

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

2021, №6, Том 13 / 2021, No 6, Vol 13 <https://esj.today/issue-6-2021.html>

URL статьи: <https://esj.today/PDF/38SAVN621.pdf>

**Ссылка для цитирования этой статьи:**

Корсун, Н. Д. Исследование напряженно-деформированного состояния стальных тонкостенных конструкций с учетом неравномерного распределения прочностных свойств стали по сечению профиля / Н. Д. Корсун, Д. А. Простакишина // Вестник евразийской науки. — 2021. — Т. 13. — № 6. — URL: <https://esj.today/PDF/38SAVN621.pdf>

**For citation:**

Korsun N.D., Prostakishina D.A. Study of the stress-strain state of thin-walled steel structures taking into account the uneven distribution of the strength properties of steel over the section of the profile. *The Eurasian Scientific Journal*, 13(6): 38SAVN621. Available at: <https://esj.today/PDF/38SAVN621.pdf>. (In Russ., abstract in Eng.).

**Корсун Наталья Дмитриевна**

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

**Простакишина Дарья Анатольевна**

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

## **Исследование напряженно-деформированного состояния стальных тонкостенных конструкций с учетом неравномерного распределения прочностных свойств стали по сечению профиля**

**Аннотация.** В публикации отражены результаты численного эксперимента оценки влияния упрочнения стали на несущую способность элементов из стальных тонкостенных профилей. Упрочнение тонкостенного металла в местахгиба является фактором, обоснованным технологией изготовления профилей, и влияющим на его напряженно-деформированное состояние. В первой части публикации приведено обоснование актуальности темы исследования и проблематика, которая заключается в отсутствии положений в нормативной литературе по учету неравномерного распределения механических свойств стали по сечению холодногнутого тонкостенного профиля. Приведены исследования авторов статьи и другие источники, на основании которых принималась схема распределения механических свойств стали по сечению для объекта исследования. Во второй части публикации приведено обоснование метода, использованного для проведения исследования, описание объекта исследования и расчетной схемы, основных расчетных предпосылок. В качестве объекта исследования использовался стальной тонкостенный сигма-профиль высотой сечения 300 мм, толщиной листа 2.5 мм. Исследование выполнено на трех группах образцов без упрочнения стали и с учетом упрочнения: длинных — 4500 мм, средней длины — 3000 мм, коротких — 1500 мм. В качестве результатов приведены эпюры распределения напряжений по сечению элементов, а также схемы деформирования. Выполнен сопоставительный анализ численных значений и качественного распределения. Сделаны выводы о существенном влиянии упрочнения стали на несущую способность длинного образца и образца средней длины: образцы работают более жестко, деформации уменьшаются в 3–5 раз, напряжения — в 1.5–3.5

раза. Сделан вывод о том, что упрочнение стали для короткого образца несущественно влияет на его несущую способность. Обозначены дальнейшие этапы проведения исследования.

**Ключевые слова:** стальные тонкостенные профили; легкие стальные тонкостенные конструкции; холодногнутые профили; механические свойства тонкостенной стали; неравномерное распределение механических свойств по сечению; численное моделирование

## Введение

Элементы из тонкостенных профилей широко используются при строительстве жилых и общественных зданий малой и средней этажности. В общем объеме строительства доля многоэтажных жилых и общественных зданий, выполненных на основе металлического каркаса из тонкостенных холодногнутых профилей, составляет порядка 30 % для стран Евросоюза, 60 % для США и Японии [1]. Величины показателя в мировой практике строительства связаны с известными для каркасов из тонкостенных профилей преимуществами, адаптированной для инженера нормативной базы, возможностью применения высокопрочных сталей, с пределом текучести до 550 МПа, малых толщин листового проката, до 1 мм, а также передовыми технологиями холодного гниба [2; 3]. Для отечественной индустрии доля применения тонкостенных профилей в строительстве составляет порядка 5 % [1]. При этом, основываясь на ежеквартальных аналитических отчетах Ассоциации Развития Стального Строительства (далее по тексту — АРСС) «Строительная отрасль и рынок металлоконструкций России», можно сделать вывод, что интерес к использованию металлических конструкций в целом растет: на первое полугодие 2021 года применение металлопроката строительного назначения увеличилось на 9 % при существенном увеличении его стоимости — до 50 %. При этом рост использования металлических конструкций наблюдается в сельскохозяйственной, пищевой, транспортной промышленности, а также для объектов медицинского назначения, где наиболее актуальны здания на основе легких быстровозводимых каркасов.

Основным сдерживающим фактором применения стальных тонкостенных профилей на территории России является ограниченная нормативная база проектирования конструкций, однако, возникает ряд вопросов, касающихся отдельных положений. В частности, п. 5.3.3 Свода Правил 260.1325800.2016 допускает учитывать изменчивость механических свойств стали по сечению профиля и учитывать данный фактор при расчете. Механические характеристики следует определять на основании экспериментальных данных, что требует больших трудозатрат. При этом положения по тому, каким образом необходимо учитывать зоны упрочнения, используя методику редуцированного сечения, в Своде Правил отсутствуют.

