

Вестник Евразийской науки / The Eurasian Scientific Journal <https://esj.today>

2020, №6, Том 12 / 2020, No 6, Vol 12 <https://esj.today/issue-6-2020.html>

URL статьи: <https://esj.today/PDF/63SAVN620.pdf>

**Ссылка для цитирования этой статьи:**

Корсун Н.Д., Простакишина Д.А. Адаптация методики и анализ результатов лабораторных испытаний прочности стали тонкостенного холодногнутого профиля // Вестник Евразийской науки, 2020 №6, <https://esj.today/PDF/63SAVN620.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ.

**For citation:**

Korsun N.D., Proskishina D.A. (2020). Adaptation of the methodology and analysis of laboratory testing of the strength of cold-formed thin-walled steel. *The Eurasian Scientific Journal*, [online] 6(12). Available at: <https://esj.today/PDF/63SAVN620.pdf> (in Russian)

УДК 624.07

ГРНТИ 67.11.35

**Корсун Наталья Дмитриевна**

ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет», Тюмень, Россия  
Профессор кафедры «Строительные конструкции»  
Кандидат технических наук  
E-mail: korsunnd@tyuiu.ru

**Простакишина Дарья Анатольевна**

ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет», Тюмень, Россия  
Аспирант  
E-mail: prostakishinada@tyuiu.ru

## **Адаптация методики и анализ результатов лабораторных испытаний прочности стали тонкостенного холодногнутого профиля**

**Аннотация.** Данная статья отражает результаты испытаний прочности стали тонкостенного холодногнутого профиля прямым методом на растяжение и косвенным методом твердметрии. Также в статье представлен процесс и результаты адаптации стандартных методик испытаний для возможности применения их к тонкостенным элементам. В первой части публикации приведено обоснование актуальности темы исследования и проблематика, которая заключается в отсутствии исследований по определению механических свойств стали тонкостенного профиля с угломгиба отличным от 90 градусов, а также в большом разбросе значений коэффициентов упрочнения, полученными другими авторами. Выполнен обзор исследований по тематике. Во второй части публикации приведено обоснование методов и методик, использованных для проведения исследования, описание объекта исследования и используемого оборудования. Исследование выполнено на полномасштабной выборке: авторами выполнено 1560 замеров твердости, более 300 образцов испытано на растяжение. В качестве результатов приведены полученные значения твердости для характерных зон профиля, временного сопротивления и предела текучести. Определены коэффициенты упрочнения для каждой из зон. Приведены зависимости между механическими свойствами стали и твердостью поверхности. В заключительной части представлены выводы, сделанные авторами, в ходе адаптации методики и по результатам исследования. Полученные результаты исследования являются новыми. Коэффициенты упрочнения могут быть использованы при оценке несущей способности стальных тонкостенных элементов. Полученные зависимости между твердостью поверхности образца и механическими свойствами стали, а также выводы,

сделанные авторами в ходе адаптации стандартных методик испытаний, могут быть использованы для корректного определения марки стали и ее свойств косвенным методом.

**Ключевые слова:** стальные тонкостенные профили; легкие стальные тонкостенные конструкции; холодногнутые профили; механические свойства тонкостенной стали; неравномерное распределение механических свойств по сечению; метод твердометрии; испытания на растяжение

## Введение

Строительство с применением металлических конструкций является показателем устойчивого развития отрасли. На сегодняшний день в России на основе металлического каркаса построено 13 % зданий, однако, анализируя преимущества применения металлокаркаса, можно прогнозировать рост востребованности металлических конструкций в ближайшем будущем. В рамках устойчивого развития и использования энергоэффективных материалов и конструкций актуальным является применение легких стальных тонкостенных конструкций (далее ЛСТК).

Применении стальных тонкостенных конструкций получило свое развитие в отечественной строительной отрасли только в конце 20-го века [1], однако, за последние шесть лет объем строительства с использованием ЛСТК-профилей вырос в четыре раза [2].

Стальные тонкостенные конструкции представляют собой элементы, толщиной менее четырех мм, технология их изготовления – путем холодногогиба – более энергоэффективна и экологична в сравнении с производством горячекатаного проката, а строительство с их применением является менее затратным, поскольку не требует применения сложной строительной техники.

