

**Нагнибеда Н.Н.**

Приазовский государственный технический университет

**Кухарь В.В.**

Приазовский государственный технический университет

**Ткачев Р.О.**

Приазовский государственный технический университет

**Радушев О.О.**

Приазовский государственный технический университет

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЖЕСТКОСТИ ГНУТЫХ И ГНУТО-СВАРНЫХ АРМИРУЮЩИХ ПРОФИЛЕЙ ОДНОГО ТИПОРАЗМЕРА ПРИ ИСПЫТАНИЯХ НА ПОПЕРЕЧНЫЙ ИЗГИБ

*У статті наведені результати випробувань на поперечний вигин армуючих профілів однакового типорозміру двох варіантів виготовлення. Були проведені випробування зразків із профілів, виготовлених за технологією багатовалкового гнуття профілю замкнутого перетину з наявністю зазору на стороні 50 мм і за технологією з формуванням поздовжнього зварного шва після гнуття на стороні 40 мм. Удосконалено методику експериментальних досліджень холодногнутих профілів на поперечний вигин прикладеною силою із безперервним відеозаписом процесу.*

*Виконано статистичну обробку результатів вимірювань товщини стінок, наданих для випробування армуючих профілів. Отримано графічні та аналітичні залежності величини прогину профілю за варіантами навантаження на більшу і меншу стінки від величини навантаження. З аналізу графічних залежностей виявлено, що, незважаючи на меншу, на 4,8% товщину армуючого профілю ПГЗ порівняно з профілем ПГ, величина прогину для найбільш несприятливого випадку навантаження (на більшу сторону) зменшується на 59%, а при навантаженні на меншу сторону прогин знижується на 0,7%.*

*Після обробки експериментальних результатів отримано степенні рівняння регресії для різних умов навантаження зразків на більшу і меншу стінки. Встановлено, що виготовлення армуючих профілів у гнуто-звареному виконанні має переваги за показниками жорсткості перед профілями, виготовленими в гнутому виконанні. Для найбільш несприятливого варіанта навантаження профілю на більшу сторону, коли незварений проміжок знаходиться на його боці, варіант формування зварного шва дає поліпшення показника жорсткості не менше ніж на 50%.*

**Ключові слова:** гнуття, багатоперехідне гнуття, профіль, армуючий профіль, випробування, зварювання, зварений шов, триточковий вигин.

**Постановка проблеми.** Процесс формирования профилей из стальных холоднокатаных заготовок имеет большое значение во многих отраслях промышленности, таких как судостроение, машиностроение, строительство каркасных конструкций. Из-за распространенности и растущего спроса на армирующий профиль становятся более жесткими и требования к геометрическим и прочностным параметрам такого вида продукции, требующие постоянных исследований в этом направлении. Процессом формирования армирующих профилей с необходимыми геометрическими параметрами является изгиб заготовок на многовалковых прокатных станах [1; 2].

Контролю качества этой продукции уделяется особое внимание из-за высокой значимости сферы их применения. Поэтому актуальным остается развитие экспериментальных исследований, позволяющих выявить изменения эксплуатационных свойств профилей при доработке их конструкции или усовершенствовании технологии их производства.

**Анализ последних исследований и публикаций.** Подобные экспериментальные исследования с учетом геометрических параметров и свойств материала проводятся постоянно, однако в работах не описывается в достаточной мере поведение заготовок сложной формы, подтверждающая

необходимость в подобного рода работах [3–5]. Исследования для получения комплексных характеристик прочности и жесткости проводятся и для сварных изделий с учетом материала заготовок, однако они также не учитывают формы конечного изделия [6; 7]. Были проанализированы возможности внедрения полученных экспериментальных данных для многопереходной гибки [8].

Существующая на текущий момент информация, связанная с испытаниями холодногнутых профилей, не дает возможности прогнозировать поведение конечных изделий при их нагружении внешними силами. Перспективным в этом направлении станет интеграция конечно-элементного моделирования при прогнозировании поведения заготовок и проектировании технической документации.