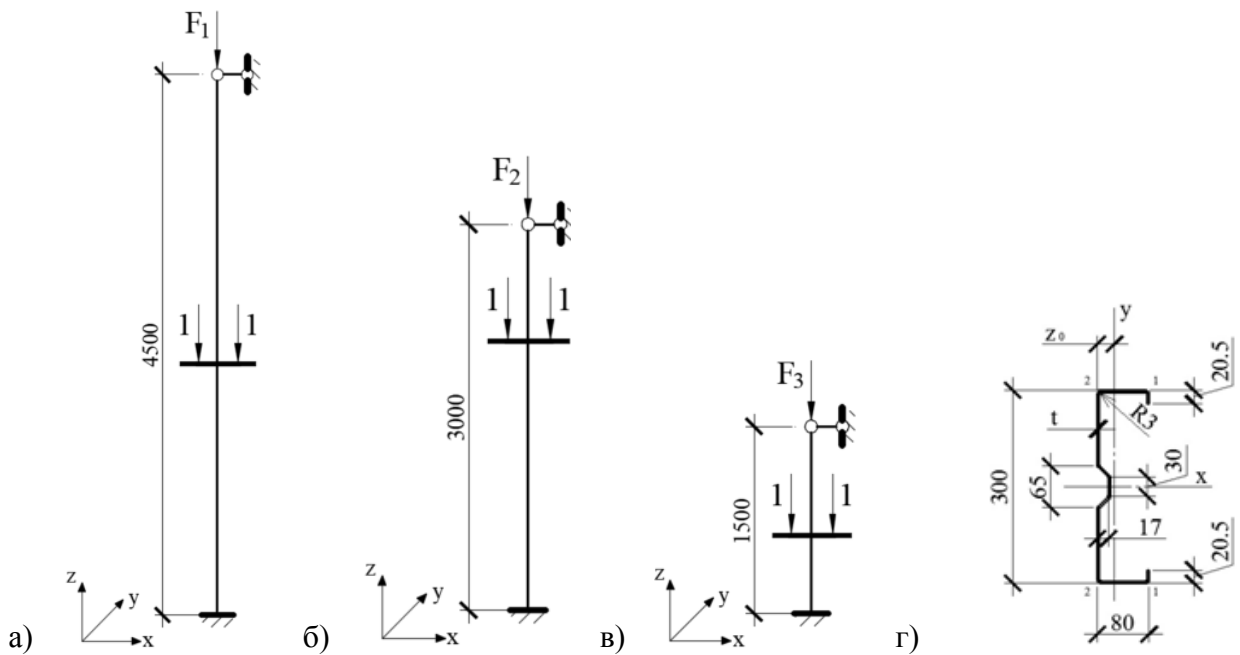
Ранее, на основании изученных работ [4–9], авторами публикации были выполнены лабораторные исследования по распределению механических свойств стали по сечению тонкостенного холодногнутого профиля на крупномасштабной выборке образцов.

Механические свойства определялись двумя методами: прямым на разрыв и косвенным методом твердометрии. Были выведены коэффициенты упрочнения стали для зон гниба, в том числе под тупым углом, и прилегающим к ним участкам, результаты исследования отражены в публикации [10].

В данной статье отражены результаты решения тестовой задачи по определению влияния упрочнения отдельных участков сечения на несущую способность образцов разной длины численным методом.

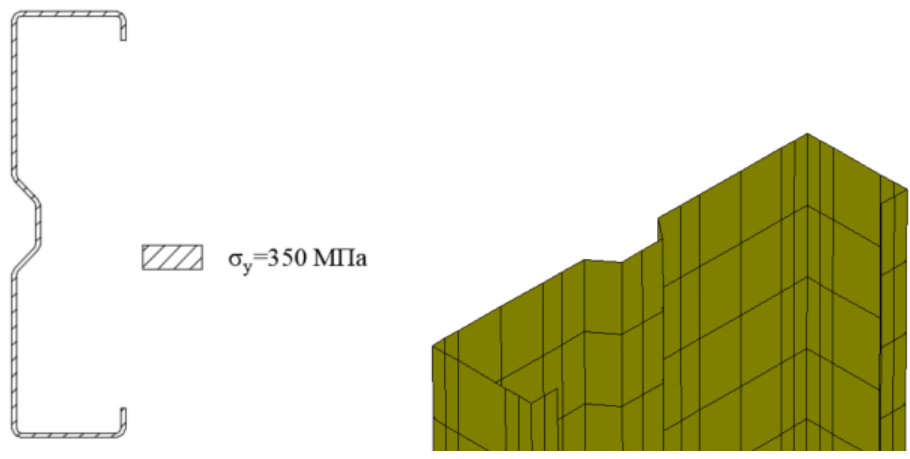
**Материалы и методы исследования**

Объектом исследования является одиночный стальной тонкостенный сигма-профиль высотой сечения 300 мм, толщиной листа 2.5 мм из стали марки 350. Для исследования были использованы образцы длиной 4500 мм (далее по тексту — Образец № 1), 3000 мм (далее по тексту — Образец № 2), 1500 мм (далее по тексту — Образец № 3). Опорное закрепление принято жестким, оголовка стойки — шарнирное. Образцы работают в условиях осевого сжатия. Расчетные схемы элементов и геометрическая схема сечения представлены на рисунке 1.