Технология изготовления стальных тонкостенных профилей путем холодногогиба влечет за собой особенности работы тонколистовых элементов. Во-первых, влияние оказывает высокая гибкость элементов сечения, которая приводит к изменению формы сечения и повышенной деформативности при действии сжимающих напряжений. Во-вторых, при холодном деформировании металла в зонегиба формируется наклеп, характеризующийся повышением прочности материала и снижением пластичности.

Исследования в области работы тонколистовых элементов направлены на уточнение методики расчета с учетом факторов геометрической изменчивости и физической неравномерности. Исследования форм потери устойчивости тонкостенных профилей нашли отражение в нормативных документах, что нельзя сказать о неравномерном распределении механических свойств по сечению холодногнутого профиля. СП 260.1325800.2016 «Конструкции стальные тонкостенные из холодногнутых оцинкованных профилей и гофрированных листов» регламентирует возможность учета неравномерного распределения механических свойств по сечению профиля, но предлагает делать это на основе

экспериментальных данных, что весьма трудоемко. Коэффициенты упрочнения и методика их учета в своде правил отсутствуют.

В области изучения механических свойств стали гнутого профиля известны работы зарубежных и отечественных исследователей. G. Winter, K.W. Karren, S.J. Britvec, J. Uribe и A. Chajes [3; 4] разработали методику расчета коэффициента упрочнения, которая была скорректирована А.Г. Козловым [5], а позднее В.М. Деренковским [6; 7]. Последний предложил учитывать влияние коэффициента упрочнения в зависимости от вида нагружения. Позднее И.С. Немковой был проведен статистический анализ свойств сталей и обоснование расчетных сопротивлений в холодногнутом профиле. В работе И.С. Немковой было проведено исследование профилей швеллерного и уголкового сечений с толщиной от 2,5 до 6 мм. Результаты исследований показали, что у каждого холодногнутого профиля можно выделить три зоны упрочнения: уголгиба (упрочнение составляет от 40 до 60 %), кромки и участки, прилегающие к углугиба (упрочнение составляет от 15 до 25 %), плоские участки (упрочнение составляет от 2 до 8 %). Также, в работе было установлено, что упрочнение вблизи угловгиба распространяется на расстояние приблизительно равное  $3t$ . При этом Н.И. Каменщиковым [8] на основании сравнения результатов ударной вязкости стали плоских частей сечения и местгиба был сделан вывод о снижении сопротивляемости стали хрупкому разрушению в местах наклепа. В исследованиях Г.А. Арктикова [9] в области изменения механических свойств сечения профилированных профилей было установлено, что предел текучести различных участков увеличивается от 20 до 100 %. Дальнейшая работа исследователя заключалась в изучении влияния металлургических и технологических факторов изготовления гнутосварных профилей на изменение физико-механических характеристик материала профиля. Наиболее актуальными являются исследования И.В. Астахова [10], автором предложено деление профиля на зоны с увеличением предела текучести в сторону линиигиба, максимальное увеличение для зоныгиба составляет 60 %. Экспериментальное исследование механических свойств тонколистовой стали при повышенных температурах проводили А. Landesmann, F.C.M. Silva, E.M. Batista [11], в своей работе исследователи разрушающим методом испытывали образцы листового тонкостенного проката из стали марки 354 при температурах 20–600 °С. В результате проведенного эксперимента были рассчитаны коэффициенты снижения механических свойств стали при различных температурах среды. Полученные результаты были сопоставлены с результатами, достигнутыми другими учеными [12–16].

Исходя из изученного материала, можно сделать вывод об актуальности данной темы.

Проблематика темы на сегодняшний день обусловлена следующими неразрешенными вопросами:

- влияние углагиба отличного от 90 градусов на упрочнение стали тонкостенного холодногнутого профиля;
- уточнение количества зон по сечению профиля, их ширины и коэффициентов упрочнения. Зонирование профиля является наиболее распространенной методикой, однако, количество зон, численное значение ширины каждой из зон и коэффициенты упрочнения не согласовываются между собой и имеют широкий разброс значений.

