщиной 3–6 мм в работе [5]. Для гнутых профилей указанных толщин коэффициент упрочнения для всего сечения доходит до 1,20. Для тонкостенных стальных профилей толщиной менее 3 мм, которые получили широкое распространение в строительстве [3, 4] после выхода нового свода правил [2], таких исследований до настоящего времени не проводилось. Встает вопрос об оценке уровня упрочнения для тонкостенных профилей.

В настоящей работе произведено экспериментальное и теоретическое исследование и рассмотрены различные подходы к определению коэффициента упрочнения материала тонкостенного профиля.

Экспериментальное исследование по оценке механических свойств стали по поперечному сечению в зависимости от толщины исходной стальной заготовки и формы поперечного сечения тонкостенного про-

филя производилось двумя методами:

- неразрушающим (методом царапания);
- разрушающим (испытанием на растяжение).

Для исследований были выбраны по три образца стоечных профилей трех различных типоразмеров (ПС-150-1; ПС-200-1,5; ПС-200-2) из стали 08пс по ГОСТ 14918-80 [6].

Профили были разделены на 15 продольных участков (рис. 1). Заготовки для изготовления образцов для испытаний на растяжение были вырезаны из стальных профилей с помощью электрической маятниковой пилы. Для исключения действия высоких температур на свойства металла вырезание заготовок было проведено при смазывании зоны выреза машинным маслом. Обработка заготовок производилась на фрезерном станке с охлаждением. Площадь сечения угловых образцов при разрезке принималась равной площади четверти кольца, образованного внешним и внутренним радиусамигиба. Для получения сопоставимых результатов площадь плоских образцов принималась равной площади угловых. Испытания были проведены в соответствии с требованиями действующих нормативных стандартов: ГОСТ 11701-84 [7] и ГОСТ 21318-75 [8]. На основании испытаний трех образцов рассчитывались средние значения определяемых величин при обеспеченности 0,95.

Испытание на твердость царапанием заключалось в нанесении на испытуемую поверхность канавки и измерении ее ширины. Для нанесения царапины была использована установка для определения твердости материала царапаньем с четырехгранной пирамидой. С помощью микроскопа МПБ была измерена ширина царапины. Твердость стали определялась по формуле:

$$H = \frac{c \cdot F}{b^2}, \quad (1)$$

где c – коэффициент, зависящий от вида алмазного наконечника, для четырехгранной пирамиды $c = 3,708$;

F – давление от индентора в виде алмазной пирамиды на материал, для стали любых классов $F = 80H$;

b – ширина царапины.

По полученному значению твердости определялся предел прочности стали по формуле:

$$\sigma_B = 0,26 \cdot H - 71. \quad (2)$$

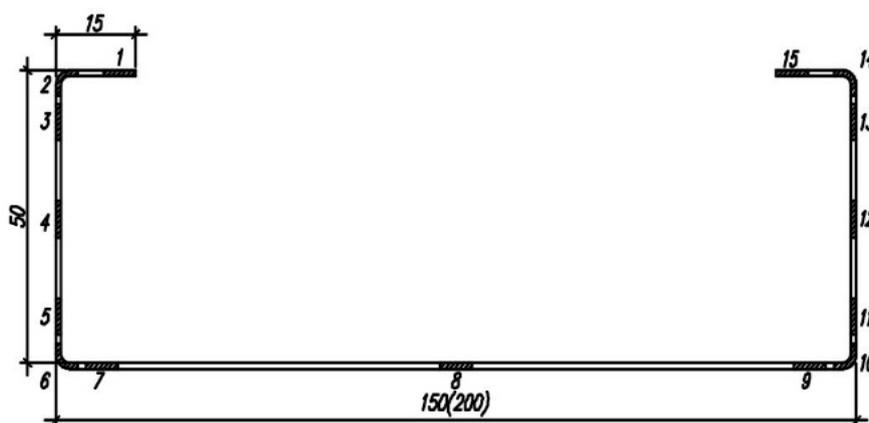


Рис. 1. Места вырезки образцов для испытаний

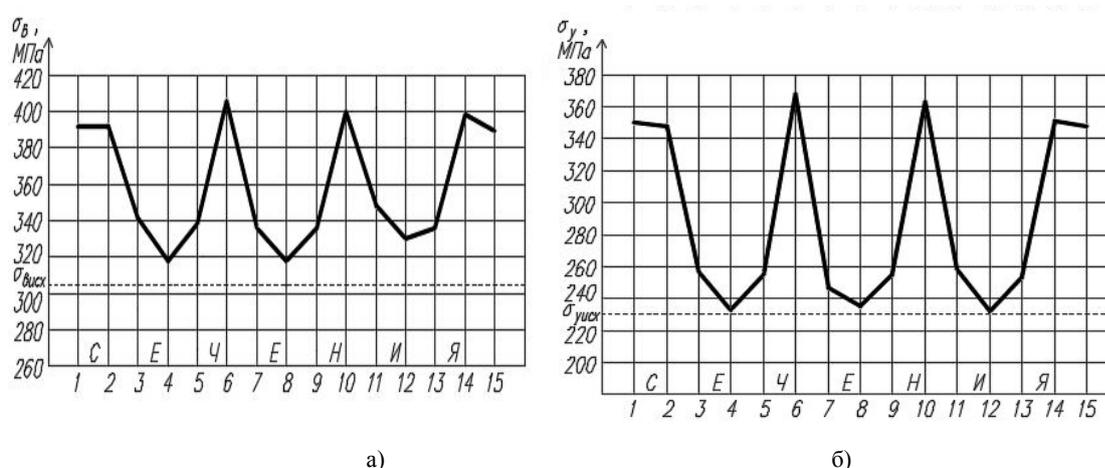


Рис. 2. Распределение прочностных характеристик стали по сечению тонкостенного оцинкованного профиля ПС-150-1: а) предела прочности; б) предела текучести

Испытания образцов разрушающим методом проводились на универсальной разрывной машине Р-5. Приложение нагрузки на образец, определение соответствующего удлинения и запись этих параметров происходили в автоматическом режиме. В результате испытаний образца были получены протоколы механических испытаний на растяжение, включающие следующие данные: максимальное усилие при растяжении (P_{max}); временное сопротивление (предел прочности (σ_b)); усилие при условном пределе текучести ($P_{0,2}$); условный предел текучести ($\sigma_{0,2}$); относительное равномерное удлинение (δ_p); диаграммы растяжения.

Для каждого профиля получено распределение механических характеристик стали по сечению. На рисунке 2 представлено распределение прочностных характеристик стали по сечению тонкостенного оцинкованного профиля ПС-150-1 по результатам механических испытаний на растяжение.

Характер распределения прочностных характеристик стали по сечению профилей, полученных неразрушающим и разрушающим методами, одинаков. Разброс результатов испытаний разными методами составляет 2,20–7,00 %.

Из анализа результатов экспериментальных исследований образцов, вырезанных из различных участков поперечного сечения профиля, можно выделить три зоны упрочнения: места сгиба, характеризующиеся наибольшим упрочнением, кромки и прилегающие к местамгиба зоны, имеющие упрочнение, и плоские участки, упрочняющиеся незначительно.

В результате эксперимента установлено, что увеличение предела текучести в местах сгиба выше, чем увеличение предела прочности стали в соответствующих зонах (рис. 2): предел прочности металла местгиба готовых профилей толщиной от 1,0 до 2,0 мм повысился на 36–44 %, предел текучести – на 50–60 %.

Характер распределения упрочнения материала по сечению тонкостенных профилей толщиной 1–2 мм подтверждает данные исследований в [5], проведенных для гнутых профилей толщиной 3–6 мм.

В работе произведен расчет коэффициента упрочнения для зонгиба тонкостенного стального профиля и его сравнение с результатами экспериментальных исследований. Рассмотрены различные подходы к определению коэффициента упрочнения материала тонкостенного профиля. Коэффициенты упроч-

нения определялись для трех профилей толщиной 1; 1,5; 2 мм (ПС-150-1; ПС-200-1,5; ПС-200-2), выполненных из стали с отношением $\sigma_e / \sigma_m = 1,30$ и отношением $r / t = 1,5$.