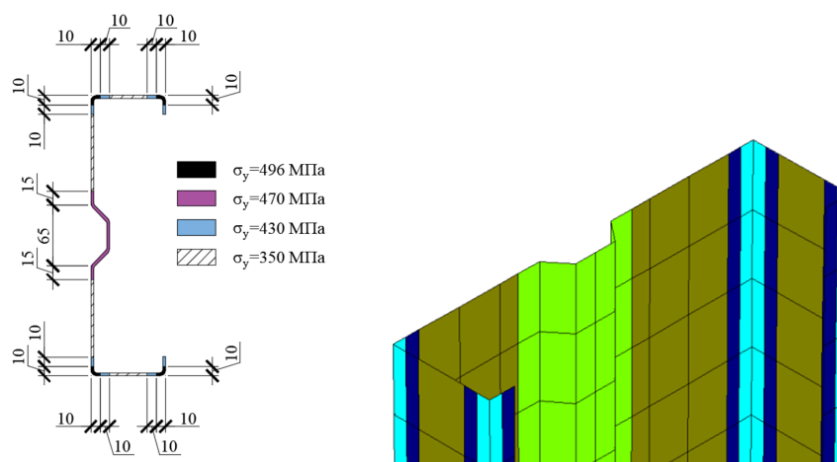


**Рисунок 1.** а) расчетная схема образца № 1; б) расчетная схема образца № 2; в) расчетная схема образца № 3; г) сечения профиля всех образцов (выполнено авторами)

Исследование проводилось для каждого образца без учета упрочнения стали и с учетом упрочнения стали. Для второго случая использовалась схема распределения механических свойств, принятая в соответствии с [10]. Сечение образцов делилось на 4 зоны: уголгиба 90 градусов, элемент жесткости стенки с прилегающими участками 15 мм с каждой стороны, прилегающие участки к углугиба 90 градусов, прямолинейные участки. Схемы зонирования сечений образцов представлены на рисунках 2, 3.



**Рисунок 2.** Схема сечения без учета упрочнения стали. Здесь и далее  $\sigma_y$  — предел текучести стали (выполнено авторами)

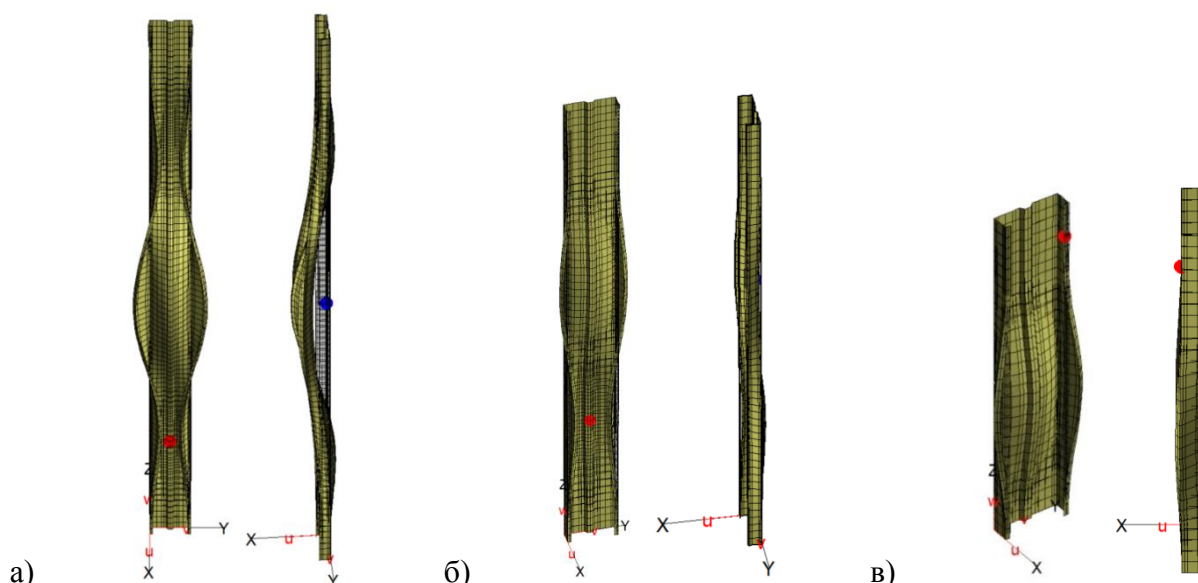


**Рисунок 3.** Схема сечения с учетом упрочнения стали (выполнено авторами)

Численный эксперимент производился с использованием программного комплекса Stark. В качестве конечного элемента принят гибридный высокоточный конечный элемент пластины, корректно работающий для тонких и толстых оболочек. В качестве материала для элементов применялся материал «арматурный слой», позволяющий учитывать предел текучести стали для элементов сечения каждой из зон.