**Постановка цели исследования.** Целью работы является определение различий в комплексных эксплуатационных характеристиках прочности, жесткости и устойчивости стального армирующего профиля типоразмера № 40\*50 (40 мм х 50 мм), изготовленного многопереходной гибкой стальной полосы на профилегибочном стане в профиль полузамкнутого пересечения с зазором между кромками не больше 0,5 мм вдоль стороны, которая имеет размер 40 мм (профиль ПГ) и профиля, изготовленного многопереходной гибкой стальной полосы в профилегибочном стане в замкнутый профиль и последующей сваркой кромок с формированием продольного сварного шва посередине стороны, имеющей размер 50 мм (профиль ПГС). Сравнение этих видов профилей с зазором и наличием сварочного шва позволит увидеть различия в поведении изделий похожего поперечного сечения и отличных толщин, эффективных объемов материала, необходимых для производства продукции.

**Изложение основного материала исследования.** Для проведения экспериментального исследования профили для испытаний (рис. 1 и рис. 2) были предварительно осмотрены и подготовлены. Профили не имели никаких дефектов, видимых невооруженным глазом. Из каждого типа профиля с помощью ножовки по металлу были вырезаны по три образца профиля с длиной 1000 мм. Для измерения толщины использовался электронный штангенциркуль, прошедший метрологическую поверку в установленные сроки. Были проведены измерения толщины стенок заготовок и выполнена статистическая обработка данных по соответствующей методике [9–11]. Было проведено 10 замеров толщины стенки заготовок для каждого вида

профиля. Установлено, что профили ПГ типоразмера № 50x40 имели среднюю толщину стенки 1,936 мм, а профили ПГС типоразмера № 50x40 – среднюю толщину стенки 1,843 мм.



Основным определяющим параметром, характеризующим жесткость и прочность профиля, является прогиб профиля при изгибе поперечной силой. Для испытаний был выбран метод поперечного (трехточечного) изгиба (рис. 4). Этот метод подходит для контрольных и сравнительных испытаний.

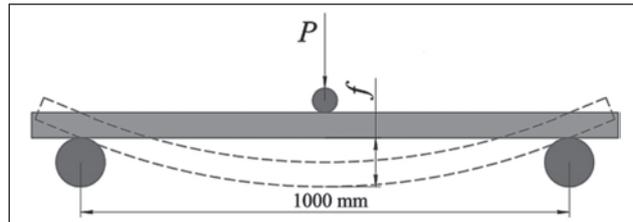


Рис. 3. Схема поперечного изгиба профиля

По принципу, указанному на рис. 3, была разработана методика испытаний с применением экспериментальной установки, приведенной на рис. 4. В качестве испытательной машины, обеспечивающей нагрузку профиля поперечной силой через цилиндрическую подставку диаметром 5,9 мм, использовали разрывную машину УММ-10 с предельной нагрузкой 100 кН. В качестве прибора, фиксирующего прогиб профиля, был выбран механический тензомер часового типа от переносного динамометра (рис. 5). Для фиксации данных показателей силы  $P$  использовали встроенную в УММ-10 шкалу, изменения показаний на которой в течение всего эксперимента фиксировала камера, установленная напротив.

Таковую же схему использовали для наблюдения за прогибом профиля  $f$ , фиксируя данные тензомера динамометра ДОСМ-33 с помощью второй камеры. Для фиксации показаний приборов использовали камеры высокого разрешения. Было

проведено по три измерения с полной фиксацией событий для каждого вида и сечения профиля (нагрузкой на шов, на стык и на боковые грани).



Рис. 4. Установка для проведения экспериментального исследования



Рис. 5. Динамометр образцовый переносной ДОСМ-33

Для обработки результатов эксперимента по определению силы и прогиба профилей при нагрузке поперечной силой было использовано вспомогательное программное обеспечение (ПО) DaVinci Resolve 15 и Microsoft Excel.

ПО DaVinci Resolve 15 использовали для синхронизации обеих камер. Полученные данные с видео позволили сопоставить изменения значения силы  $P$  и прогиба профиля  $f$  с течением времени, по которому были построены графические зависимости, приведенные на рис. 6 и рис. 7. После обработки полученных графических зависимостей прогиба от силы нагрузки были получены уравнения регрессии (линии тренда). Установлено, что наиболее корректно зависимость прогиба от величины нагрузки описывают степенные уравнения с коэффициентом детерминации ( $R^2 > 0,95$ ):