Коэффициенты упрочнения определялись по четырем методикам. Первый расчет проводился по методике, изложенной в Руководстве по проектированию стальных конструкций из замкнутых гнутосварных профилей [8]; второй – по методике А.Г. Козлова [9], третий – по методике В.М. Деренковского [10], четвертый – по методике А.С. Воробьева [11]. Результаты расчета представлены в таблице 1. Расхождение результатов эксперимента и теоретических коэффициентов упрочнения составило от 0,74 % до 36,00 %.

Проанализировав таблицу, можно сделать вывод, что для исследованных профилей с отношением $r / t = 1,5$ наилучшую сходимость экспериментальные и теоретические результаты имеют при определении коэффициента упрочнения зоны сгиба по третьей методике. Расхождение составляет 0,74 %.

Таблица 1

Коэффициент упрочнения металла в зонах сгиба тонкостенного профиля

r/t	$\sigma_e / \sigma_m = 1,30$				Коэффициент упрочнения металла в зонах сгиба α_n , полученный экспериментально при обеспеченности 0,95
	Коэффициент упрочнения металла в зонах сгиба α_n тонкостенного профиля, вычисленный по разным методикам				
	1	2	3	4	
1,5	1,357	1,097	1,503	1,947	1,492

Коэффициенты упрочнения для всего сечения стальных тонкостенных профилей (табл. 2) определялись по формуле:

$$\alpha = \frac{\sum \alpha_i A_i}{A}, \quad (3)$$

где α – среднее упрочнение всего профиля;

A – площадь всего сечения профиля;

$\alpha_i A_i$ – коэффициент упрочнения и площадь i -ого участка тонкостенного профиля.

В работе учитывается упрочнение только угловых зон тонкостенного профиля, его значение принимается по таблице 1 для $r/t=1,5$, а для остальной площади сечения – $\alpha_i=1,00$. Упрочнение материала сечения профиля с учетом угловых зон и прилегающих к ним участков длиной $3t$ с коэффициентом упрочнения сечения $\alpha_i=1,05$ приведено в таблице 2. Различие в коэффициентах упрочнения всего профиля без учета зон, прилегающих к угловым, и с их учетом менее 1 %.

Площадь угловой зоны считается по формуле:

$$A_n = \frac{\pi \cdot t}{2} \cdot \left(r + \frac{t}{2} \right), \quad (4)$$

где $r = 1,5t$ – радиус гiba.

Профили принимаются по ТУ1121-001-13830080-2003.

Расчеты проведены в программе *Excel* и представлены в таблице 2.

Таблица 2

Коэффициенты упрочнения материала всего сечения профиля

Профиль	$\sigma_e / \sigma_m = 1,30$ и $r/t = 1,5$		Расхождение в %
	Коэффициент упрочнения материала всего сечения профиля		
	С учетом упрочнения только углов сгиба	С учетом упрочнения углов сгиба и прилегающих к ним зон длиной $3t$	
ПС-150-1,0	1,023	1,026	0,29
ПС-200-1,5	1,030	1,036	0,58
ПС-200-2,0	1,041	1,049	0,77

В результате проведенных исследований:

1. Произведены расчеты коэффициентов упрочнения стали в местах сгиба по четырем методикам для трех различных профилей и сравнение их с результатами экспериментальных исследований.

2. Согласно методикам, представленным в работах отечественных ученых [9–12], значения коэффициентов упрочнения стали в зонах сгиба α_n получились с отклонением в пределах 0,74–36,00 % от экспериментального значения. Учет технологического упрочнения при расчете конструкций из стальных тонкостенных профилей позволит повысить их несущую способность до 5 %.

3. Установлено, что учет упрочнения в тонкостенных профилях целесообразен при больших объемах использования конкретных типов профилей на одном объекте, поскольку требует экспериментальных исследований и статистической оценки полученных результатов. При малых объемах использования профилей это нецелесообразно в связи с дополнительными затратами на проведение эксперимента, которые могут не окупиться при возведении объекта.