Для верификации и последующей возможности использования данного материала для элементов модели решалась тестовая задача статического расчета в линейной постановке, по итогам которой был сделан вывод о сходимости результатов. Сходимость результатов для профиля с использованием материала «арматурный слой» и для профиля с использованием изотропного материала составила 97 %, что определило дальнейшее использование материала «арматурный слой» для решения статической задачи в нелинейной постановке.

Численное значение нагрузки определялось исходя из расчета на устойчивость. Так, критическая нагрузка первой формы потери устойчивости для образца № 1 составила 25.5 тс; для образца № 2 — 27 тс; для образца № 3 — 33.1 тс. Качественно для образца № 1 преобладающей является общая форма потери устойчивости, для образцов № 2 и № 3 — потеря устойчивости формы профиля и местная потеря устойчивости (рис. 4).



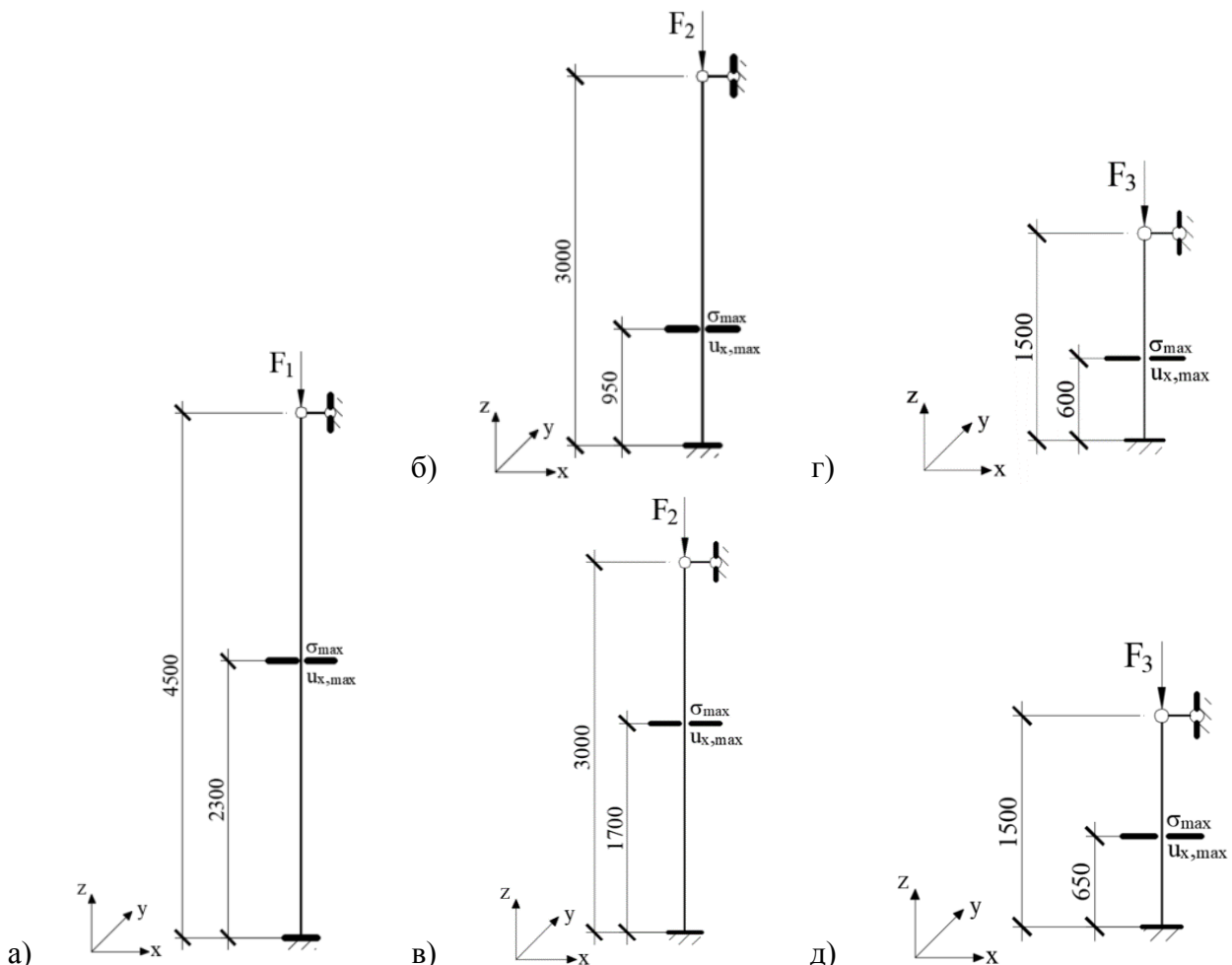
**Рисунок 4.** Первая форма потери устойчивости:  
а) образца № 1; б) образца № 2; в) образца № 3 (выполнено авторами)