На основании выше сказанного была сформулирована цель исследования: с помощью лабораторных испытаний установить закономерность изменения прочностных характеристик стали гнутого профиля в местахгиба (под углом 90° и под углом свыше 90°), в прилегающей зоне, и на плоских участках сечения.

### Материалы и методы исследования

В качестве объекта исследования были приняты образцы тонкостенного сигма-профиля толщиной 2,5 мм (рис. 1) из стали марки 350, номинальные значения показателей материала приведены в таблице 1.

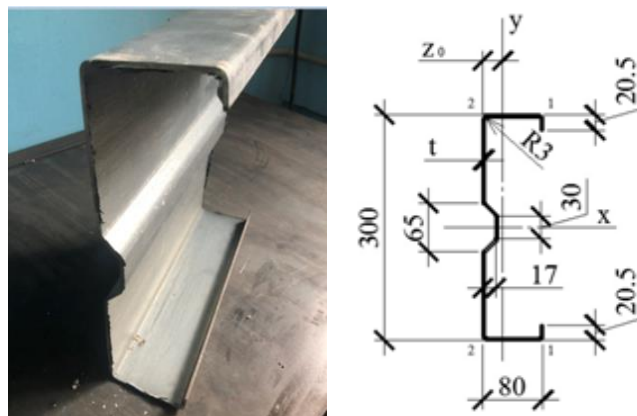


Рисунок 1. Фрагмент сигма-профиля и его геометрические размеры (выполнено авторами)

Таблица 1

#### Механические свойства проката

Марка проката	Временное сопротивление разрыву $\sigma_b$ , Н/мм <sup>2</sup>	Предел текучести $\sigma_{0.2}$ , Н/мм <sup>2</sup>	Относительное удлинение $\delta$ , % для проката толщиной 2,5 мм
350	не менее 420	не менее 350	не менее 16

Исходя из результатов, полученных ранее другими исследователями были определены шесть характерных зон сечения профиля и их размеры (рис. 2): зоны 1 и 2 являются местами изгиба под прямым и тупым углами, зоны 3 и 5 – участки, прилегающие к местам изгиба на расстоянии до  $bt$ , где  $t$  – толщина стенки профиля, зоны 4 и 6 – прямолинейные участки.

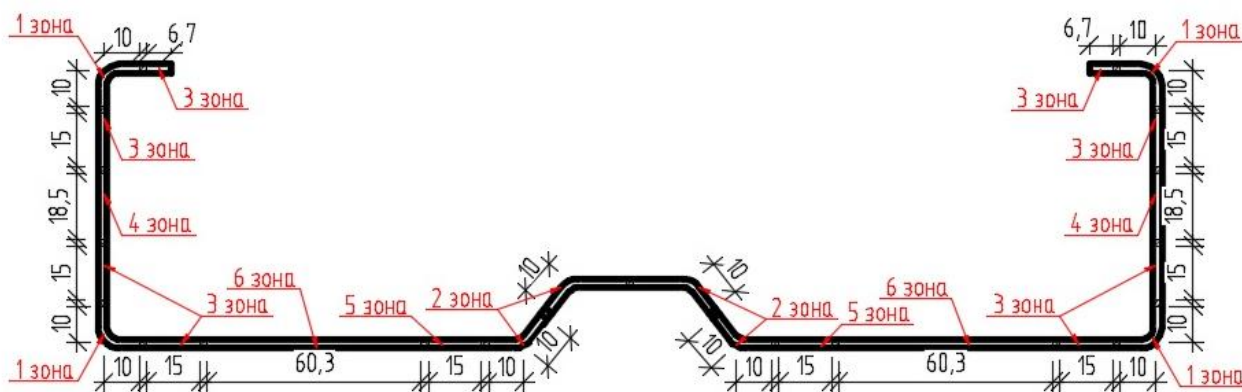
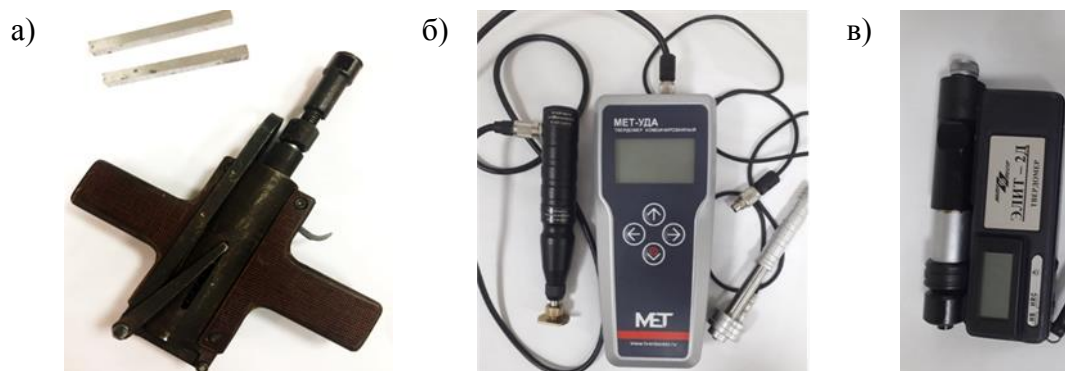


