

УДК 669.14: 621.753: 621.791: 624.014.2: 658.5

№ держреєстрації 0124U005052

ІНВ. №

Товариство з обмеженою відповідальністю  
«ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»

69008, м. Запоріжжя вул. Південне шосе 80

Телефон / факс: +38(067) 760-49-71; mip@metinvestholding.com

ЗАТВЕРДЖЕНО

Ректор

Олександр ПОВАЖНИЙ

« 23 » грудня 2024 р.



**З В І Т**

за результатами виконання науково-дослідної роботи за договором № 20247046

**«Порівняння експлуатаційних характеристик сталевих замкнених гнутих та гнуто-зварних армувальних профілів і оцінка ефекту зменшення матеріалоемності їх виготовлення за рахунок переходу на гнуто-зварне виконання»**

Науковий керівник роботи,

д-р. техн. наук, професор

В.В. Кухар

2024

Підготовку звіту завершено 20.12.2024 р.

**СПИСОК ВИКОНАВЦІВ**

Керівник роботи,  
д-р. техн. наук, професор,  
професор кафедри  
металургії та організації  
виробництва



В. В. Кухар

## РЕФЕРАТ

**ЗВІТ про НДР: 56 с., 4 рис., 20 табл., 14 джерел, 4 дод.**

**Ключові слова:** сталевий профіль, рулон холодного прокату, штрипс, холодногнутий профіль, гнутозварний профіль, армування, жорсткість, геометричні характеристики, момент опору, товщина стінки, експериментальні дослідження, економія матеріалу.

**Мета роботи** – Встановити техніко-економічну ефективність використання гнуто-зварних армувальних профілів порівняно із замкненими гнутими профілями шляхом оцінки зміни такої експлуатаційної характеристики, як жорсткість, та обґрунтувати можливість зменшення матеріалоємності їх виготовлення завдяки зменшенню товщини стінки профілів.

**Завдання:**

- Провести порівняльний аналіз експлуатаційних характеристик замкнених гнутих та гнуто-зварних армувальних профілів, зокрема їх жорсткості та міцності.

- Розробити методику техніко-економічного обґрунтування переходу на гнуто-зварне виконання профілів у виробничих процесах.

- Оцінити вплив товщини стінки профілю на жорсткість конструкції та можливість зменшення матеріалоємності без втрати експлуатаційних властивостей.

**Об’єкт дослідження** – Сталеві замкнені гнуті та гнуто-зварні армувальні профілі.

**Предмет дослідження** – Експлуатаційні характеристики, матеріаломісткість і технологічні аспекти виготовлення сталевих профілів різних типів.

**Результати та їх новизна:** Техніко-економічні показники НДР визначаються результатами аналізу випробувань дослідних зразків і висновків щодо можливості зниження матеріаломісткості у вигляді зменшення товщини

стілки (мм) профілю гнуто-зварного виконання. Очікуваним результатом є визначення того, на скільки профілі гнутозварного виконання мають більші показники жорсткості від профілів гнутого виконання, а також встановлення резервів економії матеріалу, а саме можливості зменшення товщини стінки профіля типорозміру № 40\*50 (40 мм х 50 мм х 2,0 мм та 40 мм х 50 мм х 1,5 мм, крім того, порівняння з показниками для профіля 40 мм х 50 мм х 1,2 мм).

Результати досліджень показали, що гнутозварний профіль має кращі показники жорсткості та менший прогин при навантаженнях, ніж холодногнутий профіль, що дозволяє зменшити товщину стінки й досягти економії металу без втрати експлуатаційних характеристик. Новизна роботи полягає у розвитку методики оцінки показників жорсткості армувального профілю та обґрунтуванні раціонального вибору конструкції (варіанту виконання) армувального профілю в залежності від навантаження.

**Назва продукції:** Сталеві армуючі профілі холодногнутого та гнутозварного виконання типорозміру 40×50 мм для будівельних конструкцій (віконних систем) та методика вибору товщини стінки для профілів такого типу в залежності від навантаження.

**Опис продукції:** Сталеві армуючі профілі холодногнутого та гнутозварного виконання типорозміру 40×50 мм призначені для застосування у віконних системах та інших будівельних конструкціях, що піддаються згинанню при випробуваннях та при експлуатації. Профілі гнутозварного виконання демонструють підвищену жорсткість при навантаженнях, забезпечуючи зменшений прогин на 35...56% у порівнянні з холодногнутими аналогами, навіть при зменшеній товщині стінки на 4,8%. Завдяки цьому досягається суттєва (18%) економія металу без втрати жорсткості та експлуатаційних характеристик. Розроблена методика дозволяє оптимально вибирати товщину стінки профілю залежно від типу навантаження, забезпечуючи баланс між показником жорсткості та витратами матеріалу.

**Інформація щодо впровадження:** результати науково-дослідної роботи передані замовнику – ПП «ДАНВІС» за актом приймання-передачі від «20» грудня 2024 року. Виконана робота задовольнила замовника. Результати роботи можуть бути корисними в практичній діяльності з розробки та планування виробництва армувальних гнутих профілів під певні віконні системи, вибору товщини стінки в залежності від навантажень. З огляду на сучасні вимоги воєнного стану, товщини стінок профілів повинні враховувати наявність імпульсних та вибухових навантажень. Результати можуть бути корисними в навчальному процесі при викладанні на освітніх програмах за напрямками: **13** Механічна інженерія = **G** Інженерія, виробництво та будівництво, а саме **136** = **G10** Металургія та **131** = **G9** Прикладна механіка.

**Рекомендації щодо використання** – на підставі отриманих результатів.

**Сфера застосування:** металургія, будівництво, виробництво віконних систем, конструкції несучих елементів, науково-дослідна робота, освітні програми.

**Соціально-економічна спрямованість:** Продукція спрямована на зниження витрат матеріалів та підвищення ефективності будівельних систем, що сприяє зменшенню загальної вартості будівництва та підвищенню його енергоефективності. Впровадження цієї продукції дозволяє скоротити витрати на виробництво завдяки зменшенню кількості сталі, тобто аплікatively знизити викиди CO<sub>2</sub>, а також забезпечити довговічність конструкцій, що відповідає сучасним екологічним і економічним стандартам.

**Умови одержання ЗВІТУ:** доступ за запитом.

## ЗМІСТ

	стор.
ВСТУП.....	7
1 ПЕРЕДУМОВИ ВИКОНАННЯ РОБОТИ.....	8
1.1 Конструкція та експлуатація віконних систем зі сталевими армуючими профілямию.....	8
1.2 Аналіз виконаних розробок з дослідження геометричних характеристик, жорсткості та експлуатаційних властивостей профілів .....	9
1.2.1 Аналітичні розрахунки.....	9
1.2.2 Аналіз результатів випробувань на триточковий згин холодногнутих профілів.....	10
1.2.3 Оцінка зменшення матеріаломісткості холодногнутих профілів за рахунок гнуто-зварного виконання.....	12
2 МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ.....	14
2.1 Опрацювання вихідних даних та оцінка показників жорсткості профілів.....	14
2.2 Розробка розрахункових формул для оцінки експлуатаційних характеристик та можливості зменшення матеріалоємності профілів.....	16
3 РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	20
3.1 Профіль 40*50*1000*2.0 мм.....	20
3.2 Профіль 40*50*2000*1.5 мм.....	26
3.3 Профіль 40*50*2000*1.2 мм.....	31
3.4 Розрахунок економії матеріалу.....	38
4 ЗАСТЕРЕЖЕННЯ ЩОДО ВИКОРИСТАННЯ В УМОВАХ ВИБУХОВИХ ТА ІМПУЛЬСНИХ НАВАНТАЖЕНЬ.....	39
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	41
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....	43
Додаток А. Протокол випробувань №7.8/1393-d-1 (1,5*40*50*2000)...	45
Додаток Б. Протокол випробувань №7.8/1458-d-1 (1,2*40*50*2000)...	47
Додаток В. Акт приймання-передачі	48
Додаток Г. Технічний звіт	49

## ВСТУП

Сталеві армувальні профілі, які отримують технологіями гнуття на профілезгинальних станах, широко застосовують у будівельній промисловості, зокрема при виробництві металопластикових вікон. Самі віконні конструкції поєднують розробки різних галузей науки, використовуючи матеріали, як-от сталь, дерево, ПВХ, алюміній, склопластик. Металопластикові вікна займають більше 60% ринку вікон завдяки надійності, довговічності та простоті експлуатації. Основними складовими таких вікон є ПВХ-профіль, армуючий елемент, фурнітура і склопакет. Армвання з оцинкованої сталі забезпечує міцність та жорсткість конструкції, що критично при вітрових та механічних навантаженнях.

Для армування використовують профілі різних форм: Г-подібні, П-подібні, замкнуті. Вибір типу залежить від розміру склопакета і умов експлуатації. Зокрема, для великих віконних конструкцій рекомендується замкнуте армування. Навантаження на армуючі профілі залежить від параметрів склопакета, висоти установки, місцевих кліматичних умов.

Опис розробки сталевих армуючих профілів холодногнутого та гнутозварного виконання типорозміру 40×50 мм, виконана за замовленням ПП "ДАНВІС". Розробка спрямована на створення продукції, що поєднує міцність, жорсткість та економію матеріалів. Результати експериментальних досліджень показали, що гнутозварні профілі забезпечують значну економію металу при збереженні або підвищенні експлуатаційних характеристик. Це особливо важливо для зниження собівартості конструкцій та підвищення їх конкурентоспроможності на ринку.

Вирішення задачі оптимального поєднання міцності і економії матеріалу вимагає використання комплексних технологій виробництва, випробувань та моделювання. Отримані результати сприяють розробці вдосконалених армуючих профілів для сучасних віконних систем, що відповідають високим вимогам стійкості та ефективності.

## 1 ПЕРЕДУМОВИ ВИКОНАННЯ РОБОТИ

### 1.1 Конструкція та експлуатація віконних систем зі сталевими армуючими профілями

Металопластикові вікна складаються з пластикового корпусу та сталевій армуючої вставки, яка забезпечує жорсткість і міцність конструкції. Внутрішня частина ПВХ-профілю розділена на повітряні камери, кількість яких впливає на тепло- та звукоізоляцію. Армуючі профілі виготовляють з оцинкованої сталі товщиною 1,5–2,0 мм. Замкнуті профілі забезпечують більшу жорсткість, а П- та Г-подібні використовують у менш навантажених елементах [1–3].

Армування дозволяє витримувати вітрові, статичні та термічні навантаження. Важливими характеристиками є модуль пружності матеріалу (для сталі – 210 000 МПа) та моменти опору та момент інерції, що залежать від геометрії перерізу. Розрахунки міцності та жорсткості профілів виконують відповідно до стандартів, враховуючи вітрові навантаження, які залежать від висоти будівлі, кліматичної зони та специфіки місцевості [4].

Випробування профілів на вигин проводять за схемами, що імітують найгірші умови навантаження. Для профілів із зазором або швом ці елементи розташовують у зоні стискальних напружень для зменшення впливу дефектів. Основні експлуатаційні характеристики профілів (момент інерції, моменти опору, механічні властивості) слід враховувати під час вибору профілю для різних умов експлуатації.

Використання стандартних методик розрахунку, експериментальних досліджень і комп'ютерного моделювання [5–9] дозволяє обґрунтувати вибір армуючих профілів та їх оптимальні параметри для металопластикових віконних систем.

## 1.2 Аналіз виконаних розробок з дослідження геометричних характеристик, жорсткості та експлуатаційних властивостей профілів

### 1.2.1 Аналітичні розрахунки

Подібна науково-дослідна робота з аналізу геометричних характеристик та показників жорсткості та міцності проводилась керівником даного проєкту раніше [10]. Для виконання НДР для проведення дослідження були надані зразки холодногнутих (ПГ) і гнуто-зварних (ПГЗ) армуючих профілів типорозміру 40×50 мм (товщина стінки 2,0 мм, сталь 08пс) (рис. 1.1). Профілі ПГ виготовлені шляхом гнуття смуги у замкнутий перетин із зазором 0,5 мм, а ПГЗ – зварюванням замкнутого перетину з утворенням шва посередині більшої сторони (50 мм). Усередненні по замірах товщини стінок склали: 1,936 мм для ПГ та 1,843 мм для ПГЗ, що менше нормативної товщини 2,0 мм. Особливістю було не однакове розташування місця зазору (на стороні 40 мм) та зварного шва (на стороні 50 мм) на профілях ПГ та ПГЗ (див. рис. 1.1)

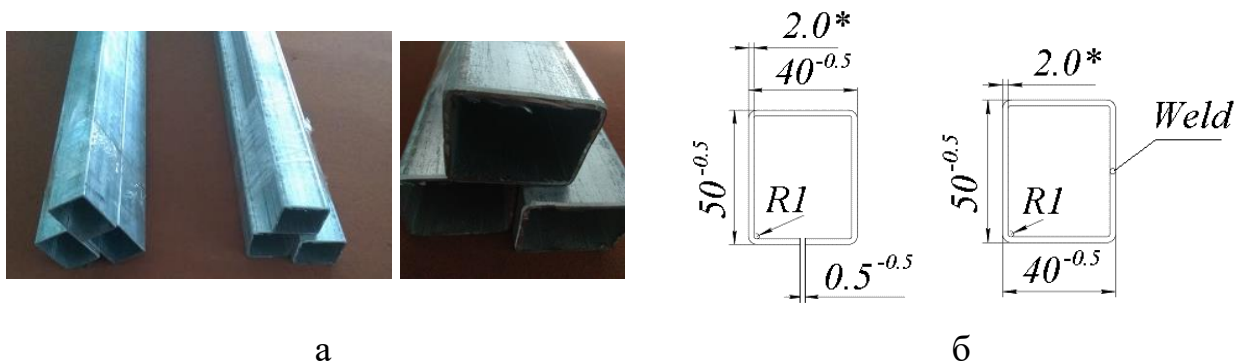


Рисунок 1.1 – Профілі типорозміру № 40\*50 із товщиною стінки 2 мм в стані поставки (а) і ескізи їх поперечних перерізів (б): гнутого (ПГ) і гнуто-зварного (ПГЗ) виконання [10]

**Методики оцінки** [10]. Для визначення фізико-геометричних характеристик проводились вимірювання товщини стінок за допомогою штангенциркуля, а розрахунки виконувались у MS Excel та програмі CFSteel.