Для анализа закритической работы элементов нагрузка была увеличена для образца № 1 до  $F_1 = 32.2$  тс; для образца № 2 до  $F_2 = 34$  тс, для образца № 3 до  $F_3 = 42$  тс.

Для моделирования корректной работы стойки в составе каркаса нагрузка прикладывалась узлам стенки, перемещения узлов на высоту 300 мм от оголовка были объединены. статический расчет производился в нелинейной постановке шагово-итерационным методом.

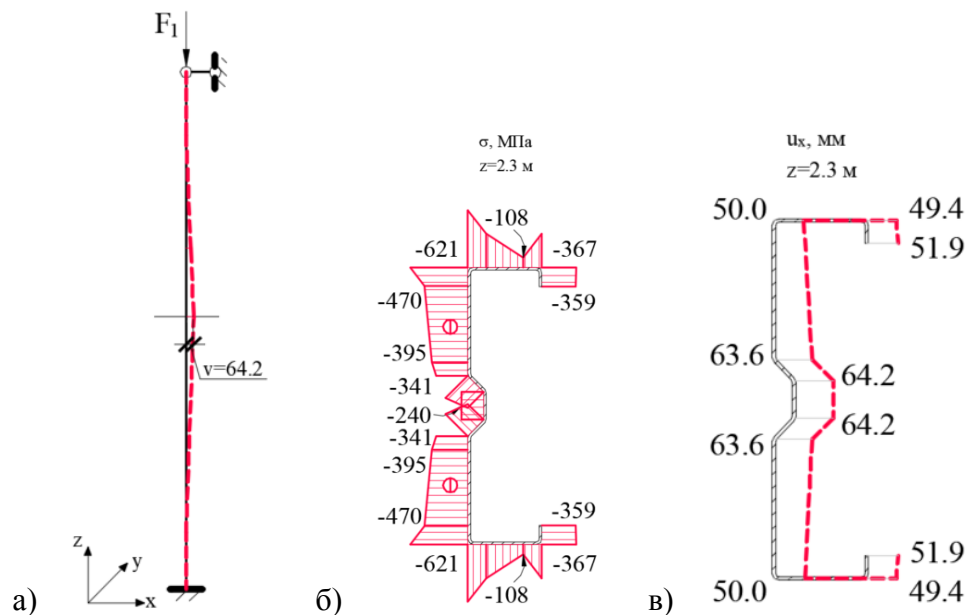
### Результаты исследований

Критериями оценки являются напряжения и деформации образцов с упрочнением и без упрочнения материала. Анализ производился для сечения образца: с наибольшими деформациями и напряжениями. Для образца № 1 максимальные значения напряжений и деформаций наблюдаются в сечении, расположенном на расстоянии 2.3 метра от опоры для обоих случаев. Для образца № 2 без учета упрочнения в сечении на расстоянии 0.95 метров от опоры; с упрочнением 1.7 метров от опоры. Для образца № 3 без учета упрочнения максимальные в сечении на расстоянии 0.6 метров от опоры, с упрочнением — 0.65 метров от опоры. Схемы расчетных сечений для каждого из образцов представлены на рисунке 5.



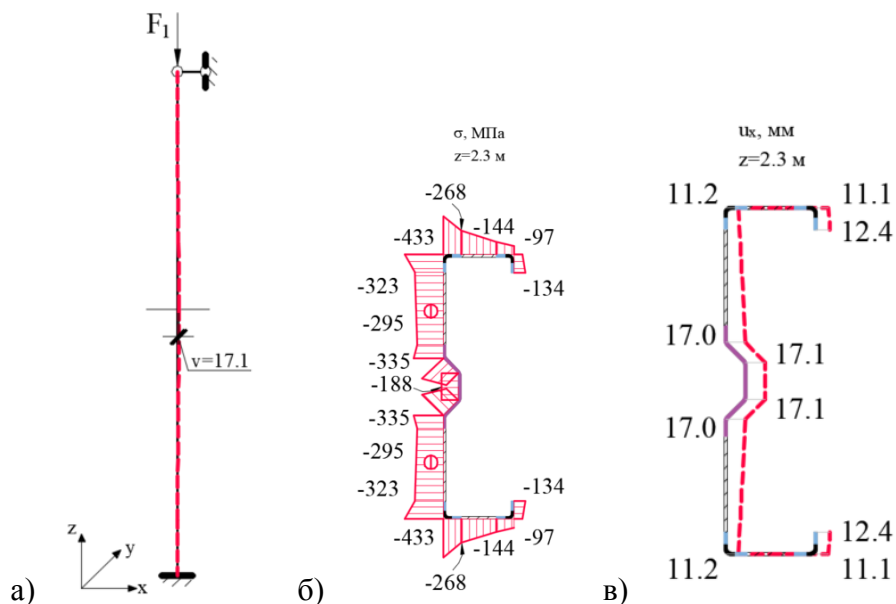
**Рисунок 5.** Схемы расчетных сечений образцов: а) образца № 1 с учетом упрочнения стали и без учета; б) образца № 2 без учета упрочнения стали; в) образца № 2 с учетом упрочнения стали; г) образца № 3 без учета упрочнения стали; д) образца № 3 с учетом упрочнения стали (выполнено авторами)