Рисунок 2. Характерные зоны сечения для учета механических свойств материала (выполнено авторами)

В качестве методов исследования использовались косвенный неразрушающий метод твердометрии и прямой разрушающий метод.

Косвенный метод испытания заключается в определении механических свойств стали путем измерения твердости поверхности по шкале Бринелля. В ходе работы была выявлена неприменимость стандартных методов измерения твердости и необходимость их адаптации к образцам тонкостенной стали. Для измерения твердости поверхности были применены следующие группы методик:

1. Измерение твёрдости поверхности с использованием ударного твердомера ВПИ-ЗМБ на образцах стали, вырезанных по сечению цельного профиля в соответствии с зонированием (рис. 3а).
2. Измерение твёрдости поверхности с использованием ультразвукового и динамического датчиков комбинированного твердомера МЕТ-УДА на образцах цельного профиля (рис. 3б).
3. Измерение твёрдости поверхности с использованием портативного динамического твердомера ЭЛИТ-2Д на образцах стали, вырезанных по сечению цельного профиля в соответствии с зонированием (рис. 3в).



**Рисунок 3.** Приборы для определения механических свойств стали методом твердометрии: а) ударный твердомер ВПИ-ЗМБ; б) комбинированный твердомер МЕТ-УДА; в) портативный динамический твердомер ЭЛИТ-2Д (выполнено авторами)

4. Измерение твёрдости поверхности портативным твердомером ЭЛИТ-2Д на цельных фрагментах образцов сигма-профилей (рис. 4).



**Рисунок 4.** Подготовка цельного образца для испытания неразрушающим методом (выполнено авторами)

В качестве основной методики измерения изменения твёрдости поверхности тонкостенного образца была использована методика №4. Поверхность образцов профиля предварительно очищалась от цинкового покрытия, образцы заполнялись внутри тяжелым бетоном для обеспечения массивности образца. Для проведения замеров в соответствии с выделенными зонами поверхность разлиновывалась. В ходе исследования было выполнено 1560 замеров твердости поверхности.

Для испытания прямым разрушающим методом были вырезаны стальные полосы, соответствующие характерным зонам. Адаптация стандартной методики испытаний на растяжение заключалась в подготовке образцов для проведения испытаний. Всего для проведения испытаний на растяжение было изготовлено 500 образцов, 300 из которых попали

в выборку, по 50 образцов для каждой характерной зоны сигма-профиля. Растяжение образцов осуществлялось на разрывной машине И1147М-50-01-1 (рис. 5).



*Рисунок 5. Образцы для испытания неразрушающим методом и процесс проведения эксперимента (выполнено авторами)*

Статистическая обработка результатов испытаний производилась стандартным методом с определением сводных статистических характеристик: математическое ожидание, дисперсия, среднее квадратичное отклонение, коэффициент вариации. По составному критерию установлено, что результаты испытаний для всех шести зон принадлежат нормальному распределению. Определены теоретические значения функции распределения.