1) для профиля ПГ:

$$f = 0,0644 \cdot P(50)^{0,6452}, \quad (1)$$

$$f = 0,0249 \cdot P(40)^{0,6524}, \quad (2)$$

2) для профиля ПГС:

$$f = 0,0151 \cdot P(50)^{0,7465}, \quad (3)$$

$$f = 0,0275 \cdot P(40)^{0,6355}, \quad (4)$$

Используя выражения (1–4), можно охарактеризовать жесткость армирующих профилей, задавшись фиксированной величиной силы – 500 Н. В результате расчета было получено величины прогибов  $f$ , соответствующие нагружению профиля, расположенного на двух опорах, расположенных на расстоянии 1 м друг от друга, поперечной силой, приложенной посередине длины профиля. Результаты расчетов приведены в табл. 1.

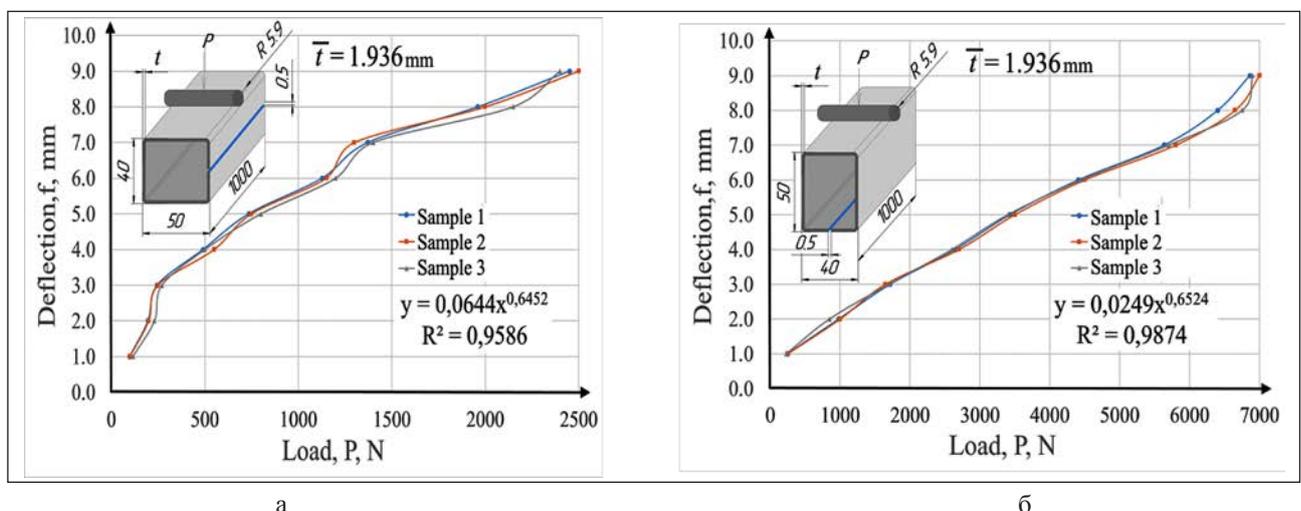


Рис. 6. Экспериментальный график результатов испытаний на поперечный прогиб сосредоточенной силой профилей типоразмера № 40x50 ( $t = 1,936$  мм) гнутого исполнения (ПГ): а) приложения силы  $P(50)$  к большей стороне профиля; б) приложения силы  $P(40)$  к меньшей стороне профиля

Гнуто-сварной профиль ПГС показывает лучшие характеристики жесткости, чем гнутый ПГ, несмотря на меньшую толщину стенки (толщина стенки профиля ПГС на 4,8% меньше, чем профиля ПГ). Худшие показатели жесткости имеет профиль, гнутый ПГ при нагрузке на большую сторону.

**Выводы.** Усовершенствована методика экспериментальных исследований холодногнутого профиля на поперечный изгиб приложенной силой с непрерывной видеозаписью процесса испытаний для получения зависимости между величиной нагрузки и прогибом профиля. Предварительно выполнена статистическая обработка результатов измерений толщины стенок, предоставленных для испытаний армирующих профилей. Выявлено, что средняя величина толщины стенок гнутого профиля ПГ на 4,8% больше, чем в профилях ПГС гнуто-сварного исполнения, а отклонения толщины от среднего значения соответствуют закону нормального распределения.