Для образца № 1 без упрочнения при заданной нагрузке наблюдается переход в зону пластичности элементов стенки, для угловых зон величина напряжений превышает значение предела прочности материала. Деформации по оси  $x$  — в плоскости наименьшей жесткости элемента составляют 64.2 мм (рис. 6).



**Рисунок 6.** Образец № 1 без учета упрочнения стали. а) деформированная схема; б) эпюра напряжений по сечению; в) схема перемещений сечения (выполнено авторами)

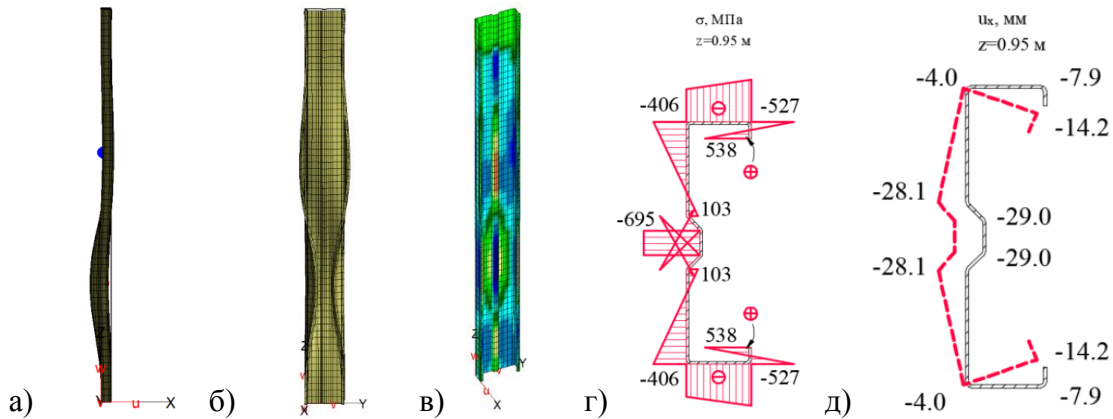
Для образца № 1 с учетом упрочнения материала все элементы сечения работают упруго, перехода в зону пластичности не наблюдается. Максимальные перемещения составляют 17.1 мм (рис. 7).



**Рисунок 7.** Образец № 1 с учетом упрочнения стали: а) деформированная схема; б) эпюра напряжений по сечению; в) схема перемещений сечения (выполнено авторами)

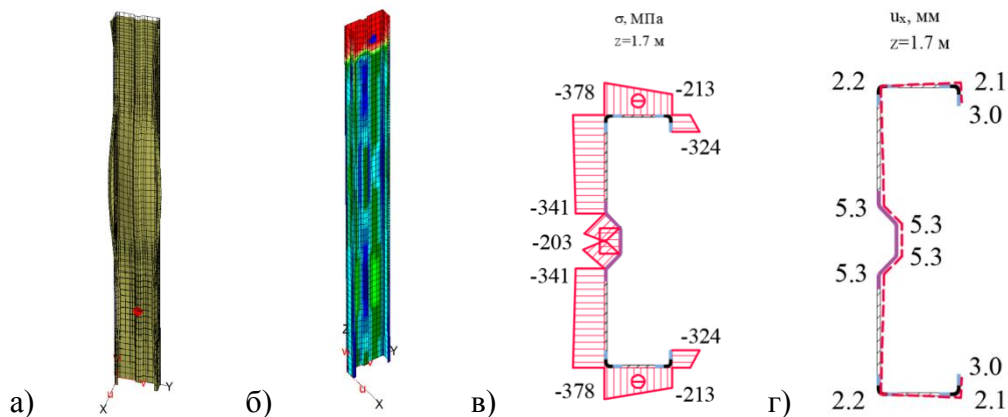
Для образца № 2 без учета упрочнения стали величина напряжений превышает предел прочности. Помимо деформаций в плоскости наименьшей жесткости, наблюдается деформирование формы сечения. Максимальные деформации составили 29.0 мм в направлении оси  $x$  (рис. 8).