Параметри включали осьові моменти інерції, моменти опору, площу поперечного перерізу та інші показники. Результати показали, що значення характеристик ПГ та ПГЗ відрізняються на 3,2–4,65% від каталожних через зменшену товщину стінок.

**Основні результати** [10]. Геометричні характеристики: Значення моментів інерції та опору для ПГ і ПГЗ підтвердили їх придатність для умов роботи на вигин. Зазначено, що ПГ має на 3,51–9,4% більші характеристики через товщину стінок.

1. **Міцність:** Напруження при одночасному вигині та крученні показали, що крутний момент становить 21–25% еквівалентного напруження.

2. **Стійкість:** Критичні моменти вигину не викликають втрати стійкості, однак профілі мають ризики пластичних деформацій при стиску через низьку гнучкість (43,86–44,05).

**Висновки.** Проведений аналіз [10] підтвердив необхідність подальших експериментів на прогин із використанням методів кінцево-елементного моделювання. Для оцінки економії матеріалів рекомендовано перевірку профілів за критеріями міцності та жорсткості з урахуванням експериментальних даних і розрахунків.

### **1.2.2 Аналіз результатів випробувань на триточковий згин холодногнутих профілів**

**Підготовка зразків для випробувань.** Для досліджень було надано 6 зразків профілів перетином 40×50 мм [10]: три гнутого виконання (ПГ) з зазором (0,5 мм) між крайками та три гнуто-зварного виконання (ПГЗ) із поздовжнім зварним швом. Матеріал – сталь 08пс. Вимірювання товщини стінок профілів виконували штангенциркулем «Digital caliper A46» із десятьма замірами на кожному зразку. Середні значення товщини стінок склали: для ПГ – 1,936 мм, для ПГЗ – 1,843 мм. Результати підтверджують нормальний розподіл відхилень товщини.

**Методика випробувань.** Випробування проводили методом триточкового згину. Зразки довжиною 1 м навантажували поперечною силою через циліндричну підставку діаметром 5,9 мм. Використано розривну машину УММ-10 з максимальною межею навантаження 10 т. Для вимірювання прогину застосовували тензометр ДОСМ-33. Показники сили (P) та прогину (f) фіксували за допомогою відеозапису з двох камер (Panasonic-G7 та Panasonic-FZ300) [10].

**Методика обробки даних.** Відеодані обробляли у програмі DaVinci Resolve 15, результати експерименту переносили до Microsoft Excel. Для обробки вимірювань товщини стінок використовували критерії Кохрена (G), Стьюдента (t), і Фішера (F), що підтвердило відтворюваність та адекватність результатів [10].

**Результати випробувань.** Отримано графічні залежності прогину від сили навантаження для профілів ПГ і ПГЗ. Аналіз рівнянь регресії показав, що прогин профілю ПГЗ при навантаженні на більшу сторону зменшується на 59%, а на меншу сторону – на 0,7% у порівнянні з ПГ. Водночас товщина стінки ПГЗ на 4,8% менша, ніж у ПГ [10].

Для навантаження 500 Н прогини становлять:

- ПГ: 3,55 мм (на більшу сторону), 1,44 мм (на меншу сторону);
- ПГЗ: 1,56 мм (на більшу сторону), 1,43 мм (на меншу сторону).

Величина сили для прогину 1,5 мм:

- ПГ: 132 Н (на більшу сторону), 534 Н (на меншу сторону);
- ПГЗ: 474 Н (на більшу сторону), 540 Н (на меншу сторону).

**Висновки.** Результати звіту [10] показують, що гнуто-зварні профілі (ПГЗ) демонструють більшу жорсткість, ніж гнуті (ПГ), попри меншу товщину стінок. Використання гнуто-зварного виконання дозволяє зменшити товщину профілю без втрати експлуатаційних характеристик, що сприяє економії металу. Методика триточкового згину з відеофіксацією є доцільною для контролю характеристик жорсткості армуючих профілів. Розробка методики

оцінки економії металу для гнуто-зварних профілів базується на зв'язку між геометричними характеристиками та жорсткістю.

### **1.2.3 Оцінка зменшення матеріаломісткості холодногнутих профілів за рахунок гнуто-зварного виконання**

**Методика та результати аналізу.** Для оцінки можливості зниження матеріаломісткості холодногнутих армуючих профілів типорозміру 40×50 мм проведено порівняння варіантів профілів гнутого (ПГ) і гнуто-зварного (ПГЗ) виконання за геометричними показниками міцності та жорсткості при вигині.

Методика аналізу включала розрахунок моментів опору вигину профілів за формулами геометрії тонкостінних конструкцій [10]. Зокрема, обчислено коефіцієнти еквівалентної міцності для профілів із товщиною стінки 2,0 мм, а також розглянуто можливість зниження товщини стінки для гнуто-зварного профілю. Наприклад, заварка кромки дозволила підвищити момент опору на 0,7%, що дозволяє зменшити товщину стінки на 0,8% до 1,922 мм.

Принцип рівної міцності реалізовано через рівняння четвертого ступеня, яке враховує геометричні розміри та момент опору [10]. За цим методом для профілю ПГ товщиною стінки 1,936 мм визначено, що еквівалентна товщина стінки замкнутого профілю складає 1,931 мм. Відповідно, економія матеріалу при переході до гнуто-зварного виконання становить лише 0,1–0,3% (13 г/м).

Для оцінки за критерієм жорсткості визначено залежність прогину профілю від поперечної сили (метод триточкового згину). Випробування профілю ПГЗ показало, що прогин при навантаженні 500 Н на більшу сторону становить 1,55 мм, що еквівалентно прогину профілю з товщиною стінки 0,7 мм. Проте таке зменшення товщини призводить до суттєвого підвищення напруження і обмежує область використання профілю малими навантаженнями.

**Висновки.** Заварка кромки профілів дозволяє мінімально знизити товщину стінки (0,1–0,3%), що практично не впливає на масу профілю. Гнуто-

зварний профіль товщиною 0,7 мм може забезпечити економію металу до 62% (1,598 кг/м), але рекомендований лише для конструкцій із низькими навантаженнями [10]. Встановлено, що зменшення товщини на 5–10% для ПГЗ є прийнятним за умови економічної доцільності впровадження зварювального обладнання. Подальші розрахунки та моделювання можуть допомогти уточнити критерії вибору оптимальної товщини стінки та області застосування. Розроблена методика, що базується за використанні принципу рівної міцності, може бути застосована для оцінки зниження матеріаломсткості при заміні холодногнутих профілів на профілі гнуто-зварного виконання.

## 2 МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ

### 2.1 Опрацювання вихідних даних та оцінка показників жорсткості профілів

Вихідними даними слугували результати науково-дослідної роботи № 13/19 [10], отримані для трьохточкового згину профіля 40\*50 мм з товщиною стінки 2,0 мм (профіль 40\*50\*1000\*2.0 мм), а також протоколи №№ 7.8/1393-d-1 та 7.8/1393-d-2 від 24.09.2024 р. (див. Додаток А) випробувань на трьохточковий згин профілей 40\*50 мм (рис. 2.1) з товщиною стінки 1,5 мм (профіль 40\*50\*2000\*1.5 мм), які надані Замовником. У зазначених протоколах наведені результати випробувань профілей як незварної (рис. 2.1, а), так і зварної (рис. 2.1, б) конструкції, які навантажували як на сторону 40 мм, так і на сторону 50 мм (рис. 2.2). Крім того, Замовником додатково наданий протокол № 7.8/1458-d-1 від 13.11.2024 р. (див. Додаток Б) випробувань на трьохточковий згин профілей 40\*50 мм з товщиною стінки 1,2 мм (профіль 40\*50\*2000\*1.2 мм), які навантажували як на сторону 40 мм, так і на сторону 50 мм. Згідно з інформацією з протколів, випробування були проведені у лабораторії технічного контролю ТОВ «Центр промислової діагностики та контролю».

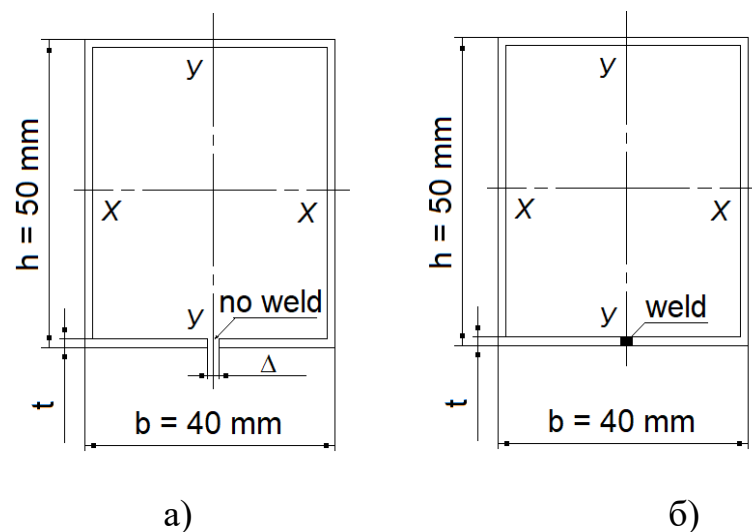


Рисунок 2.1 – Схеми холодгнutoго (не зварного) та гнuto-зварного виконання профіля 40\*50 мм

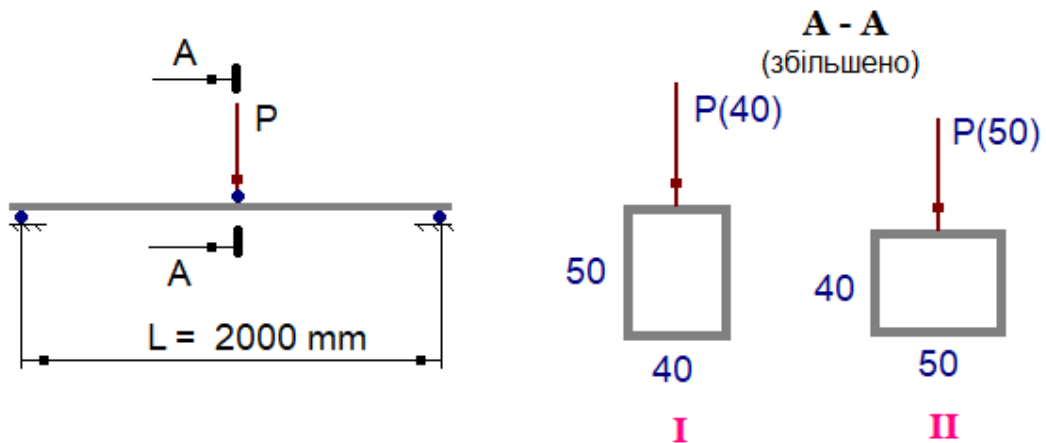


Рисунок 2.2 – Схеми навантаження профіля 40\*50 при випробуванні на триточковий згин: I – навантаження P(40) на сторону 40 мм, II – навантаження P(50) на сторону 50 мм

Умови проведення випробувань:

Розміри зразків – 40\*50\*2000 мм, діаметр формуючої оправки – 2 мм, відстань між роликami – 2000 мм. Експерименти проводили як при постійному навантаженні ( $P = 500$  Н), знімаючи показники жорсткості – деформацію прогину (стрілу прогину  $f$ , мм), так і для випадку навантаження до сталої величини прогину  $f = 8,0$  мм, фіксуючі силу навантаження  $P$ .

Збільшення показників жорсткості (зменшення прогину  $f$  при фіксованій силі та збільшення величини сили, що необхідна для досягнення однакових значень прогинів) визначали за формулами:

$$N_f = f_{\text{ПГ}} / f_{\text{ПГЗ}}, \quad (2.1)$$

$$N_P = P_{\text{ПГЗ}} / P_{\text{ПГ}}. \quad (2.2)$$

Показник (2.1) відображає, в скільки разів зменшується величина прогину при переході на профіль гнuto-зварного виконання. Показник (2.2) відображає, в скільки разів більше потрібна сила для деформування профілю при переході на його гнuto-зварне виконання.

## 2.2 Розробка розрахункових формул для оцінки експлуатаційних характеристик та можливості зменшення матеріалоемності профілів

1. Формула, яка описує залежність між силою, що діє при триточковому навантаженні (поперечне згинання з центральним прикладенням сили, див. рис. 2.2), та значенням стріли прогину [11]:

$$f = P \cdot L^3 / 48 \cdot E \cdot J , \quad (2.3)$$

де  $f$  – стріла прогину (рис. 2.3), мм;

$P$  – сила навантаження, Н;

$L$  – відстань між опорами (роliками), мм;

$E = 2,1 \cdot 10^5$  МПа – модуль пружності;

$J$  – момент інерції оперечного перерізу профіля, мм<sup>4</sup>.