### Результаты исследований

Статистическая обработка результатов экспериментальных исследований показала, что средние величины временного сопротивления образцов для каждой характерной зоны профиля с учетом доверительных границ случайной погрешности  $\epsilon$  равны:

$$\sigma_{в1} = 517,05 \pm 21,20 \text{ Н/мм}^2;$$

$$\sigma_{в2} = 491,27 \pm 16,24 \text{ Н/мм}^2;$$

$$\sigma_{в3} = 475,30 \pm 20,01 \text{ Н/мм}^2.$$

Для величины предела текучести были получены следующие результаты:

$$\sigma_{т1} = 495,91 \pm 32,51 \text{ Н/мм}^2;$$

$$\sigma_{т2} = 470,31 \pm 25,02 \text{ Н/мм}^2;$$

$$\sigma_{т3} = 430,25 \pm 18,72 \text{ Н/мм}^2.$$

Исходя из полученных результатов были определены коэффициенты упрочнения стали для характерных зон профиля (рис. 2). Максимальное упрочнение наблюдается в зонегиба под углом 90 градусов (зона №1). Значения коэффициентов упрочнения по временному сопротивлению и пределу текучести согласуются со значениями, полученными другими авторами, однако, упрочнение по временному сопротивлению их превышает. Для зоныгиба под тупым углом (зона №2) результаты получены впервые.

Для величины твердости поверхности образцов в ходе испытаний были получены следующие результаты:

$$HB_1 = 213 \pm 21,79 \text{ Н/мм}^2;$$

$$HB_2 = 208,14 \pm 14,17 \text{ Н/мм}^2;$$

$$HB_3 = 192,06 \pm 7,83 \text{ Н/мм}^2;$$

$$HB_4 = 192,52 \pm 15,68 \text{ Н/мм}^2;$$

$$HB_5 = 190,06 \pm 15,01 \text{ Н/мм}^2;$$

$$HB_6 = 190,85 \pm 11,34 \text{ Н/мм}^2.$$

Коэффициенты упрочнения стали для предела текучести  $K_{Т\sigma}$ , временного сопротивления  $K_{B\sigma}$  и твердости по Бринеллю  $K_{HB\sigma}$  всех зон сечения приведены в таблице 2.

Таблица 2

**Коэффициенты упрочнения стали для временного сопротивления, предела текучести и твердости по Бринеллю**

№ зоны	1	2	3	4	5	6
$K_{Т\sigma}$	1,324	1,272	1,176	1,0405	1,054	1,055
$K_{B\sigma}$	1,18	1,13	1,08	1,04	1,05	1,04
$K_{HB\sigma}$	1,17	1,15	1,08	1,04	1,04	1,04

Полученные результаты позволили выявить эмпирическую зависимость между нормативным временным сопротивлением и твердостью по Бринеллю для портативного твердомера ЭЛИТ-2Д:

$$\sigma_B = 2,5 \cdot HB.$$

Также была получена зависимость между нормативным значением предела текучести стали и твердостью по Бринеллю для портативного твердомера ЭЛИТ-2Д:

- для прямолинейного участка профиля

$$\sigma_T = 2,1 \cdot HB;$$

- для зоныгиба

$$\sigma_T = 2,3 \cdot HB_{\gamma}$$

### Обсуждения и выводы

Необходимость адаптации методики испытания путем определения твердости поверхности была обоснована следующими характерными проблемами:

- твердомер ударного типа не пригоден для проведения испытаний с большой выборкой образцов. Технология проведения испытания заключается в сравнении отпечатков от удара на испытываемом и эталонном образцах, поэтому выборка ограничивается количеством эталонных образцов, а также факторами, влияющими на безопасность работ;
- использование ультразвукового датчика твердомера МЕТ-УДА требует высокой точности приложения насадки и определенного усилия вдавливания этой насадки, в противном случае наблюдается большой разброс результатов замеров;
- при измерении твердости прибором динамического действия ЭЛИТ-2Д, а также динамическим датчиком комбинированного прибора МЕТ-УДА тонкостенные образцы необходимо притирать через слой консистентной смазки к более массивной опоре, а криволинейные образцы должны к ней плотно прилегать, что

достаточно трудоемко. В противном случае между металлом образца и поверхностью притирания образуются воздушные поры, что влияет на корректность полученных результатов.