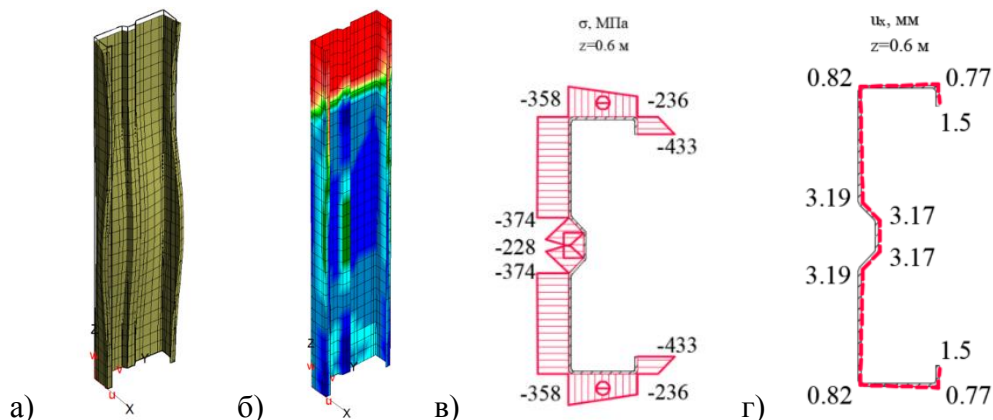


**Рисунок 8.** Образец № 2 без учета упрочнения стали: а) деформированная схема в плоскости наименьшей жесткости; б) деформированная схема в плоскости наибольшей жесткости; в) поля напряжений элемента; г) эпюра напряжений по сечению; д) схема перемещений сечения. К схемам «а» и «б» применен масштабный коэффициент отображения (выполнено авторами)

Для образца № 2 с учетом упрочнения стали все элементы сечения работают в упругой зоне. Наблюдаются деформации в плоскости наименьшей жесткости, несущественное деформирование формы сечения. Максимальные деформации составили 5.3 мм в направлении оси x (рис. 9).



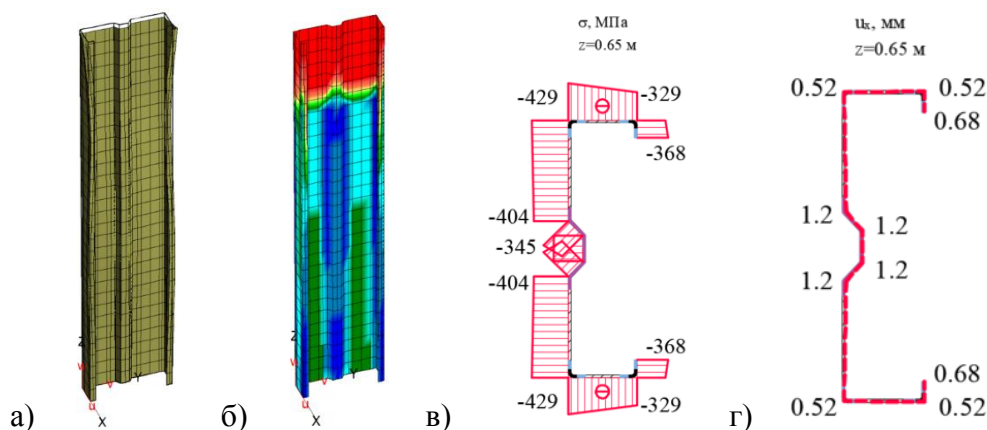
**Рисунок 9.** Образец № 2 с учетом упрочнения стали: а) деформированная схема б) поля напряжений элемента; в) эпюра напряжений по сечению; г) схема перемещений сечения. К схеме «а» применен масштабный коэффициент отображения (выполнено авторами)



**Рисунок 10.** Образец № 3 без учета упрочнения стали: а) деформированная схема б) поля напряжений элемента; в) эпюра напряжений по сечению; г) схема перемещений сечения. К схеме «а» применен масштабный коэффициент отображения (выполнено авторами)

Для образца № 3 без учета упрочнения стали элементы стенки сечения переходят в зону пластичности, для крайних элементов отгиба напряжения превышают предел прочности. Наблюдаются деформации в плоскости наименьшей жесткости, несущественное деформирование формы сечения. Максимальные деформации составили 3.17 мм в направлении оси x (рис. 10).

Для образца № 3 с учетом упрочнения стали все элементы сечения переходят в зону пластичности. Наблюдаются деформации в плоскости наименьшей жесткости, несущественное деформирование формы сечения. Максимальные деформации составили 1.2 мм в направлении оси x (рис. 11).



**Рисунок 11.** Образец № 3 с учетом упрочнения стали: а) деформированная схема б) поля напряжений элемента; в) эпюра напряжений по сечению; г) схема перемещений сечения. К схеме «а» применен масштабный коэффициент отображения (выполнено авторами)

### Обсуждения и выводы

Основными причинами необходимости учета упрочнения участков сечения тонкостенного профиля являются возможные изыскания резервов несущей способности элементов, а также уточнение их реальной работы при воздействии осевой сжимающей силы.