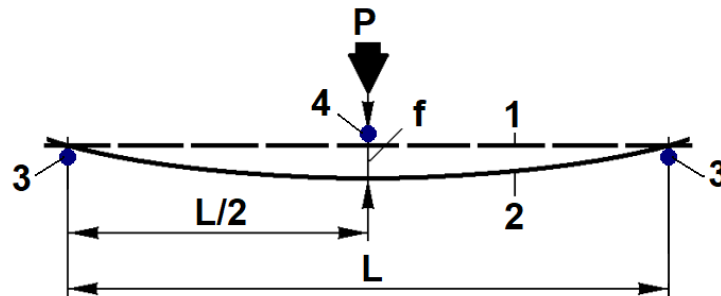


Рисунок 2.3 – Утворення стріли прогину  $f$  профіля довжиною  $L$  при навантаженні  $P$  за схемою триточкового згинання: 1 та 2 – вихідний та викривлений під навантаженням  $P$  стан профіля відповідно; 3 та 4 – опори та проставка відповідно

2. Тобто, з формули (2.3) отримували момент інерції профіля, що буде відповідати певним умовам навантаження:

$$J = P \cdot L^3 / 48 \cdot E \cdot f . \quad (2.4)$$

3. Формула для розрахунку моменту інерції в залежності від геометричних характеристик полого прямокутника, до якого прирівнюється поперечний перерз віконного профілю, що включає товщину стінки:

- при навантаженні на сторону b:

$$J = [b \cdot h^3 / 12] - [(b - 2t)(h - 2t)^3 / 12], \quad (2.5)$$

- при навантаженні на сторону h:

$$J = [h \cdot b^3 / 12] - [(h - 2t)(b - 2t)^3 / 12], \quad (2.6)$$

У формулах (2.5) та (2.6):

b – ширина профіля, мм (b = 40 мм);

h – висота профіля, мм (h = 50 мм);

t – товщина стінки профіля, мм (t = 2,0 мм, t = 1,5 мм, t = 1,2 мм);

4. В результаті перетворень, записували вираз (2.5) у вигляді рівняння четвертого ступеня:

- при навантаженні на сторону b:

$$-16 \cdot t^4 + 8(b + 3h) \cdot t^3 - 12h \cdot (b + h) \cdot t^2 + 2h^2 \cdot (3b + h) \cdot t - 12 \cdot J = 0; \quad (2.7)$$

- при навантаженні на сторону h:

$$-16 \cdot t^4 + 8(h + 3b) \cdot t^3 - 12b \cdot (h + b) \cdot t^2 + 2b^2 \cdot (3h + b) \cdot t - 12 \cdot J = 0. \quad (2.8)$$

5. Підставляючи числові значення ширини та висоти профіля 40\*50 мм у формули (2.7) та (2.8), записували рівняння четвертого ступеня у наступному вигляді:

$$A \cdot t^4 + B \cdot t^3 + C \cdot t^2 + D \cdot t + E = 0, \quad (2.9)$$

де, після перетворень, отримали коефіцієнти рівняння (2.9):

- при навантаженні на сторону  $b = 40$  мм:

$$A = -1,333; B = 126,7; C = -4500; D = 70833,3; E = -J;$$

- при навантаженні на сторону  $h = 50$  мм:

$$A = -1,333; B = 113,3; C = -3600; D = 50\,666,7; E = -J.$$

Для розв'язування рівняння (2.9) зостосовували онлайн калькулятори, див. ресурси:

- <https://math.icalculator.com/4th-degree-equation-calculator.html> [12];
- <https://www.1728.org/quartic.htm> [13] тощо.

#### **6. Алгоритм розрахунку виглядає наступним чином:**

**(i)** З експериментальних даних підставляють у формулу (2.4) значення  $f$  та  $R$ . Отримують значення моменту інерції  $J$ .

**(ii)** Визначають, на скільки жорсткість гнutoзварного профілю  $J_{\text{ПГЗ}}$  більше жорсткості гнutoго профілю  $J_{\text{ПГ}}$  (відносний показник жорсткості):

$$N_J = J_{\text{ПГЗ}} / J_{\text{ПГ}}. \quad (2.10)$$

**(iii)** Отримане значення  $J$  підставляють у рівняння четвертого ступеня (2.9), при чому коефіцієнти рівняння обирають в залежності від варіанту навантаження. Після розв'язування рівняння (2.9) отримуть значення товщини стінки  $t$ .

**(iv)** Визначають товщини стінок для варіантів виконання профілів ПГ ( $t_{\text{ПГ}}$ ) та ПГЗ ( $t_{\text{ПГЗ}}$ ) при однакових умовах навантаження.

**(v)** Величину  $\Delta t$ , на яку можна зменшити товщину стінки профіля, можна визначити як  $\Delta t = t_{\text{ПГЗ}} - t_{\text{ПГ}}$ .

Також, при підстанові у рівняння (2.9) величини  $\Delta J = J_{\text{ПГЗ}} - J_{\text{ПГ}}$  та його розв'язання відносно змінної, отримують значення  $\Delta t_j$ .

(vi) Визначають, у скільки разів еквівалентна стінка  $t_{\text{ПГЗ}}$  більше  $t_{\text{ПГ}}$  при однакових умовах навантаження:

$$N_t = t_{\text{ПГЗ}} / t_{\text{ПГ}}. \quad (2.11)$$

(vii) Таким чином, зменшену відносно номінальної товщини стінки  $t_{\text{н.0}}$  профіля незварного (гнутого) виконання розрахункову товщину стінки  $t_{\text{н.р}}$  профіля зварного виконання визначають як:

$$t_{\text{н.р}} = k_t \cdot t_{\text{н.0}}, \quad (2.12)$$

$$\text{де } k_t = 1 / N_t. \quad (2.13)$$

Фактичним значенням товщини стінки буде найближче значення товщини рулону (х/к листа) з сортаменту прокату.

**Висновок.** Таким чином, розроблено алгоритм розрахунку товщини стінки профілю, що дозволяє оцінити переваги гнутозварного виконання (ПГЗ) порівняно з гнутим (ПГ) при однакових умовах навантаження. Використання рівняння четвертого ступеня (2.9) для визначення товщини стінки та показників (2.10)–(2.13) дає змогу кількісно оцінити підвищення експлуатаційних характеристик (жорсткості за моментом інерції) та економію матеріалу. Показано, що товщина стінки профілю ПГЗ може бути зменшена без втрати експлуатаційних характеристик, що забезпечує економічну доцільність впровадження гнуто-зварних профілів у конструкції металопластикових вікон. Зазначимо, що зменшення товщини стінки профілю не враховує вибухові та імпульсні навантаження. У разі їх наявності необхідно забезпечити таку товщину стінки профілю, яка здатна ефективно протистояти вибуховим та імпульсним навантаженням великих значень.

### 3 РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

#### 3.1 Профіль 40\*50\*1000\*2.0 мм

Результати випробувань профіля 40\*50\*1000\*2.0 мм (поперечний переріз 40\*50 мм, довжина 1000 мм, товщина стінки 2,0 мм) наведені у табл. 3.1 (за результатами звіту [10]). Результати аналізу показників жорсткості – у табл. 3.2.

Таблиця 3.1 – Абсолютні показники жорсткості армувального профіля 40\*50\*1000\*2.0 мм (величини прогинів  $f$ , мм, на довжині  $L = 1000$  мм при навантаженні фіксованим навантаженням  $P = 500$  Н, і величини сил  $P$ , необхідних для деформації профіля на фіксовану величину прогину  $f$ ) [10]

Виконання профілю, фактична середньо-арифметична товщина стінки $t$ , мм	Прикладання навантаження при випробуванні	Умови навантаження			
		Прогин, $f$ , мм, при навантаженні $P = 500$ Н	Сила $P$ , Н, при прогині профілю		
			$f = 1,5$ мм	$f = 4$ мм	$f = 8$ мм
ПГ, $t = 1,936$ мм	На більшу сторону $P(50)$	3,55	132	498	1990
	На меншу сторону $P(40)$	1,44	534	2740	6600
ПГЗ, $t = 1,843$ мм	На більшу сторону $P(50)$	1,56	474	1760	4400
	На меншу сторону $P(40)$	1,43	540	3100	6950

Таким чином, гнutoзварний профіль ПГЗ показує кращі характеристики жорсткості, ніж гнutoтий ПГ, не дивлячись на більш тонку стінку (товщина стінки профілю ПГЗ на 4,8 % менше, ніж профілю ПГ). Найгірші характеристики жорсткості має профіль гнutoтий ПГ при навантаженні на більшу сторону.

Результати опрацювання за виразами (2.1) та (2.2) наведені у табл. 3.2.

Таблиця 3.2 – Відносні показники жорсткості профіля 40\*50\*1000\*2.0 мм (значення, в скільки разів жорсткість ПГЗ більше, ніж ПГ)

Прикладання навантаження	Відносні показники жорсткості профіля			
	$N_f = f_{ПГ} / f_{ПГЗ}$	$N_{P(f1.5)} = R_{ПГЗ} / R_{ПГ}$	$N_{P(f4)} = R_{ПГЗ} / R_{ПГ}$	$N_{P(f8)} = R_{ПГЗ} / R_{ПГ}$
На більшу сторону P(50)	2,275	3,591	3,534	2,211
На меншу сторону P(40)	1,007	1,011	1,131	1,053

Жорсткість профіля **40\*50\*1000\*2.0 мм** при гнутозварному виконанні у порівнянні з гнутим виконанням:

- за показником прогину в **2,275** разів більше при навантаженні на сторону 50 мм та в **1,007** разів більше при навантаженні на сторону 40 мм;
- за показником сили в **2,2...3,5** разів більше при навантаженні на сторону 50 мм та в **1,01...1.13** разів більше при навантаженні на сторону 40 мм.

Оцінимо можливості зменшення матеріалоемності профілів при переході на гнутозварне виконання. Після розрахунків за алгоритмом п.6 підрозділу 2.2 зведемо результати у табл. 3.3.

Порівняння моментів інерції при навантаженні  $P = 500 \text{ Н}$ :

На більшу сторону (50 мм):

- ПГЗ має момент інерції  $J = 3,18 \times 10^4 \text{ мм}^4$ , що у **2,276 рази** більше, ніж у ПГ ( $J = 1,397 \times 10^4 \text{ мм}^4$ ).

На меншу сторону (40 мм):

- Момент інерції профілю ПГЗ ( $J = 3,469 \times 10^4 \text{ мм}^4$ ) практично дорівнює моменту інерції ПГ ( $J = 3,445 \times 10^4 \text{ мм}^4$ ), різниця лише у **1,007 рази**.

Таблиця 3.3 – Експериментальні величини моментів інерції  $J$ ,  $\text{мм}^4$ , холодногнутих армувальних профілів  $40 \times 50 \times 1000 \times 2.0$  мм

Виконання профілю, фактична середньо-арифметична товщина стінки $t$ , мм	Прикладання навантаження при випробуванні	Умови навантаження			
		При навантаженні $P = 500$ Н	При прогині профілю		
			$f = 1,5$ мм	$f = 4$ мм	$f = 8$ мм
Момент інерції, $J$ , $\text{мм}^4$					
ПГ, $t = 1,936$ мм	На більшу сторону $P(50)$	$1,397 \times 10^4$	$8,73 \times 10^3$	$1,235 \times 10^4$	$2,468 \times 10^4$
	На меншу сторону $P(40)$	$3,445 \times 10^4$	$3,532 \times 10^4$	$6,796 \times 10^4$	$8,185 \times 10^4$
ПГЗ, $t = 1,843$ мм	На більшу сторону $P(50)$	$3,18 \times 10^4$	$3,135 \times 10^4$	$4,365 \times 10^4$	$5,456 \times 10^4$
	На меншу сторону $P(40)$	$3,469 \times 10^4$	$3,571 \times 10^4$	$7,688 \times 10^4$	$8,619 \times 10^4$

Порівняння моментів інерції при прогині  $f = 1,5$  мм:

На більшу сторону:

- Момент інерції ПГЗ ( $J = 3,135 \times 10^4 \text{ мм}^4$ ) у **3,591 рази** більший, ніж у ПГ ( $J = 8,73 \times 10^3 \text{ мм}^4$ ).

На меншу сторону:

- Момент інерції ПГЗ ( $J = 3,571 \times 10^4 \text{ мм}^4$ ) практично дорівнює ПГ ( $J = 3,532 \times 10^4 \text{ мм}^4$ ), різниця лише у **1,011 рази**.

Порівняння моментів інерції при прогині  $f = 4$  мм:

На більшу сторону:

- Момент інерції ПГЗ ( $J = 4,365 \times 10^4 \text{ мм}^4$ ) у **3,534 рази** більший, ніж у ПГ ( $J = 1,235 \times 10^4 \text{ мм}^4$ ).

На меншу сторону:

- Момент інерції ПГЗ ( $J = 7,688 \times 10^4 \text{ мм}^4$ ) у **1,131 рази** більший, ніж у ПГ ( $J = 6,796 \times 10^4 \text{ мм}^4$ ).

Порівняння моментів інерції при прогині  $f = 8$  мм:

На більшу сторону:

- Момент інерції ПГЗ ( $J = 5,456 \times 10^4 \text{ мм}^4$ ) у **2,211 рази** більший, ніж у ПГ ( $J = 2,468 \times 10^4 \text{ мм}^4$ ).

На меншу сторону:

- Момент інерції ПГЗ ( $J = 8,619 \times 10^4 \text{ мм}^4$ ) у **1,053 рази** більший, ніж у ПГ ( $J = 8,185 \times 10^4 \text{ мм}^4$ ).

Результати оцінки того, у скільки разів збільшується жорсткість (за показником моменту інерції) гнутозварного профілю у порівнянні з профілем гнутого виконання наведені у табл. 3.4.

Таблиця 3.4 – Порівняння показників жорсткості (за показником моменту інерції  $J$ ) профіля  $40 \times 50 \times 1000 \times 2.0$  мм (значення, в скільки разів жорсткість ПГЗ більше, ніж жорсткість ПГ)

Прикладання навантаження	$N_{J(500)}$	$N_{J(f1.5)}$	$N_{J(f4)}$	$N_{J(f8)}$
На більшу сторону Р(50)	2,276	3,591	3,534	2,211
На меншу сторону Р(40)	1,007	1,011	1,131	1,053

Як видно, значення у табл. 3.2 та табл. 3.4 співпадають.

Тому робимо висновок, що для визначення показників жорсткості достатньо в подальшому використовувати лише формули (2.1) та (2.2), що скоротить трудомісткість розрахунків.