Получены графические и аналитические зависимости величины прогиба профиля при вариан-

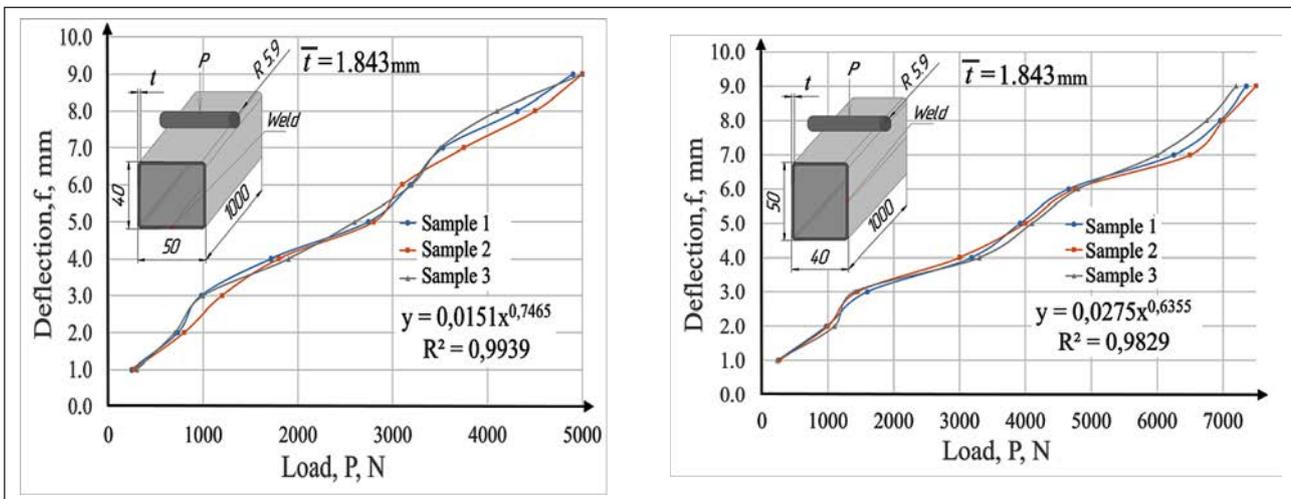
тах нагрузки на большую и меньшую стенки от величины нагрузки. Из анализа графических зависимостей выявлено, что, несмотря на меньшую, на 4,8% толщину армирующего профиля ПГС по сравнению с профилем ПГ, величина прогиба для наиболее неблагоприятного случая нагрузки (на большую сторону) уменьшается на 59%, а при нагрузке на меньшую сторону прогиб снижается на 0,7%.

Таким образом, наличие сварного шва усиливает параметры жесткости профиля. Выполнение армирующих профилей в гнуто-сварном исполнении позволит достичь необходимых параметров жесткости профиля при уменьшении толщины исходной заготовки, то есть экономии металла заготовки. Установлено, что изготовление армирующих профилей в гнуто-сварном исполнении имеет преимущества по показателям жесткости перед профилями, изготовленными в гнутом исполнении. Для наиболее неблагоприятного варианта нагрузки профиля на большую сторону, когда не сваренный зазор находится на его боковой стороне, вариант формирования сварного шва дает улучшение показателя жесткости не менее чем на 50%.

Таблица 1

**Величины прогибов  $f$  армирующих профилей при нагрузке фиксированным весом  $P = 500$  Н и величины сил  $P$ , необходимые для деформации армирующих профилей на фиксированную величину прогиба  $f = 1,5$  мм**

| Исполнение профиля, толщина стенки $t$ , мм | Вариант приложения нагрузки при испытании | Прогиб $f$ , мм, при нагружении $P = 500$ Н | Сила $P$ , Н при прогибе профиля на $f = 1,5$ мм |
|---|---|---|--|
| ПГ<br>$t = 1,936$ мм                        | К большей стороне $P(50)$                 | 3,55  | 132  |
|   | К меньшей стороне $P(40)$                 | 1,44  | 534  |
| ПГС<br>$t = 1,843$ мм                       | К большей стороне $P(50)$                 | 1,56  | 474  |
|   | К меньшей стороне $P(40)$                 | 1,43  | 540  |