По результатам исследования были сделаны следующие выводы:

- для длинных образцов (образец № 1) учет упрочнения материала ведет к тому, что образец работает более жестко, деформации снижаются более, чем в 3 раза. Все элементы сечения работают в упругой зоне, перехода в зону пластичности не наблюдается, качественно картина эпюр напряжений по сечению сохраняется, при этом численно значения уменьшаются в 1.5 раза;
- для образцов средней длины (образец № 2) происходят качественные изменения картины деформаций: деформация формы профиля для элемента без упрочнения, линейные перемещения сечения для элемента с учетом упрочнения. Численно значения деформаций снижаются более, чем в 5 раз. Максимальные напряжения в элементе без учета упрочнения достигаются в элементе жесткости стенки и краевом отгибе, напряжения на этих участках снижаются в 1.5–3.5 раза. Для элемента без упрочнения наблюдается переход в зону растягивающих напряжений с максимальными значениями, превышающими предел прочности материала. В остальных элементах сечения напряжения снижаются в среднем в 2 раза;
- для коротких образцов (образец № 3) деформации снижаются в 2.5 раза, для элемента с упрочнением характерны незначительные локальные деформации. Напряжения для элементов сечения увеличиваются, однако, образец продолжает работу в упругой зоне. Для



образца без учета упрочнения происходит переход в зону пластических деформаций. В целом для коротких образцов повышение прочностных характеристик элементов сечения не приводит к значительным изменениям напряженно-деформированного состояния.

Таким образом, для длинных образцов и образцов средней длины учет упрочнения приводит дополнительным резервам несущей способности при работе в условиях действия осевой силы. Происходят и качественные и количественные изменения напряженно-деформированного состояния образцов. Для коротких образцов влияние упрочнения несущественно.

Дальнейшими этапами развития исследования предполагается совместный учет упрочнения материала и начальных геометрических несовершенств профилей, а также верификация полученных результатов путем их сравнения с экспериментальными данными.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Нефедов, Г.В. Строительство домов средней этажности на каркасах из легких стальных конструкций / Г.В. Нефедов // Строительные конструкции, здания и сооружения. — 2020. № 7 — С. 10–15.
2. Sheta, A. Structural performance of novel thin-walled composite cold-formed steel/PE-ECC beams / A. Sheta, X. Ma, Y. Zhuge, M.A. ElGawady, J.E. Mills, A. Singh, E. Abd-Elaal // Thin-Walled Structures — 2021. — № 162 — p. 1–24.
3. Keertyan, P. Experimental investigation and design of lipped channel beams in shear / P. Keertyan, M. Mahendran // Thin-Walled Structures — 2015. — № 86 — p. 174–184.
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. 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.
6. 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.
7. 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.
8. 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.
9. 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.
10. Корсун, Н.Д. Адаптация методики и анализ результатов лабораторных испытаний прочности стали тонкостенного холодногнутого профиля / Н.Д. Корсун, Д.А. Простакишина // Вестник Евразийской науки. — 2020 № 6. — URL: <https://esj.today/PDF/63SAVN620.pdf>.

**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

## **Study of the stress-strain state of thin-walled steel structures taking into account the uneven distribution of the strength properties of steel over the section of the profile**

**Abstract.** The publication reflects the results of a numerical experiment to assess the effect of steel hardening on the bearing capacity of elements from steel thin-walled profiles. Strengthening of thin-walled metal in places of bending is a factor justified by the technology of manufacturing profiles, and influencing its stress-strain state. The first part of the publication provides a rationale for the relevance of the research topic and the problematics, which consists in the absence of provisions in the normative literature on taking into account the uneven distribution of the mechanical properties of steel over the section of a cold-formed thin-walled profile. The research of the authors of the article and other sources are given, on the basis of which the scheme of distribution of the mechanical properties of steel over the section for the object of research was adopted. The second part of the publication provides a rationale for the method used to conduct the research, a description of the research object and the design scheme, the main design prerequisites. The object of the study was a thin-walled steel sigma profile with a cross-sectional height of 300 mm and a sheet thickness of 2.5 mm. The study was carried out on three groups of samples without steel hardening and taking into account hardening: long — 4500 mm, medium length — 3000 mm, short — 1500 mm. The results are diagrams of stress distribution over the cross-section of elements, as well as deformation schemes. Comparative analysis of numerical values and qualitative distribution is carried out. Conclusions are drawn about the significant effect of steel hardening on the bearing capacity of a long specimen and a specimen of medium length: specimens work more rigidly, deformations decrease by 3–5 times, stresses — by 1.5–3.5 times. It is concluded that the hardening of steel for a short specimen has an insignificant effect on its bearing capacity. Further stages of the research are indicated.

**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; numerical simulation