Після підставлення значень моментів інерції  $J$  у рівняння четвертого ступеня (2.9) та розв'язування його із використанням відповідних коефіцієнтів, отримуємо значення товщин  $t$  стінок профілів.

Результати розрахунків товщин стінок для варіантів виконання профілів ПГ ( $t_{ПГ}$ ) та ПГЗ ( $t_{ПГЗ}$ ) при однакових значеннях навантаження наведені у табл. 3.5.

Таблиця 3.5 – Розрахункові еквівалентні товщини стінок  $t$ , мм, профіля 40\*50\*1000\*2.0 мм, визначені через експериментальний момент інерції

Виконання профілю, фактична середньо-арифметична товщина стінки, $t$ , мм	Прикладання навантаження при випробуванні	Умови навантаження			
		P = 500 Н	f = 1,5 мм	f = 4 мм	f = 8 мм
			Товщина стінки, $t$ , мм		
ПГ, $t = 1,936$ мм	На більшу сторону P(50)	0,281	0,175	0,248	0,505
	На меншу сторону P(40)	0,502	0,515	1,024	1,252
ПГЗ, $t = 1,843$ мм	На більшу сторону P(50)	0,66	0,648	0,92	1,171
	На меншу сторону P(40)	0,506	0,521	1,169	1,324

Занижені значення еквівалентних розрахункових товщин стінок профіля, що деформується, пов'язані з тим, що стріла прогину знаходиться в стані «шарніра плинності» («пластичного шарніра» [14]). Тобто, при навантаженнях, при яких знімалися дані вимірювань, поперечний переріз по стрілі прогину ослаблений переходом у пластичний стан. В зв'язку з цим, оцінка того, у скільки разів можна зменшити товщину стінки (розраховану за показником експериментального моменту інерції) гнutoзварного профілю у порівнянні з профілем гнutoго виконання буде носити орієнтовний характер.

У табл. 3.6 наведені значення  $\Delta t$ , які розраховані згідно з параграфом (v) алгоритма п. 6 підрозділа 2.2. В результаті аналізу даних табл. 3.6 прийнято рішення використовувати для подальших розрахунків величини  $\Delta t_f$ .

У табл. 3.7 наведені результати розрахунків зменшувальних коефіцієнтів  $k_t$  за формулою (2.13) для товщини стінки профіля гнutoзварного виконання.

Таблиця 3.6 – Різниці  $\Delta t$ , мм, між розрахунковою товщиною стінки профілю 40\*50\*1000\*2.0 мм гнutoзварного та гнutoго виконання з однаковою геометрією, розраховані для ідентичних умов навантаження

Прикладання навантаження	Умови навантаження							
	P = 500 Н		f = 1,5 мм		f = 4 мм		f = 8 мм	
	$\Delta t_j$ , мм	$\Delta t_t$ , мм	$\Delta t_j$ , мм	$\Delta t_t$ , мм	$\Delta t_j$ , мм	$\Delta t_t$ , мм	$\Delta t_j$ , мм	$\Delta t_t$ , мм
На більшу сторону P(50)	0,361	0,379	0,461	0,473	0,647	0,672	0,616	0,666
На меншу сторону P(40)	0,003	0,004	0,006	0,006	0,127	0,145	0,062	0,072

Таблиця 3.7 – Результати розрахунків зменшувальних коефіцієнтів  $k_t$  для товщини стінки профіля 40\*50\*1000\*2.0 мм гнutoзварного виконання у порівнянні з профілем гнutoго виконання

Прикладання навантаження	P = 500 Н	f = 1,5 мм	f = 4 мм	f = 8 мм
На більшу сторону P(50)	0,423	0,271	0,27	0,431
На меншу сторону P(40)	0,992	0,988	0,876	0,946

Гнutoзварне виконання значно підвищує жорсткість профілю при навантаженні на більшу сторону (50 мм): жорсткість ПГЗ перевищує жорсткість ПГ у 2,2–3,6 рази залежно від прогину, наприклад, при прогині  $f = 1,5$  мм момент інерції ПГЗ складає  $3,18 \times 10^4$  мм<sup>4</sup>, що у 2,28 рази більше, ніж у ПГ ( $1,40 \times 10^4$  мм<sup>4</sup>). У випадку навантаження на меншу сторону (40 мм), гнutoзварні конструкції забезпечують лише незначне підвищення жорсткості: різниця складає 1,01–1,13 рази, зокрема, при  $f = 1,5$  мм момент інерції ПГЗ

( $3,57 \times 10^4 \text{ мм}^4$ ) майже дорівнює ПГ ( $3,53 \times 10^4 \text{ мм}^4$ ). При прогині  $f = 1,5 \text{ мм}$  момент інерції ПГЗ ( $3,57 \times 10^4 \text{ мм}^4$ ) на 0,01% перевищує момент інерції ПГ ( $3,53 \times 10^4 \text{ мм}^4$ ) при навантаженні на меншу сторону, але при навантаженні на більшу сторону жорсткість ПГЗ у 3,6 рази вища.

Еквівалентні розрахункові товщини стінок профілю гнutoзварного виконання за моментом інерції менші, ніж у профіля гнutoго виконання, що підтверджує можливість зниження товщини матеріалу. Однак, через перехід профілю у пластичний стан при великих навантаженнях, зниження товщини має орієнтовний характер і вимагає додаткових досліджень. Аналіз товщин стінок показує, що зменшення товщини гнuto-зварного профілю (ПГЗ) можливе на 0,36–0,67 мм залежно від умов деформації. Зокрема, при навантаженні на більшу сторону (50 мм) товщина може бути знижена до 1,171 мм для прогину  $f = 8 \text{ мм}$ , тоді як при навантаженні на меншу сторону (40 мм) мінімальне зниження – до 1,324 мм.

Зменшувальні коефіцієнти товщини стінки профілю ПГЗ для оцінки зниження матеріалоемності показують, що товщина стінки може бути зменшена у 0,27–0,99 разів залежно від умов навантаження та прогину, найзначніше – при навантаженні на більшу сторону (50 мм). Результати свідчать, що використання гнutoзварного профілю ПГЗ дозволяє суттєво знизити товщину матеріалу стінок для оптимізації матеріалоемності, але це зниження виправдане переважно при високих показниках жорсткості та малих прогинах.

### **3.2 Профіль 40\*50\*2000\*1.5 мм**

Результати випробувань профіля **40\*50\*2000\*1.5 мм** (поперечний переріз 40\*50 мм, довжина  $L = 2000 \text{ мм}$ , нормативна товщина стінки  $t = 1,5 \text{ мм}$ ) наведені у табл. 3.8 (за усередненими результатами, викладеними у Додатку А).

Результати аналізу відносних показників жорсткості наведені у табл. 3.9.

Таблиця 3.8 – Величини абсолютних показників жорсткості холодногнутого армувального профіля 40\*50\*2000\*1.5 мм (прогини  $f$ , мм, на довжині  $L = 2000$  мм, та сила  $P$ , Н, деформування до стріли прогину  $f = 8$  мм)

Виконання профілю, номінальна товщина стінки $t_{н.0}$ , мм	Прикладання навантаження при випробуванні	Умови навантаження	
		Прогин, $f$ , мм, при навантаженні $P = 500$ Н	Сила $P$ , Н, при прогині профілю $f = 8$ мм
ПГ, $t_{н.0} = 1,5$ мм	На більшу сторону P(50)	9,9	358
	На меншу сторону P(40)	5,75	705
ПГЗ, $t_{н.0} = 1,5$ мм	На більшу сторону P(50)	5,5	684,5
	На меншу сторону P(40)	4,35	873

Гнутозварний профіль (ПГЗ) із номінальною товщиною стінки **1,5 мм** демонструє значно кращу жорсткість, ніж гнутий профіль (ПГ). При навантаженні на більшу сторону (50 мм): його прогин при навантаженні **500 Н** становить лише **5,5 мм**, що на **44 %** менше, ніж у гнутого профілю (9,9 мм), а сила для досягнення прогину **8 мм** у ПГЗ (684,5 Н) майже вдвічі перевищує аналогічний показник для ПГ (358 Н). При навантаженні на меншу сторону (40 мм) різниця менш помітна: прогин ПГЗ складає **4,35 мм**, що лише на **24 %** менше, ніж у ПГ (5,75 мм), однак сила для прогину **8 мм** у ПГЗ (873 Н) все одно на **24 %** перевищує показник для ПГ (705 Н).

Таблиця 3.9 – Відносні показники жорсткості профіля 40\*50\*2000\*1.5 мм (значення, в скільки разів жорсткість ПГЗ більше, ніж ПГ)

Прикладання навантаження	Відносні показники жорсткості профіля	
	$N_f = f_{ПГ} / f_{ПГЗ}$	$N_{P(f8)} = P_{ПГЗ} / P_{ПГ}$
На більшу сторону P(50)	1,8	1,912
На меншу сторону P(40)	1,322	1,238

Жорсткість профіля **40\*50\*2000\*1.5 мм** при гнутозварному виконанні у порівнянні з гнутим виконанням:

- за показником прогину вона в **1,8 разів більша** при навантаженні на сторону 50 мм та в **1,322 разів більша** при навантаженні на сторону 40 мм;
- за показником сили, необхідної для прогину **8 мм**, жорсткість ПГЗ перевищує жорсткість ПГ у **1,912 разів** для навантаження на сторону 50 мм та у **1,238 разів** для навантаження на сторону 40 мм.

Оцінимо можливості зменшення матеріалоемності профілів при переході на гнутозварне виконання. Після розрахунків за алгоритмом п.6 підрозділу 2.2 зведемо результати у табл. 3.10.

Таблиця 3.10 – Експериментальні величини моментів інерції  $J$ ,  $\text{мм}^4$ , холодногнутих армувальних профілів **40\*50\*2000\*1.5 мм**

Виконання профілю, номінальна товщина стінки $t_{н.0}$ , мм	Прикладання навантаження при випробуванні	Умови навантаження	
		При навантаженні $P = 500 \text{ Н}$	При прогині профілю $f = 8 \text{ мм}$
		Момент інерції, $J$ , $\text{мм}^4$	
ПГ, $t_{н.0} = 1,5 \text{ мм}$	На більшу сторону $P(50)$	$4,008 \times 10^4$	$3,552 \times 10^4$
	На меншу сторону $P(40)$	$6,901 \times 10^4$	$6,994 \times 10^4$
ПГЗ, $t_{н.0} = 1,5 \text{ мм}$	На більшу сторону $P(50)$	$7,215 \times 10^4$	$6,791 \times 10^4$
	На меншу сторону $P(40)$	$9,122 \times 10^4$	$8,661 \times 10^4$

Порівняння моментів інерції при навантаженні  $P = 500$ :

На більшу сторону (50 мм):

- ПГЗ має момент інерції  $J = 7,215 \times 10^4 \text{ мм}^4$ , що у **1,801 рази** більше, ніж у ПГ ( $J=4,008 \times 10^4 \text{ мм}^4$ ).

На меншу сторону (40 мм):

- Момент інерції профілю ПГЗ ( $J = 9,122 \times 10^4 \text{ мм}^4$ ) у **1,322 рази** більше, ніж у ПГ ( $J = 6,901 \times 10^4 \text{ мм}^4$ ).

Порівняння моментів інерції при прогині  $f = 8 \text{ мм}$ :

На більшу сторону (50 мм):

- ПГ має момент інерції  $J = 3,552 \times 10^4 \text{ мм}^4$ , що у **1,059 рази** менше, ніж у ПГЗ ( $J = 6,791 \times 10^4 \text{ мм}^4$ ).

На меншу сторону (40 мм):

- Момент інерції профілю ПГЗ ( $J = 8,661 \times 10^4 \text{ мм}^4$ ) у **1,238 рази** більше, ніж у ПГ ( $J = 6,994 \times 10^4 \text{ мм}^4$ ).

Після підставлення значень моментів інерції  $J$  у рівняння четвертого ступеня (2.9) та розв'язування його із використанням відповідних коефіцієнтів, отримуємо значення товщин  $t$  стінок профілів. Результати розрахунків товщин стінок для варіантів виконання профілів ПГ ( $t_{\text{ПГ}}$ ) та ПГЗ ( $t_{\text{ПГЗ}}$ ) при однакових значеннях навантаження наведені у табл. 3.11.

Таблиця 3.11 – Розрахункові еквівалентні товщини стінок  $t$ , мм, профіля  $40 \times 50 \times 2000 \times 1.5 \text{ мм}$ , визначені через експериментальний момент інерції

Виконання профілю, номінальна товщина стінки $t_{н.0}$ , мм	Прикладання навантаження при випробуванні	Умови навантаження	
		$P = 500 \text{ Н}$	$f = 8 \text{ мм}$
		Товщина стінки, $t$ , мм	
ПГ, $t_{н.0} = 1,5 \text{ мм}$	На більшу сторону $P(50)$	0,84	0,739
	На меншу сторону $P(40)$	1,041	1,056
ПГЗ, $t_{н.0} = 1,5 \text{ мм}$	На більшу сторону $P(50)$	1,596	1,491
	На меншу сторону $P(40)$	1,409	1,331

У табл. 3.12 наведені значення  $\Delta t_j$ .

У табл. 3.13 наведені результати розрахунків зменшувальних коефіцієнтів  $k_t$  за формулою (2.13) для товщини стінки профіля гнutoзварного виконання.