**Рис. 7. Экспериментальный график результатов испытаний на поперечный прогиб сосредоточенной силой профилей типоразмера № 40x50 ( $t = 1,843$  мм) гнуто-сварного исполнения (ПГС): а) приложения силы  $P(50)$  к большей стороне профиля; б) приложения силы  $P(40)$  к меньшей стороне профиля**

Список літератури:

1. Кухар В.В., Анищенко О.С., Нагнибеда Н.Н. Методика розрахунку напружено-деформованого стану листової заготовки при гнутті з урахуванням зміцнення матеріалу. Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. Харків : НТУ «ХПІ», 2017. № 37(1259). С. 36–41.
2. Кухарь В.В., Нагнибеда Н.Н. Испытание армирующих профилей и определение их прочностных и геометрических характеристик. Проблемы трибологии. Хмельницький ХНУ, 2016. № 1(79). С. 30–35.
3. Rejzner J., Lexcellent C., Raniecki B. Pseudoelastic behaviour of shape memory alloy beams under pure bending: experiments and modelling. International Journal of Mechanical Sciences, 2002. № 44. P. 665–686.
4. Bilston D., Ruan D., Candido A., Durandet Y. Parametric study of the cross-section shape of aluminium tubes in dynamic three-point bending. Thin-Walled Structures, 2019. № 136. P. 315–322.
5. Nelson T., Bruton J., Rieske N., Walton M., Fullwood D., Howel L. Material selection shape factors for compliant arrays in bending. Materials & Design, 2016. № 110. P. 865–877.
6. Sun Y., He A., Liang Y., Zhao O. In-plane bending behaviour and capacities of S690 high strength steel welded I-section beams. Journal of Constructional Steel Research, 2019. № 162. p. 105–741.
7. Ahola A., Björk T., Barsoum Z. Fatigue strength capacity of load-carrying fillet welds on ultra-high-strength steel plates subjected to out-of-plane bending. Engineering Structures, 2019. № 196. p. 109–282.
8. Dang X., He K., Zhang F., Zuo Q., Du R. Multi-stage incremental bending to form doubly curved metal plates based on bending limit diagram. International Journal of Mechanical Sciences, 2019. № 159. P. 19–30.
9. Прямые измерения с многократными наблюдениями. Методы обработки результатов наблюдений. Основные положения: ДСТУ ГОСТ 8.207:2008. [Чинний від 2008-10-01]. Київ : Держспоживстандарт України, 2008. 8 с.
10. Гмурман В.Е. Теория вероятности и математическая статистика. Москва : Высшая школа, 1972. 368 с.
11. Гаскаров Д.В., Шаповалов В.И. Малая выборка. Москва : Статистика, 1978. 248 с.

**Nahnybeda N.N., Kukhar V.V., Tkachev R.O., Radushev O.O. EXPERIMENTAL RESEARCH OF BENT AND BENT-WELDED REINFORCEMENT ONE-SIZE SECTIONS STIFFNESS AT THE CROSS-BENDING TEST**

*The article presents the results of tests for cross-bending of reinforcing profiles of the one-size of two manufacturing options. There were tested samples from profiles made using multi-roll bending-forming technology into a closed section profile with a gap on the side of 50 mm, and on technology with the formation of a longitudinal weld after bending on the side of 40 mm. The technique of experimental studies of cold-formed sections for lateral bending by applied force with continuous video recording of the process has been improved. Statistical processing of the results of measurements of the wall thickness provided for testing reinforcing profiles was performed.*

*Graphical and analytical dependences of the deflection of the profile are obtained for load options on a large wall and a smaller wall on the load value. From the analysis of graphical dependencies, it was found that, despite a 4,8% smaller thickness of the shape with weld-side as compared to the shape of the gap-side, the deflection for the most unfavorable case of loading (on the larger side) decreases by 59%, and when loading on the smaller side deflection is reduced by 0.7%.*

*After processing the experimental results, power-law regression equations are obtained for various loading conditions of the samples on the larger and smaller walls. It is established that the manufacture of reinforcing profiles in bent-welded versions has advantages in terms of stiffness indicators over profiles made in bent versions. For the most unfavorable option of loading the profile to the larger side, when the un-welded gap is on its lateral side, the option of forming a weld seam gives an improvement in stiffness by at least 50%.*

**Key words:** bending, multi-pass bending, shape, reinforcing shapes, tests, welding, weld, three-point bending, reinforcement, stiffness.