4. Для более точной оценки целесообразности учета упрочнения стали предполагается проведение дальнейших экспериментальных исследований оценки коэффициентов упрочнения всего сечения профиля и сравнение их с теоретическими.

Литература

1. Казакова, И. С. Новое конструктивное решение жилых зданий из ЛСТК. // Эффективные строительные конструкции: теория и практика. Материалы XIII Международной научно-технической конференции / И. С. Казакова, И. Ю. Шалагина, М. Ю. Соловьева ; под редакцией Н. Н. Ласькова. – Пенза : Приволжский Дом знаний, 2013. – С. 39–41.

2. СП 260.1325800.2016. Конструкции стальные тонкостенные из холодногнутой оцинкованной профилей и гофрированных листов. Правила проектиро-

вания : утвержден Минстрой России 3.12.2016 № 881/пр. : введен 4.06.2017. – Москва. – 116 с.

3. Каберов, Д. А. Оценка несущей способности и жесткости балок из тонкостенных оцинкованных профилей / Д. А. Каберов // XII Ежегодная научная сессия аспирантов и молодых ученых. Материалы межрегиональной научной конференции : в 2 томах. – Вологда : ВоГУ. – Т. 1. – 2018. – С. 225–228.

4. Белкина, Е. И. Сравнительный анализ методик расчета поперечной рамы мансардного этажа из холодногнутой оцинкованной термопрофилей / Е. И. Белкина // X Ежегодная научная сессия аспирантов и молодых ученых. Материалы межрегиональной научной конференции : в 2 томах. – Вологда : ВоГУ. – Т. 1. – 2016. – С. 225–228.

5. Немкова, И. С. Статистический анализ свойств материала и обоснование расчетных сопротивлений гнутых профилей для строительных металлических конструкций : специальность 05.23.01 : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Немкова Ирина Сергеевна. – Москва, 1984. – 157 с.

6. ГОСТ 14918-80. Сталь тонколистовая оцинкованная с непрерывных линий. Технические условия. Дата введения 01.07.81. Дата актуализации 01.06.2019. – 12 с.

7. ГОСТ 11701– 84. Металлы. Методы испытаний на растяжение тонких листов и лент. Дата введения 01.01.86. Дата актуализации 01.06.2019. – 24 с.

8. ГОСТ 21318-75. Измерение микротвердости царапанием алмазными наконечниками. Дата введения 01.07.1976. Дата актуализации 01.02.2020. – 28 с.

9. Рекомендации по проектированию строительных конструкций из стальных гнутых профилей. – Научно-технический отчет / ЦНИИПСК ; Руководитель темы И. В. Левитанский. – Тема 75-55-75, № ГР 78010390, инв. № Б 646097. – Москва, 1977. – 60 с.

10. Козлов, А. Г. К вопросу теоретического определения предела текучести зоны деформации гнутого профиля / А. Г. Козлов // Строительство в районах Восточной Сибири и Крайнего Севера. – Красноярск, 1976. – № 39. – С. 41–52.

11. Деренковский, В. М. Учет упрочнения материала в стальных гнутых профилях / В. М. Деренковский // Разработка методов расчета и исследование действительной работы строительных металлоконструкций / ЦНИИПСК им. Мельникова. – Москва, 1983. – С. 32–37.

12. Деформационное упрочнение металла при изгибе. – Текст : электронный // Блог Александра Воробьева. – 2016. – URL: <http://al-vo.ru/mekhanika/deformacionnoe-uprochnenie-metalla-pri-izgibe.html> (дата обращения: 10.06.2021).

I.S. Kazakova

Vologda State University

ACCOUNTING FOR STEEL HARDENING IN THIN-WALLED COLD-FORMED PROFILES

The article presents an experimental and theoretical study of the hardening of steel by the cross-section of thin-walled cold-formed profiles and the determination of the hardening coefficient of the profile material.

Thin-walled cold-formed profiles, material hardening, experimental and theoretical study, hardening coefficient.