Таблиця 3.12 – Різниця  $\Delta t_j$ , мм, між розрахунковою товщиною стінки профілю 40\*50\*2000\*1.5 мм гнutoзварного та гнutoго виконання з однаковою геометрією, розраховані для ідентичних умов навантаження за різницею значень моментів інерції

Прикладання навантаження	Умови навантаження	
	P = 500 Н	f = 8 мм
	Різниця $\Delta t_j$ , мм	
На більшу сторону P(50)	0,664	0,671
На меншу сторону P(40)	0,32	0,239

Таблиця 3.13 – Результати розрахунків зменшувальних коефіцієнтів  $k_t$  для товщини стінки профіля 40\*50\*2000\*1.5 мм гнutoзварного виконання у порівнянні з профілем гнutoго виконання

Прикладання навантаження	Умови навантаження	
	P = 500 Н	f = 8 мм
	Зменшувальні коефіцієнти $k_t$	
На більшу сторону P(50)	0,526	0,496
На меншу сторону P(40)	0,738	0,793

Гнutoзварне виконання значно підвищує жорсткість профілю 40\*50\*2000\*1,5 мм при навантаженні на більшу сторону (50 мм):

- Жорсткість ПГЗ перевищує жорсткість ПГ у **1,801 рази** за моментом інерції при P = 500 Н та у **1,059 рази** за моментом інерції при прогині f = 8 мм.

- Наприклад, при P = 500 Н момент інерції ПГЗ складає  $7,215 \times 10^4 \text{ мм}^4$ , що у **1,801 рази** більше, ніж у ПГ ( $4,008 \times 10^4$ ).

- При f = 8 мм момент інерції ПГЗ ( $6,791 \times 10^4 \text{ мм}^4$ ) лише на **5,9%** перевищує показник для ПГ ( $3,552 \times 10^4 \text{ мм}^4$ ).

При навантаженні на меншу сторону (40 мм) гнutoзварні конструкції також демонструють підвищену жорсткість:

- Жорсткість ПГЗ перевищує жорсткість ПГ у **1,322 рази** при  $P = 500 \text{ Н}$  та у **1,238 рази** при  $f = 8 \text{ мм}$ .
- Наприклад, при  $P = 500 \text{ Н}$  момент інерції ПГЗ ( $9,122 \times 10^4 \text{ мм}^4$ ) у **1,322 рази** більший, ніж у ПГ ( $6,901 \times 10^4 \text{ мм}^4$ ).
- При  $f = 8 \text{ мм}$  момент інерції ПГЗ ( $8,661 \times 10^4 \text{ мм}^4$ ) у **1,238 рази** перевищує показник для ПГ ( $6,994 \times 10^4 \text{ мм}^4$ ).

Еквівалентні розрахункові товщини стінок профілю гнutoзварного виконання за моментом інерції показують можливість значного зменшення матеріалоемності:

- При навантаженні на більшу сторону (50 мм) товщина стінки ПГЗ може бути знижена на **0,664...0,671 мм** порівняно з ПГ, залежно від умов деформації.
- При навантаженні на меншу сторону (40 мм) товщина може бути знижена на **0,32...0,239 мм**.

### 3.3 Профіль 40\*50\*2000\*1.2 мм

Профілі виготовляють гнуттям зі штрипсової заготовки однакової товщини (рулонна заготовка є рівнотовщинною), тому диференційоване зменшення товщини не може бути застосовано. Тому лімітуючим значенням є величина  $\Delta t$ , яку отримують для меншої сторони. Виходячи з результатів, що отримані для профіля **40\*50\*2000\*1.5 мм**, можемо знизити величину товщини штрипсової заготовки на 0,3 мм (знизити  $t$  з 1,5 мм до 1,2 мм).

Після виготовлення профілю 40\*50 мм з штрипсової заготовки з товщиною стінки 1,2 мм та відрізки мірних довжин  $L = 2000 \text{ мм}$ , були проведені випробування на триточковий згин профілю **40\*50\*2000\*1.2 мм**. Результати випробувань наведені у Додатку Б.

**Метою досліджень**, виконаних в цьому підрозділі, є порівняння експлуатаційних показників (моментів інерції) та показників жорсткості гнутого профіля 40\*50 мм з товщиною стінки 1,5 мм (ПГ, 40\*50\*2000\*1.5 мм) та гнутозварного профіля 40\*50 мм з товщиною стінки 1,2 мм (ПГЗ, 40\*50\*2000\*1.2 мм).

Дані для ПГ, 40\*50\*2000\*1.5 брали з результатів, отриманих у підрозділі 3.2. Порівняння абсолютних показників жорсткості для профілів ПГ 40\*50\*2000\*1.5 мм та ПГЗ 40\*50\*2000\*1.2 мм наведено у табл. 3.14. Використані усереднені дані по двох випробуваннях при одних умовах.

Таблиця 3.14 – Величини абсолютних показників жорсткості для профілів ПГ 40\*50\*2000\*1.5 мм та ПГЗ 40\*50\*2000\*1.2 мм

Виконання профілю, номінальна товщина стінки $t_{н.0}$ , мм	Прикладання навантаження при випробуванні	Умови навантаження	
		Прогин, $f$ , мм, при навантаженні $P = 500$ Н	Сила $P$ , Н, при прогині профілю $f = 8$ мм
ПГ, $t_{н.0} = 1,5$ мм	На більшу сторону $P(50)$	9,9	358
	На меншу сторону $P(40)$	5,75	705
ПГЗ, $t_{н.0} = 1,2$ мм	На більшу сторону $P(50)$	6,35	595,5
	На меншу сторону $P(40)$	5,65	676,5

Гнутозварний профіль (ПГЗ) із номінальною товщиною стінки 1,2 мм демонструє вищу жорсткість порівняно з гнутим профілем (ПГ) товщиною 1,5 мм, незважаючи на меншу товщину стінки. При навантаженні на більшу сторону (50 мм) прогин ПГЗ при навантаженні 500 Н становить 6,35 мм, що на **35,9% менше**, ніж у ПГ (9,9 мм), підтверджуючи вищу жорсткість. Для досягнення прогину 8 мм профілю ПГЗ потрібно 595,5 Н, що на **66,4% більше**, ніж для ПГ (358 Н). При навантаженні на меншу сторону (40 мм) різниця в жорсткості менш помітна: прогин ПГЗ становить 5,65 мм, що лише на **1,7% менше**, ніж у ПГ (5,75 мм). Водночас сила для прогину 8 мм у ПГЗ складає

676,5 Н, що на **4,1% менше**, ніж у ПГ (705 Н). Таким чином, гнутозварний профіль демонструє значно кращу жорсткість при навантаженні на більшу сторону, тоді як на меншу сторону його перевага є менш вираженою. Це підтверджує ефективність гнутозварного виконання для зниження матеріалоемності без суттєвих втрат жорсткості. Відносні показники жорсткості профілів наведені у табл. 3.15.

Таблиця 3.15 – Порівняння відносних показників жорсткості профілів ПГ 40\*50\*2000\*1.5 мм та ПГЗ 40\*50\*2000\*1.2 мм (значення, в скільки разів жорсткість ПГЗ,  $t = 1,2$  мм, більше, ніж у ПГ,  $t = 1,5$  мм)

Прикладання навантаження	Відносні показники жорсткості профіля	
	$N_f = f_{ПГ(1.5)} / f_{ПГЗ(1.2)}$	$N_{P(f8)} = P_{ПГЗ(1.2)} / P_{ПГ(1.5)}$
На більшу сторону P(50)	1,559	1,663
На меншу сторону P(40)	1,018	0,959

Жорсткість профілю 40×50×2000 мм при гнутозварному виконанні (ПГЗ,  $t = 1,2$  мм) у порівнянні з гнутим виконанням (ПГ,  $t = 1,5$  мм):

- За показником прогину вона у **1,559 рази більша** при навантаженні на сторону 50 мм та майже не відрізняється при навантаженні на сторону 40 мм (1,018 рази).
- За показником сили, необхідної для прогину 8 мм, жорсткість ПГЗ перевищує жорсткість ПГ у **1,663 рази** для навантаження на сторону 50 мм, але **менша у 0,959 разів** для навантаження на сторону 40 мм.

Розраховували величини моментів інерції для гнутозварного профілю ПГЗ 40\*50\*2000\*1.2 мм та порівнювали їх значення з відповідними для ПГ 40\*50\*2000\*1.5 мм. Результати розрахунків наведені у табл 3.16.

Таблиця 3.16 – Експериментальні величини моментів інерції  $J$ ,  $\text{мм}^4$ , профілів ПГ 40\*50\*2000\*1.5 мм та ПГЗ 40\*50\*2000\*1.2 мм.

Виконання профілю, номінальна товщина стінки $t_{н.0}$ , мм	Прикладання навантаження при випробуванні	Умови навантаження	
		При навантаженні $P = 500 \text{ Н}$	При прогині профілю $f = 8 \text{ мм}$
		Момент інерції, $J$ , $\text{мм}^4$	
ПГ, $t_{н.0} = 1,5 \text{ мм}$	На більшу сторону $P(50)$	$4,008 \times 10^4$	$3,552 \times 10^4$
	На меншу сторону $P(40)$	$6,901 \times 10^4$	$6,994 \times 10^4$
ПГЗ, $t_{н.0} = 1,2 \text{ мм}$	На більшу сторону $P(50)$	$6,249 \times 10^4$	$5,908 \times 10^4$
	На меншу сторону $P(40)$	$7,023 \times 10^4$	$6,701 \times 10^4$

Гнутозварний профіль (ПГЗ) із товщиною стінки 1,2 мм демонструє вищий момент інерції порівняно з гнутим профілем (ПГ) із товщиною 1,5 мм при навантаженні на більшу сторону (50 мм). Момент інерції ПГЗ при  $P=500 \text{ Н}$  складає  $6,249 \times 10^4 \text{ мм}^4$ , що на **55,9% більше**, ніж у ПГ ( $4,008 \times 10^4 \text{ мм}^4$ ). При прогині  $f = 8 \text{ мм}$  момент інерції ПГЗ ( $5,908 \times 10^4 \text{ мм}^4$ ) також перевищує ПГ ( $3,552 \times 10^4 \text{ мм}^4$ ) на **66,3%**. На меншу сторону (40 мм) ПГЗ демонструє схожі показники з ПГ, перевищуючи момент інерції лише на **1,8%** при  $P = 500 \text{ Н}$  та на **4,2%** при  $f = 8 \text{ мм}$ . Це підтверджує, що гнутозварний профіль ефективніший при навантаженні на більшу сторону.

Після підставлення значень моментів інерції  $J$  у рівняння четвертого ступеня (2.9) та розв'язування його із використанням відповідних коефіцієнтів, отримували розрахункові значення товщин  $t$  стінок профілів. Результати розрахунків наведені у табл. 3.17.

Розрахунок похибки  $\delta_t$  підбору товщини профіля проводили за формулою:

$$\delta_t = [ (t_{p1.2} - t_{p1.5}) / t_{p1.5} ] \times 100 \%, \quad (3.1)$$

де  $t_{p1.2}$  та  $t_{p1.5}$  – розрахункові еквівалентні товщини стінок для профілів ПГЗ з номінальною товщиною стінки 1,2 мм та ПГ з номінальною товщиною стінки 1,5 мм відповідно.

Таблиця 3.17 – Розрахункові еквівалентні товщини стінок  $t$ , мм, профіля ПГЗ 40\*50\*2000\*1.2 мм, визначені через експериментальний момент інерції, та їх порівняння з розрахунковими моментами інерції для ПГ 40\*50\*2000\*1.5 мм

Виконання профілю, номінальна товщина стінки $t_{н.0}$ , мм	Прикладання навантаження при випробуванні	Умови навантаження	
		$P = 500 \text{ Н}$	$f = 8 \text{ мм}$
		Розрахункова еквівалентна товщина стінки, $t$ , мм	
ПГ, $t_{н.0} = 1,5 \text{ мм}$	На більшу сторону $P(50)$	0,84	0,739
	На меншу сторону $P(40)$	1,041	1,056
ПГЗ, $t_{н.0} = 1,2 \text{ мм}$	На більшу сторону $P(50)$	1,359	1,277
	На меншу сторону $P(40)$	1,061	1,009

Значення  $t_{p1.2}$  та  $t_{p1.5}$  брали з табл. 3.17. Результити розрахунків наведено у табл. 3.18.

Таблиця 3.18 – Різниці (похибки  $\delta_t$ , %), між розрахунковою еквівалентною товщиною стінки профілів ПГ 40\*50\*2000\*1.5 мм та ПГЗ 40\*50\*2000\*1.2 мм

Прикладання навантаження	Умови навантаження	
	$P = 500 \text{ Н}$	$f = 8 \text{ мм}$
	Похибка $\delta_t$ , %	
На більшу сторону $P(50)$	+61,7	+72,8
На меншу сторону $P(40)$	<b>+1,9</b>	<b>-4,45</b>

Таким чином, при переході з гнучого профілю (ПГ) товщиною стінки  $t = 1,5 \text{ мм}$  на гнучозварний профіль (ПГЗ) товщиною  $t = 1,2 \text{ мм}$ , жорсткість та міцність такого профілю за критерієм рівності розрахункової еквівалентної

товщини стінки витримується близько до оптимуму. При умовах навантаження на меншу сторону (40 мм) розрахункова еквівалентна товщина стінки для профіля ПГЗ (з  $t = 1,2$  мм) практично ідентична товщині стінки профіля ПГ (з  $t = 1,5$  мм), різниця складає лише **1,9...4,45%**, що підтверджує правильність вибору зменшеної товщини. При навантаженні на більшу сторону (50 мм) жорсткість профіля ПГЗ забезпечується із суттєвим запасом, оскільки розрахункова товщина стінки перевищує товщину ПГ на **61,7–72,8%**. Це свідчить, що обмеження жорсткості профіля пов'язане саме з умовами навантаження на меншу сторону, де величина зменшення товщини стінки була підібрана оптимально. Таким чином, перехід до гнutoзварного виконання із зменшеною товщиною стінки не лише дозволяє знизити матеріалоемність, але й забезпечує необхідну міцність та жорсткість при навантаженнях.

Формула для розрахунку зменшувальних коефіцієнтів для цього випадку має вигляд:

$$k_t = t_{p1.2} / t_{p1.5}. \quad (3.2)$$

Результати розрахунків наведені в табл. 3.19.