Таким образом, в качестве наиболее приемлемой методики для определения твердости тонкостенного металла выбрано определение твердости при помощи прибора твердомера динамического типа ЭЛИТ-2Д на цельных образцах, массивность которых обеспечивается за счет залитого в них тяжелого бетона, отсутствие воздушных пор в зонахгиба обеспечивается достаточной провибрированностью бетонной смеси.

При испытании образцов на растяжение возникли проблемы с подготовкой образцов, в частности, с их нарезкой из элемента профиля, так как станки плазменной и лазерной резки металла предназначены для работы только с листовым прокатом, для гнутого профиля применим только ручной способ. Кроме выше сказанного, для испытания образцов линиигиба на растяжение требуется подготовка концов образца для крепления в захватах разрывной машины.

Однако, проведенные полномасштабные серии испытаний разрушающим и неразрушающим методами позволили подтвердить наличие зон упрочнения металла в местах холодногогиба под прямым и тупым углами в сечении профиля.

Значения коэффициентов упрочнения, полученные прямым и косвенным методом, хорошо согласуются между собой, а также с результатами, представленными в исследованиях других авторов, что подтверждает их корректность и достоверность.

По результатам исследования была выведена эмпирическая зависимость между значениями механических характеристик стали и твердости поверхности по Бринеллю для тонкостенного образца. Зависимость между твердостью поверхности и временным сопротивлением прямая для всех зон образца. Для предела текучести данная зависимость отлична для прямых и криволинейных образцов. Полученные зависимости для тонкостенных профилей существенно отличаются от зависимости, полученной для прокатных профилей и представленной в МДС 13-20.2004 «Комплексная методика по обследованию и энергоаудиту реконструируемых зданий».

Подобные исследования не проводились ранее для сигма-профилей или профилей, имеющих углыгиба более, чем 90 градусов. Полученные значения коэффициентов упрочнения позволяют изыскивать дополнительные резервы несущей способности тонкостенных элементов и могут быть использованы при их расчете. Полученные зависимости механических характеристик и твердости поверхности, а также выводы, сделанные авторами, в ходе адаптации стандартной методики проведения испытаний, могут быть использованы для корректного определения марки стали и ее механических характеристик косвенным методом.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Илюхина, Е.А. Мировая практика применения технологии ЛСТК в строительстве / Е.А. Илюхина, А.А. Соболев // Ползуновский альманах. – 2018. – С. 90–93.
2. Любавская, И.В. Технологичность изготовления ЛСТК / М.В. Сотников, И.В. Любавская // Материалы научной конференции студентов и аспирантов Липецкого государственного технического университета – Липецк – 2017. – С. 414–416.
3. Britvec, S.J. Effects of cold work in cold-formed steel structural members / S.J. Britvec, A. Chajes, K.W. Karren, J. Uribe, G. Winter. – Ithaca, New York: Cornell University. – 1970. – 199 pp.