Таблиця 3.19 – Результати розрахунків зменшувальних коефіцієнтів  $k_t$  для товщини стінки профіля ПГ 40\*50\*2000\*1.5 мм при переході на гнutoзварний профіль ПГЗ 40\*50\*2000\*1.2 мм

Прикладання навантаження	Умови навантаження	
	P = 500 Н	f = 8 мм
	Зменшувальні коефіцієнти $k_t$	
На більшу сторону P(50)	0,618	0,579
На меншу сторону P(40)	0,981	1,047

При умовах навантаження на меншу сторону (40 мм) зменшувальні коефіцієнти  $k_t$  наближаються до одиниці (0,981 при P = 500 Н та 1,047 при

$f = 8$  мм). Це підтверджує, що зменшення товщини стінки з 1,5 мм до 1,2 мм було підібране коректно.

**Висновок.** Перехід з гнутого профілю (ПГ) товщиною стінки 1,5 мм на гнутозварний профіль (ПГЗ) товщиною 1,2 мм дозволив суттєво знизити матеріалоемність без втрат міцності та жорсткості. При навантаженні на меншу сторону (40 мм) розрахункова еквівалентна товщина стінки ПГЗ 1,2 мм практично відповідає (різниця 1,9–4,45%) показникам ПГ 1,5 мм, що підтверджує можливість вибору товщини штрипсової заготовки 1,2...1,3 при виконанні профіля гнутозварним. На більшу сторону (50 мм) жорсткість ПГЗ 1.2 за критерієм розрахункової еквівалентної товщини стінки реалізується із запасом, перевищуюючи показники ПГ на 61,7–72,8%. Зменшувальні коефіцієнти  $k_t$ , близькі до одиниці для меншої сторони, підтверджують, що зниження товщини стінки з 1,5 мм до 1,2 мм може забезпечити необхідні експлуатаційні характеристики.

Таким чином, при переході з гнутого профілю (ПГ,  $t = 1,5$  мм) на гнутозварний профіль (ПГЗ  $t = 1,2$  мм):

- Жорсткість (за критеріями прогину та сили на прогин) при навантаженні на **більшу сторону (P(50))** підвищується на **56–66%**.
- Жорсткість (за критеріями прогину та сили на прогин) при навантаженні на **меншу сторону (P(40))** залишається практично на тому ж рівні, з відхиленням не більше  $\pm 4\%$  залежно від умов навантаження.

Перехід від гнутого профілю з товщиною стінки 1,5 мм до гнутозварного профілю із зменшеною до **1,2 мм** товщиною стінки дозволяє **суттєво знизити матеріаломісткість при незначній втраті експлуатаційних властивостей**. На більшу сторону забезпечується значний запас жорсткості, а на меншу сторону показники еквівалентної розрахункової товщини стінки залишаються близькими до вихідних значень профілю з товщиною стінки **1,5 мм**.

Враховуючі наявність незначного погіршення показників жорсткості при навантаженні на меншу стінку профіля, рекомендованою товщиною стінки для гнутозварного профілю 40\*50 є **1,3 мм**.

### 3.4 Розрахунок економії матеріалу

Розрахунок економії матеріалів на погонний метр (1000 мм) профілю наведено у табл. 3.20. Густина сталі  $\rho = 7850 \text{ кг/м}^3$ .

Таблиця 3.20 – Розрахунок економії матеріалу на погонний метр профілю

Профіль	Довжина розгортки, мм	Товщина, мм	Площа перерізу, мм <sup>2</sup>	Об'єм, м <sup>3</sup>	Маса погонного метра, кг
ПГ 40*50*1.5	181,2	1,5	271,8	0,0002718	2,134
ПГЗ 40*50*1.2	185,8	1,2	222,96	0,00022296	1,750
Економія					0,384

Перехід з гнutoго профілю (ПГ) товщиною 1,5 мм на гнutoзварний профіль (ПГЗ) товщиною 1,2 мм дозволяє знизити масу погонного метра профілю на **0,384 кг**, що еквівалентно економії **18%** матеріалу. Це підтверджує ефективність гнutoзварного виконання для зменшення матеріалоємності без втрати основних експлуатаційних властивостей профілю.

**Висновки.** Перехід з гнutoго профілю (ПГ) на гнutoзварний профіль (ПГЗ) дозволив суттєво зменшити матеріалоємність, забезпечивши економію матеріалу на **18%** завдяки зниженню товщини стінки з **1,5 мм** до **1,2 мм**. Жорсткість і міцність профілю ПГЗ при навантаженні на меншу сторону практично відповідають показникам ПГ, що підтверджує правильність вибору зменшеної товщини, а при навантаженні на більшу сторону забезпечується суттєвий запас жорсткості. Експлуатаційні характеристики профілю ПГЗ підтверджують його ефективність та доцільність впровадження для зниження витрат матеріалів без втрати функціональних властивостей.

#### **4 ЗАСТЕРЕЖЕННЯ ЩОДО ВИКОРИСТАННЯ В УМОВАХ ВИБУХОВИХ ТА ІМПУЛЬСНИХ НАВАНТАЖЕНЬ**

Зважаючи на те, що Україна знаходиться в зоні воєнного конфлікту, під час проектування і використання армуючих профілів для будівельних конструкцій необхідно враховувати можливість впливу вибухових та імпульсних навантажень. Стандартний підхід до зменшення товщини стінки профілю для економії матеріалів може бути недоцільним у випадках, коли конструкції зазнають значних динамічних впливів.

Рекомендації:

- 1. Посилення профілів.** Для об'єктів, які можуть бути піддані впливу вибухових навантажень, слід розглядати можливість збільшення товщини стінки профілю. Це дозволить забезпечити додаткову міцність і зменшити ризик руйнування конструкцій під дією імпульсних ударів.
- 2. Моделювання динамічних навантажень.** Необхідно проводити додаткове моделювання та випробування профілів на витривалість під дією вибухових хвиль та інших видів імпульсних навантажень. Це забезпечить точні розрахунки параметрів стійкості та дозволить обґрунтувати підвищені характеристики профілів для критичних умов.
- 3. Розробка спеціалізованих профілів.** Для регіонів з підвищеним ризиком воєнних дій доцільно створювати спеціальні армуючі профілі з посиленими характеристиками, що враховують необхідність стійкості до різких динамічних навантажень. Це може включати не лише збільшення товщини стінки, але й використання високоякісних матеріалів із підвищеним модулем пружності та ударною міцністю.
- 4. Рекомендації для виробників і споживачів.** Під час розробки проектної документації та виготовлення профілів для використання у військових або потенційно небезпечних зонах важливо враховувати специфічні вимоги до стійкості конструкцій. Також необхідно забезпечувати

інформаційну підтримку споживачів щодо доцільності використання профілів підвищеної товщини в умовах вибухових навантажень.

**Висновок:** для об'єктів, які можуть зазнавати значних динамічних навантажень, рішення щодо зміни товщини стінки профілю має переглядатися на користь її збільшення. Таке рішення дозволить підвищити безпеку конструкцій і відповідність сучасним викликам, пов'язаним із військовими діями та іншими надзвичайними обставинами.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

### 1. Підвищення жорсткості при використанні гнутозварних профілів.

Гнутозварні армуючі профілі (ПГЗ) демонструють суттєво вищу жорсткість порівняно з гнутими профілями (ПГ), особливо при навантаженні на більшу сторону (50 мм). Жорсткість ПГЗ перевищує ПГ у 1,8–3,6 рази залежно від типу профілю, товщини стінки та умов навантаження. При цьому ПГЗ навіть із меншою товщиною стінки забезпечують стабільні експлуатаційні показники.

**2. Високі показники експлуатаційних характеристик.** Аналіз результатів моделювання та експериментів підтвердив, що гнутозварні профілі зниженої товщини забезпечують рівень жорсткості, достатній для використання у віконних конструкціях. Показники моменту інерції ПГЗ перевищують аналогічні для ПГ на 55–72%, що гарантує довговічність конструкцій та стійкість до навантажень.

### 3. Раціональний вибір типу профілю залежно від умов експлуатації.

Гнутозварні профілі є доцільними для застосування в конструкціях, які піддаються значним навантаженням, особливо на більшу сторону профілю. Водночас їх ефективність у разі навантаження на меншу сторону практично ідентична з гнутими профілями.

**4. Можливість зменшення матеріалоємності.** Перехід з гнутих на гнутозварні профілі дозволяє зменшувати товщину стінки з 1,5 мм до 1,2...1,3 мм для профілів типорозміру 40×50 мм. Це забезпечує економію матеріалу до 18% на погонний метр профілю без суттєвого зниження жорсткості при навантаженнях на меншу сторону.

Тобто, перехід від гнутого профілю з товщиною стінки 1,5 мм до гнутозварного профілю із зменшеною до 1,2 мм товщиною стінки дозволяє суттєво знизити матеріаломісткість при незначній втраті експлуатаційних властивостей. На більшу сторону забезпечується значний запас жорсткості, а на меншу сторону показники еквівалентної розрахункової товщини стінки

залишаються близькими до вихідних значень профілю з товщиною стінки 1,5 мм.

Враховуючі наявність незначного погіршення показників жорсткості при навантаженні на меншу стінку профіля, рекомендованою товщиною стінки для гнутозварного профілю 40\*50 є 1,3 мм.

**5. Значна економічна та екологічна доцільність впровадження.** Використання гнутозварних профілів сприяє зниженню витрат на виробництво за рахунок економії матеріалу, що відповідає сучасним екологічним стандартам. Це рішення оптимізує виробничі процеси, забезпечуючи конкурентоспроможність продукції на ринку.

**6. Результати роботи** передані Замовнику (див. Акт приймання-передачі, Додаток В) у вигляді цього звіту та технічного звіту (Додаток Г).

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Металопластикові вікна українського виробництва. URL: <https://4etag.kiev.ua/uk/metaloplastikovi-vikna-ukraïnskogo-virobnictva/> (дата звернення: 15.12.2024).
2. Віконний ринок України за 2023 рік: виробництво вікон зросло на 26%. *Derevynnyk*. 2024. URL: <https://derevynnyk.ua/blog/novyny-i-podiyi/vikonnyi-rynok-ukrainy-za-2023-rik-vyrobnytstvo-vikon-zroslo-na-26/> (дата звернення: 16.12.2024).
3. Косар Н. С., Яричевська Я. І. Дослідження галузі металопластикових вікон України та напрями активізації їх виробниками інтернет-технологій. *Менеджмент та підприємництво в Україні: етапи становлення і проблеми розвитку*. 2022. № 1 (7). С. 99–114. URL: <https://science.lpnu.ua/sites/default/files/journal-paper/2022/jun/28241/220373menedzhment-99-114.pdf> (дата звернення: 16.12.2024).
4. Запорізький національний університет. Вітрові навантаження. URL: [https://moodle.znu.edu.ua/pluginfile.php/706411/mod\\_resource/content/2/ВІТРОВІ%20НАВАНТАЖЕННЯ.pdf](https://moodle.znu.edu.ua/pluginfile.php/706411/mod_resource/content/2/ВІТРОВІ%20НАВАНТАЖЕННЯ.pdf) (дата звернення: 16.12.2024). 9 с.
5. Кухар В. В., Нагнібеда М. М. Теоретичне дослідження напруженого стану та розрахунок залишкових напружень при гнутті профілів відкритого перерізу. *Обробка матеріалів тиском*. 2019. № 2 (49). С. 61–69.
6. Нагнібеда М. М., Кухар В. В., Радусhev Р. О., Ясько С. Г., Фролов Є. А. Випробування на поперечний згин закритих армуючих профілів гнутого та гнутозварного виконання. *Обробка матеріалів тиском*. 2019. № 2 (49). С. 156–162.
7. Кухарь В. В., Нагнібеда М. М. Теоретичне дослідження напруженого стану та розрахунок залишкових напружень при гнутті профілів відкритого перерізу. *Матеріали XVIII Міжнародної науково-технічної конференції (МНТК) «Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта»*. Київ : НТУУ «КПІ», 2017. С. 98–99.
8. Kukhar V., Sahirov Y., Hornostai V., Markov O., Nahnibeda M. FEM simulation of bending and torsion tests of similar size RHS but of the different production

options. *E3S Web of Conferences*. 2021. Vol. 234. P. 00079. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202123400079>.

9. Kukhar V. V., Sahirov Y. G., Hornostai V. M., Markov O. E., Nahnibeda M. M. FEM analysis of stress-strain state and material consumption of RHS with longitudinal gap and weld during the tests. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021. Vol. 1037. P. 012025. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1037/1/012025>.

10. Визначення експлуатаційних характеристик сталевих армуючих профілів гнutoго і гнuto-зварного виконання і виявлення резервів зниження матеріаломісткості їх виготовлення. [Текст] : звіт про науково-дослідну роботу № 13/19, виконану за госпдоговором з ПП «ДАНВІС» / В. В. Кухар, Ю. Г. Сагіров, О. О. Радусhev, М. М. Нагнібеда, А. Г. Присяжний, Р. О. Ткачов / ДВНЗ «ПДТУ». Кафедра обробки металів тиском; Кер. роботи В. В. Кухар. Маріуполь : ДВНЗ «ПДТУ», 2019. 116 с.

11. Гурняк Л. І., Гуцуляк Ю. В., Юзьків Т. Б. Опір матеріалів: навчальний посібник. Львів: Новий світ-2000, 2024. 363 с.

12. iCalculator™. 4th Degree Equation Calculator [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://math.icalculator.com/4th-degree-equation-calculator.html> (дата звернення: 14.12.2024).

13. Quadratic Equation Calculator, Cubic Equation Calculator, Quartic Equation Calculator [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.1728.org/quartic.htm> (дата звернення: 14.12.2024). Назва з екрану.

14. Шарнір пластичності [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://msd.com.ua/metalevi-konstrukcii/sharnir-plastichnosti/> (дата звернення: 14.12.2024).

	<b>ПРОТОКОЛ ВИПРОБУВАНЬ</b> <b>МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ МЕТАЛЕВИХ МАТЕРІАЛІВ</b> PROTOCOL OF TESTS MECHANICAL PROPERTIES OF METALLIC MATERIALS cpdk@ukr.net      cpdk.com.ua      @cpdk_ua		Протокол <i>Report</i>	№7.8/1393-d-1
			Дата видання <i>Dated</i>	24.09.2024р.
			Сторінка <i>Page</i>	1 / 1

### Загальні відомості / General data

<b>Замовник</b> <i>Customer</i>		ПП «ДАНВІС»	
<b>Виконавець</b> <i>Performer</i>		ТОВ «Центр промислової діагностики та контролю»	
<b>Проект</b> <i>Project</i>		Випробування профілю (не зварного) методом трьох точкового згину (методика надана замовником).	
<b>Маркування зразка</b> <i>Mark of specimen</i>		<b>Основний матеріал</b> <i>Base material</i>	Металевий профіль з цинковим покриттям
<b>Направлення прокату</b> <i>Rolling direction</i>	Поздовжнє - <input checked="" type="checkbox"/> Поперечне - <input type="checkbox"/>	<b>Розмір зразка, мм</b> <i>Size, mm</i>	1,5×40×50×2000
<b>Термообробка</b> <i>Post Weld Heat Treatment</i>	---	<b>Сертифікат №/ плавка №</b> <i>Certificate No/ Heat No</i>	---

### Обладнання / Equipment

<b>Штангенциркуль</b> <i>Caliper</i>	ШЦ-1	15120026	29.02.2024р.– 29.06.2025р
<b>Машина випробувальна</b> <i>Testing machine</i>	P-10	1118	07.09.2023р.– 07.12.2024р

### Результати / Results

Випробування на статичний вигин		ДСТУ ISO 7438:2005					
<i>Bend tests</i>							
Зразок №	Розміри, мм	Сторона навантаження	Діаметр формуючої оправки, мм	Відстань між роликками, мм	Зусилля (навантаження), Н	Деформація (прогин), мм	Результати (Примітки)
<i>Specimen No</i>	<i>Size, mm</i>	<i>The side in tension</i>	<i>Former diameter, mm</i>	<i>Distance between rollers, mm</i>	<i>Force, N</i>	<i>Deformation (deflection), mm</i>	<i>Results (Remarks)</i>
1	40×50×2000	50	2	2000	500	9,8	---
1	40×50×2000	40	2	2000	500	5,8	---
2	40×50×2000	50	2	2000	500	10,0	---
2	40×50×2000	40	2	2000	500	5,7	---
3	40×50×2000	50	2	2000	360	8,00	---
3	40×50×2000	40	2	2000	706	8,00	---
4	40×50×2000	50	2	2000	355	8,00	---
4	40×50×2000	40	2	2000	704	8,00	---


<b>Фахівець</b> <i>Specialist</i>	Шишка М.О.	<b>Посвідчення №</b> <i>Certificate №</i>	1911/301
<b>Начальник лабораторії</b> <i>Laboratory chief</i>	Прохоренко М.І.	<b>Підпис</b> <i>Signature</i>	<b>Печатка</b> <i>Stamp</i>
Протокол випробувань стосується винятково тих зразків, що отримані лабораторією і проходили випробування.			Ф-41-ISO
Передрукування протоколу (повне або часткове) без дозволу ВЛТК ТОВ «ЦПДК», заборонено.			



Загальні відомості / General data			
Замовник Customer		ПП «ДАНВІС»	
Виконавець Performer		ТОВ «Центр промислової діагностики та контролю»	
Проект Project		Випробування профілю (зварного) методом трьох точкового згину (методика надана замовником).	
Маркування зразка Mark of specimen		Основний матеріал Base material	Металевий зварний профіль з цинковим покриттям виробник ПП «ДАНВІС»
Направлення прокату Rolling direction	Поздовжнє - <input checked="" type="checkbox"/> Поперечне - <input type="checkbox"/>	Розмір зразка, мм Size, mm	1,5×40×50×2000
Термообробка Post Weld Heat Treatment	---	Сертифікат №/ плавка № Certificate No/ Heat No	3984

Обладнання / Equipment			
Штангенциркуль Caliper	ЩЦ-1	15120026	29.02.2024р.– 29.06.2025р
Машина випробувальна Testing machine	P-10	1118	07.09.2023р.– 07.12.2024р

Результати / Results							
Випробування на статичний вигин Bend tests				ДСТУ ISO 7438:2005			
Зразок № Specimen No	Розміри, мм Size, mm	Сторона навантаження The side in tension	Діаметр формуючої оправки, мм Former diameter, mm	Відстань між роликками, мм Distance between rollers, mm	Зусилля (навантаження), Н Force, N	Деформація (прогин), мм Deformation (deflection), mm	Результати (Примітки) Results (Remarks)
1	40×50×2000	50	2	2000	500	5,4	---
1	40×50×2000	40	2	2000	500	4,3	---
2	40×50×2000	50	2	2000	500	5,6	---
2	40×50×2000	40	2	2000	500	4,4	---
3	40×50×2000	50	2	2000	691	8,00	---
3	40×50×2000	40	2	2000	870	8,00	---
4	40×50×2000	50	2	2000	678	8,00	---
4	40×50×2000	40	2	2000	876	8,00	---

Фахівець Specialist	Шишка М.О.	Посвідчення № Certificate №	1911/301	
Начальник лабораторії Laboratory chief	Прохоренко М.І.	Підпис Signature	Печатка Stamp	
Протокол випробувань стосується винятково тих зразків, що отримані лабораторією і проходили випробування. Передрукування протоколу (повне або часткове) без дозволу ВЛТК ТОВ «ЦРДК», заборонено.				
				Ф-41-ISO

	<b>ПРОТОКОЛ ВИПРОБУВАНЬ</b> <b>МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ МЕТАЛЕВИХ МАТЕРІАЛІВ</b> <b>PROTOCOL OF TESTS</b> <b>MECHANICAL PROPERTIES OF METALLIC MATERIALS</b>		Протокол <i>Report</i>	<b>№7.8/1458-d-1</b>
	cpdk@ukr.net      cpdk.com.ua      @cpdk_ua		Дата видання <i>Dated</i>	<b>13.11.2024р.</b>
			Сторінка <i>Page</i>	<b>1 / 1</b>

## Загальні відомості / General data

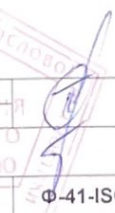

Замовник <i>Customer</i>	ПП «ДАНВІС»		
Виконавець <i>Performer</i>	ТОВ «Центр промислової діагностики та контролю»		
Проект <i>Project</i>	Випробування профілю (зварного) методом трьох точкового згину (методика надана замовником).		
Маркування зразка <i>Mark of specimen</i>		Основний матеріал <i>Base material</i>	Металевий зварний профіль з цинковим покриттям виробник ПП «ДАНВІС»
Направлення прокату <i>Rolling direction</i>	Поздовжнє - <input checked="" type="checkbox"/> Поперечне - <input type="checkbox"/>	Розмір зразка, мм <i>Size, mm</i>	1,2×40×50×2000
Термообробка <i>Post Weld Heat Treatment</i>	---	Сертифікат №/ плавка № <i>Certificate No/ Heat No</i>	---

## Обладнання / Equipment

Штангенциркуль <i>Caliper</i>	ЩЦ-1	15120026	29.02.2024р.– 29.06.2025р
Машина випробувальна <i>Testing machine</i>	P-10	1118	07.09.2023р.– 07.12.2024р

## Результати / Results

Випробування на статичний вигин <i>Bend tests</i>				ДСТУ ISO 7438:2005			
Зразок № <i>Specimen No</i>	Розміри, мм <i>Size, mm</i>	Сторона навантаження <i>The side in tension</i>	Діаметр формуючої оправки, мм <i>Former diameter, mm</i>	Відстань між роликками, мм <i>Distance between rollers, mm</i>	Зусилля (навантаження), Н <i>Force, N</i>	Деформація (прогин), мм <i>Deformation (deflection), mm</i>	Результати (Примітки) <i>Results (Remarks)</i>
1	40×50×2000	50	2	2000	500	6,25	---
1	40×50×2000	40	2	2000	500	5,6	---
2	40×50×2000	50	2	2000	500	6,45	---
2	40×50×2000	40	2	2000	500	5,7	---
3	40×50×2000	50	2	2000	591	8,00	---
3	40×50×2000	40	2	2000	680	8,00	---
4	40×50×2000	50	2	2000	600	8,00	---
4	40×50×2000	40	2	2000	673	8,00	---

Фахівець <i>Specialist</i>	Шиска М.О.	Посвідчення № <i>Certificate №</i>	1911/301	Підпис <i>Signature</i>	
Начальник лабораторії <i>Laboratory chief</i>	Прохоренко М.І.	Підпис <i>Signature</i>	Печатка <i>Stamp</i>		Ф-41-ISO

Протокол випробувань стосується винятково тих зразків, що отримані лабораторією і проходили випробування. Передрукування протоколу (повне або часткове) без дозволу ВЛТК ТОВ «ЦРДК», заборонено.

**АКТ**  
**приймання-передачі виконаної роботи**  
**за Договором № 20247046 від «25» листопада 2024 р.**

м. Запоріжжя

« 17 » грудня 2024 р.

**ПРИВАТНЕ ПІДПРИЄМСТВО «ДАНВІС»**, далі «Замовник», в особі директора Циміданова Дениса Владиславовича, з однієї сторони, та **ТОВАРИСТВО З ОБМЕЖЕНОЮ ВІДПОВІДАЛЬНІСТЮ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»**, далі «Виконавець», в особі ректора Поважного Олександра Станіславовича, з іншої сторони, склали цей акт про те, що згідно Договору № 20247046 від «25» листопада 2024 р. Виконавець виконав для Замовника роботи, передбачені п.1 Договору та Технічним Завданням (Додаток 1 Договору), а саме:

**«Порівняння експлуатаційних характеристик сталевих замкнених гнутих та гнуто-зварних армувальних профілів і оцінка ефекту зменшення матеріалоемності їх виготовлення за рахунок переходу на гнуто-зварне виконання».**

У Замовника претензій до якості виконаних робіт немає.

За виконану роботу Замовник сплачує Виконавцю суму 41 000,00 грн. (сорок одна тисяча гривень 00 коп.).

34 166,67 грн. (тридцять чотири тисячі сто шістдесят шість грн. 67 коп.) без ПДВ. Сума ПДВ становить 6 833,33 грн. (шість тисяч вісімсот тридцять три грн. 33 коп.).

**ЗАМОВНИК**

ПРИВАТНЕ ПІДПРИЄМСТВО «ДАНВІС»  
м. Київ, 04053,  
площа Львівська, будинок 4А, офіс 10.  
код ЄДРПОУ 31265999  
п/р UA 8430 7770 0000 0260 0741 1123 830  
в АТ «А-БАНК» м. Київ,  
МФО 307770

**ВИКОНАВЕЦЬ**

«ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
«МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»  
м. Запоріжжя, 69008,  
вул. Південне шосе 80  
код ЄДРПОУ 43663468  
п/р UA 1033 4851 0000 0000 2600 9120 844  
в АТ «ПУМБ» м. Київ,  
МФО 333485  
ІПН 436634605826  
Тел: (068) 572-09-26,  
(050) 804-44-14

**ЗАМОВНИК**

Директор  Д. В. Циміданов



**ВИКОНАВЕЦЬ**

Ректор  О. С. Поважний



## ТЕХНІЧНИЙ ЗВІТ

за результатами виконання науково-дослідної роботи

### «Порівняння експлуатаційних характеристик сталевих замкнених гнутих та гнуто-зварних армувальних профілів і оцінка ефекту зменшення матеріалоємності їх виготовлення за рахунок переходу на гнуто-зварне виконання»

за договором № 20247046 від 25.11.2024 р. між ПП «ДАНВІС» (Замовник) та ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА» (Виконавець)

#### Мета і визначення НДР (згідно з технічним завданням)

I. Порівняння результатів випробувань та надання висновків щодо відмінностей характеристик жорсткості сталевого армувального профіля, виготовленого багатовалковим формуванням штаби на профілезгинальному стані в профіль замкненого перерізу типорозміру № 40\*50 (40 мм x 50 мм):

(а) із товщиною стінки 2,0 мм, за двома варіантами:

*Варіант 1:* із зазором між крайками не більше 0,5 мм, сформованим уздовж сторони, що має розмір 40 мм;

*Варіант 2:* з подальшим зварюванням крайок з формуванням поздовжнього зварювального шва по середині сторони, що має розмір 50 мм.

(б) із товщиною стінки 1,5 мм, за двома варіантами:

*Варіант 1:* із зазором між крайками не більше 0,5 мм, сформованим уздовж сторони, що має розмір 40 мм;

*Варіант 2:* із зварним швом, сформованим уздовж сторони, що має розмір 40 мм.

(в) із товщиною стінки 1,2 мм, за одним варіантом:

із зварним швом, сформованим уздовж сторони, що має розмір 40 мм.

II. Оцінка можливості зниження матеріаломісткості профілю за п. I із зварним швом при використанні для його виготовлення сталевий штаби меншої товщини (шляхом розрахунку еквівалентної товщини стінки).