4. Karren, K.W. Fourth progress report on investigation of effects of cold forming on mechanical properties / Kenneth W. Karren, George Winter. – Ithaca, New York: Cornell University. – 1964. – 157 pp.
5. Козлов, А.Г. К вопросу теоретического определения предела текучести зоны деформации гнутого профиля / А.Г. Козлов // Строительство в районах Восточной Сибири и Крайнего Севера: Сборник трудов Красноярский ПРОМСТРОЙНИИПРОЕКТ. – Красноярск, 1976. – № 39. – С. 43–52.
6. Деренковский, В.М. Определение несущей способности стержней из гнутых профилей при упругопластических деформациях / В.М. Деренковский // Прикладные проблемы прочности и пластичности. Статика и динамика деформируемых систем: Всесоюз. межвуз. сб. – Горький: Издательство ГГУ, 1982. – №62. – С. 107–111.
7. Деренковский, В.М. Учет упрочнения материала в стальных гнутых профилях / В.М. Деренковский // Разработка методов расчета и исследование действительной работы строительных металлоконструкций: Сборник научных трудов ЦНИИ Проектстальконструкция им. Мельникова. – Москва, 1983. – С. 32–37.
8. Каменщиков, Н.И. О выносливости и ударной вязкости металла холодногнутого профилей / Н.И. Каменщиков // Металлические конструкции и испытания сооружений: Межвузовский тематический сборник трудов №1 (134). – Ленинград, 1977. – С. 57–64.
9. Арктиков, Г.А. Влияние холодной формовки на механических свойства стали замкнутых гнутосварных профилей холодной формовки / Г.А. Арктиков, В.Ф. Беляев, Л.И. Гладштейн // Промышленное и гражданское строительство. – 1994. – №5. – С. 16–24.
10. Астахов, И.В. Пространственная устойчивость элементов конструкций из холодногнутого профилей / И.В. Астахов, Г.И. Белый // Монтажные и специальные работы в строительстве. – Москва. – 2006. – №9. – С. 21–25.
11. Landesmann A., Silva F.C.M., Batista E.M. Experimental Investigation of the Mechanical Properties of ZAR-345 Cold-Formed Steel at Elevated Temperatures. – 2014. – №17(4). – p. 1082–1092.
12. Ranawaka T and Mahendran M. Experimental study of the mechanical properties of light gauge cold-formed steels at elevated temperatures. Fire Safety Journal. – 2009. – 44(2). – p. 219–229.
13. Lee J., Mahendran M. and Makelainen P. Prediction of mechanical properties of light gauge steels at elevated temperatures. Journal of Constructional Steel Research. – 2003. – №59(12) – p. 1517–1532.
14. Kankanamge N.D. and Mahendran M. Mechanical properties of cold-formed steels at elevated temperatures. Thin-Walled Structures. – 2011. – №49(1). – p. 26–44.
15. Wei C. and Jihong Y. Mechanical properties of G550 coldformed steel under transient and steady state conditions. Journal of Constructional Steel Research. – 2012 – №73 – p. 1–11.
16. Chen J. and Young B. Experimental investigation of coldformed steel material at elevated temperatures. Thin-Walled Structures. – 2007. – №45(1). – p. 96–110.

**Korsun Natalya Dmitrievna**

Industrial university of Tyumen, Tyumen, Russia  
E-mail: korsunnd@tyuiu.ru

**Prostakishina Darya Anatolievna**

Industrial university of Tyumen, Tyumen, Russia  
E-mail: prostakishinada@tyuiu.ru

## **Adaptation of the methodology and analysis of laboratory testing of the strength of cold-formed thin-walled steel**

**Abstract.** This article reflects the results of testing the strength of cold-formed steel profiles. Tests were performed by direct tensile method and indirect hardness method. The article presents the process and results of adaptation of standard test methods for the possibility of their application to thin-walled elements. The first part of the publication provides a justification for the relevance of the research topic and the problematics, which consists in the absence of studies to determine the mechanical properties of steel with a thin-walled profile with a bending angle different from 90 degrees and in a wide range of hardening coefficients obtained by other authors. A review of the research on the topic is carried out. The second part of the publication provides a rationale for the methods and techniques used to conduct the research, a description of the research object and the equipment used. The study was carried out on a full-scale sample: the authors made 1560 hardness measurements, more than 300 samples were tested in tension. As the results, the obtained values of hardness for characteristic zones of the profile, tensile strength and yield strength are given. The hardening factors for each of the zones have been determined. The relationship between the mechanical properties of steel and surface hardness is given. In the final part, the conclusions made by the authors are presented during the adaptation of the methodology and according to the results of the study. The research results are new. Hardening factors can be used to assess the load-bearing capacity of thin-walled steel elements. The obtained dependences between the hardness of the sample surface and the mechanical properties of steel and the conclusions made by the authors during the adaptation of standard test methods can be used to correctly determine the steel grade and its properties by an indirect method.

**Keywords:** steel thin-walled profiles; light steel thin-walled structures; cold-formed profiles; mechanical properties of thin-walled steel; uneven distribution of mechanical properties over the cross section; hardness test; tensile test