## Результати досліджень

### **Пункт I (а): Порівняння результатів випробувань характеристик жорсткості сталевго армувального профілю із товщиною стінки 2,0 мм**

Таблиця 1.1 – Порівняння характеристик жорсткості профілів 50×40×1000 мм із товщиною стінки 2,0 мм

Параметр	Умови експерименту	ПГ 2,0	ПГЗ 2,0	Перевага ПГЗ
Прогин $f$ при навантаженні $P = 500\text{Н}$ (50 мм), мм	Навантаження $P(50)$	3,55	1,56	+56%
Прогин $f$ при навантаженні $P = 500\text{Н}$ (40 мм), мм	Навантаження $P(40)$	1,44	1,43	+0,7%
Сила $P(50)$ для досягнення прогину $f = 1,5$ мм, Н	Прогин $f = 1,5$ мм	132	474	+259%
Сила $P(40)$ для досягнення прогину $f = 1,5$ мм, Н	Прогин $f = 1,5$ мм	534	540	+1,1%
Сила $P(50)$ для досягнення прогину $f = 8$ мм, Н	Прогин $f = 8$ мм	1 990	4 400	+121%
Сила $P(40)$ для досягнення прогину $f = 8$ мм, Н	Прогин $f = 8$ мм	6 600	6 950	+5,3%
Момент інерції $J(50)$ , мм <sup>4</sup>	Навантаження $P = 500\text{Н}$ , $P(50)$	$1,397 \times 10^4$	$3,18 \times 10^4$	+128%
Момент інерції $J(40)$ , мм <sup>4</sup>	Навантаження $P = 500\text{Н}$ , $P(40)$	$3,445 \times 10^4$	$3,469 \times 10^4$	+0,7%
Момент інерції $J(50)$ , мм <sup>4</sup>	Прогин $f = 1,5$ мм, $P(50)$	$8,73 \times 10^3$	$3,135 \times 10^4$	+259%
Момент інерції $J(40)$ , мм <sup>4</sup>	Прогин $f = 1,5$ мм, $P(40)$	$3,532 \times 10^4$	$3,571 \times 10^4$	+1,1%
Момент інерції $J(50)$ , мм <sup>4</sup>	Прогин $f = 8$ мм, $P(50)$	$2,468 \times 10^4$	$5,456 \times 10^4$	+121%
Момент інерції $J(40)$ , мм <sup>4</sup>	Прогин $f = 8$ мм, $P(40)$	$8,185 \times 10^4$	$8,619 \times 10^4$	+5,3%

Примітка: Знак "+" вказує на перевагу ПГЗ у зменшенні прогину або збільшенні сили чи моменту інерції. Умови випробувань зазначені для навантаження  $P(50)$  (на більшу сторону) та  $P(40)$  (на меншу сторону).

## Висновки за результатами порівняння характеристик жорсткості профілів ПГ 2,0 та ПГЗ 2,0:

### 1. Прогин:

- При навантаженні  $P=500$ , прогин профілю ПГЗ зменшено:
  - На більшу сторону ( $P(50)$ ) – на **56%**.
  - На меншу сторону ( $P(40)$ ) – на **0,7%**.

### 2. Сила для досягнення заданого прогину:

- Для прогину  $f=1,5$  мм:
  - На більшу сторону ( $P(50)$ ), ПГЗ витримує на **259% більше** навантаження.
  - На меншу сторону ( $P(40)$ ), ПГЗ витримує на **1,1% більше** навантаження.
- Для прогину  $f=8$  мм:
  - На більшу сторону ( $P(50)$ ), ПГЗ витримує на **121% більше** навантаження.
  - На меншу сторону ( $P(40)$ ), ПГЗ витримує на **5,3% більше** навантаження.

### 3. Момент інерції:

- При навантаженні  $P=500$  Н:
  - На більшу сторону ( $P(50)$ ), момент інерції ПГЗ більший на **128%**.
  - На меншу сторону ( $P(40)$ ), момент інерції ПГЗ більший на **0,7%**.
- При прогині  $f=1,5$  мм:
  - На більшу сторону ( $P(50)$ ), момент інерції ПГЗ більший на **259%**.
  - На меншу сторону ( $P(40)$ ), момент інерції ПГЗ більший на **1,1%**.
- При прогині  $f=8$  мм:
  - На більшу сторону ( $P(50)$ ), момент інерції ПГЗ більший на **121%**.
  - На меншу сторону ( $P(40)$ ), момент інерції ПГЗ більший на **5,3%**.

### 4. Висновок:

- Профіль із зварним швом (ПГЗ 2,0) демонструє **суттєву перевагу за жорсткістю** порівняно з профілем без шва (ПГ 2,0) при навантаженні на більшу сторону ( $P(50)$ ), зі значним зниженням прогину (до 56%) та підвищенням моменту інерції (до 259%).
- При навантаженні на меншу сторону ( $P(40)$ ) підвищення жорсткості профілю ПГЗ є незначним, що пов'язано зі схожим розподілом напружень у цій конфігурації.

**Пункт І (б): Порівняння результатів випробувань характеристик жорсткості сталевого армувального профілю із товщиною стінки 1,5 мм**

Таблиця 1.2 – Порівняння абсолютних показників жорсткості профілів ПГ 1,5 та ПГЗ 1,5 (розмір профілю: 40×50×2000 мм)

Показник	ПГ 1,5	ПГЗ 1,5	Перевага ПГЗ (%)
<b>Прогин <math>f</math>, мм, при <math>P = 500</math> Н</b>			
- На більшу сторону $P(50)$	9,9	5,5	<b>+44%</b>
- На меншу сторону $P(40)$	5,75	4,35	<b>+24%</b>
<b>Сила <math>P</math>, Н, для прогину <math>f = 8</math> мм</b>			
- На більшу сторону $P(50)$	358	684,5	<b>+91%</b>
- На меншу сторону $P(40)$	705	873	<b>+24%</b>
<b>Момент інерції <math>J</math>, мм<sup>4</sup></b>			
- При $P = 500$ Н			
-- На більшу сторону $P(50)$	$4,008 \times 10^4$	$7,215 \times 10^4$	<b>+80%</b>
-- На меншу сторону $P(40)$	$6,901 \times 10^4$	$9,122 \times 10^4$	<b>+32%</b>
- При $f = 8$ мм			
-- На більшу сторону $P(50)$	$3,552 \times 10^4$	$6,791 \times 10^4$	<b>+91%</b>
-- На меншу сторону $P(40)$	$6,994 \times 10^4$	$8,661 \times 10^4$	<b>+24%</b>

**Висновки за результатами порівняння характеристик жорсткості профілів ПГ 1,5 та ПГЗ 1,5:**

**1. Прогин:**

- Профіль ПГЗ 1,5 демонструє суттєве зменшення прогину:
  - На більшу сторону ( $P(50)$ ) – **на 44%**.
  - На меншу сторону ( $P(40)$ ) – **на 24%**.

**2. Сила для досягнення прогину  $f=8$  мм:**

- На більшу сторону ( $P(50)$ ) сила для ПГЗ перевищує ПГ на **91%**.
- На меншу сторону ( $P(40)$ ) сила для ПГЗ перевищує ПГ на **24%**.

**3. Момент інерції:**

- При навантаженні  $P=500$  Н:

- На більшу сторону ( $P(50)$ ) момент інерції ПГЗ більший на **80%**.
- На меншу сторону ( $P(40)$ ) момент інерції ПГЗ більший на **32%**.
- При прогині  $f=8$  мм:
  - На більшу сторону ( $P(50)$ ) момент інерції ПГЗ більший на **91%**.
  - На меншу сторону ( $P(40)$ ) момент інерції ПГЗ більший на **24%**.

#### 4. Висновок:

- Профіль із зварним швом (ПГЗ 1,5) забезпечує **суттєву перевагу в жорсткості**:
  - На більшу сторону ( $P(50)$ ) підвищення жорсткості досягає **80–91%**.
  - На меншу сторону ( $P(40)$ ) підвищення жорсткості становить **24–32%**.

**Пункт І (в): Порівняння результатів випробувань характеристик жорсткості сталевого армувального профілю із товщиною стінки 1,2 мм**

**Таблиця 1.3 – Порівняння показників жорсткості профілів ПГ 1,5 та ПГЗ 1,2 (розмір профілю: 40\*50\*2000 мм)**

Показник	ПГ 1,5	ПГЗ 1,2	Перевага ПГЗ (%)
Прогин $f$ , мм, при $P = 500$ Н			
- На більшу сторону $P(50)$	9,9	6,35	+35,9%
- На меншу сторону $P(40)$	5,75	5,65	+1,7%
Сила $P$ , Н, для прогину $f = 8$ мм			
- На більшу сторону $P(50)$	358	595,5	+66,4%
- На меншу сторону $P(40)$	705	676,5	-4,1%
Момент інерції $J$ , мм <sup>4</sup>			
- При $P = 500$ Н			
-- На більшу сторону $P(50)$	$4,008 \times 10^4$	$6,249 \times 10^4$	+55,9%
-- На меншу сторону $P(40)$	$6,901 \times 10^4$	$7,023 \times 10^4$	+1,8%
- При $f = 8$ мм			
-- На більшу сторону $P(50)$	$3,552 \times 10^4$	$5,908 \times 10^4$	+66,3%
-- На меншу сторону $P(40)$	$6,994 \times 10^4$	$6,701 \times 10^4$	-4,2%

**Висновки за результатами порівняння характеристик жорсткості профілів ПГ 1,5 та ПГЗ 1,2:**

**1. Прогин (f) при навантаженні P=500 Н:**

- Профіль ПГЗ 1,2 має менший прогин порівняно з ПГ 1,5:
  - На більшу сторону (P(50)) прогин ПГЗ зменшився на **35,9%**.
  - На меншу сторону (P(40)) зменшення прогину становить лише **1,7%**.

**2. Сила (P) для досягнення прогину f=8 мм:**

- На більшу сторону (P(50)) сила для ПГЗ перевищує ПГ на **66,4%**.
- На меншу сторону (P(40)) сила для ПГЗ менша на **4,1%**.

**3. Момент інерції (J):**

- При навантаженні P=500 Н:
  - На більшу сторону (P(50)) момент інерції ПГЗ перевищує ПГ на **55,9%**.
  - На меншу сторону (P(40)) момент інерції ПГЗ збільшився на **1,8%**.
- При прогині f=8 мм:
  - На більшу сторону (P(50)) момент інерції ПГЗ перевищує ПГ на **66,3%**.
  - На меншу сторону (P(40)) момент інерції ПГЗ знизився на **4,2%**.

**4. Висновок:**

**Профіль із зварним швом (ПГЗ 1,2)** забезпечує підвищення жорсткості у порівнянні з профілем ПГ 1,5 при навантаженні на більшу сторону та зберігає показники жорсткості майже ідентичними при навантаженні на меншу сторону:

- **На більшу сторону (P(50)):**
  - Підвищення жорсткості становить **56–66%**.
- **На меншу сторону (P(40)):**
  - Жорсткість залишається **на рівні профілю ПГ 1,5** з відхиленням не більше **±4%** залежно від умов навантаження.

**Пункт II. Оцінка можливості зниження матеріалоємності профілю із зварним швом при використанні для його виготовлення сталевий штаби меншої товщини (шляхом розрахунку еквівалентної товщини стінки).**

Аналіз можливості зниження матеріаломісткості профілю.

**Таблиця 2.1 – Розрахунок економії матеріалу на погонний метр профілю**

Профіль	Товщина, мм	Площа перерізу, мм <sup>2</sup>	Об'єм, м <sup>3</sup>	Маса погонного метра, кг
ПГ 40×50×1,5	1,5	271,8	0,0002718	2,134
ПГЗ 40×50×1,2	1,2	222,96	0,00022296	1,750
Економія				0,384 (18%)

Аналіз розрахункових еквівалентних товщин стінок профілю ПГЗ 40×50×2000×1.2 мм у порівнянні з ПГ 40×50×2000×1.5 мм

**Таблиця 2.2 – Розрахункові еквівалентні товщини стінок профілів ПГ (1,5 мм) та ПГЗ (1,2 мм)**

Показник	ПГ (1,5 мм)	ПГЗ (1,2 мм)	Різниця
На більшу сторону (P(50)) при P = 500 Н	0,84 мм	1,359 мм	+61,7%
На більшу сторону (P(50)) при f = 8 мм	0,739 мм	1,277 мм	+72,8%
На меншу сторону (P(40)) при P = 500 Н	1,041 мм	1,061 мм	+1,9%
На меншу сторону (P(40)) при f = 8 мм	1,056 мм	1,009 мм	-4,5%

## Висновки

### 1. Економія матеріалу:

Перехід із гнutoго профілю (ПГ 1,5 мм) на гнutoзварний профіль (ПГЗ 1,2 мм) дозволяє:

- Знизити масу погонного метра профілю на **0,384 кг**.
- Забезпечити економію матеріалу на **18%**.

### 2. Еквівалентна товщина стінки профілю при навантаженні на більшу сторону (P(50)):

- Еквівалентна розрахункова товщина стінки ПГЗ 1,2 є на **61,7–72,8% більшою**, ніж у гнutoго профілю ПГ, 1,5 мм. Це підтверджує ефективність зварного виконання для забезпечення необхідної жорсткості при зменшеній номінальній товщині стінки.

### 3. Еквівалентна товщина стінки профілю при навантаженні на меншу сторону (P(40)):

- Еквівалентна розрахункова товщина стінки ПГЗ (1,061 мм при  $P = 500$  Н та 1,009 мм при  $f = 8$  мм) показує **незначне зменшення**, що має **близьке значення** до еквівалентної розрахункової товщини стінки ПГ (1,041 мм та 1,056 мм відповідно). Різниця становить лише **+1,9%** при  $P = 500$  Н та **-4,5%** при  $f = 8$  мм.

#### **Загальні висновки:**

- Таким чином, при переході з гнутого профілю (ПГ,  $t = 1,5$  мм) на гнутозварний профіль (ПГЗ  $t = 1,2$  мм):

1. Жорсткість при навантаженні на **більшу сторону (P(50))** підвищується на **56–66%**.

2. Жорсткість при навантаженні на **меншу сторону (P(40))** залишається практично на тому ж рівні, з відхиленням не більше **±4%** залежно від умов навантаження.

- Перехід від гнутого профілю з товщиною стінки 1,5 мм до гнутозварного профілю із зменшеною до **1,2 мм** товщиною стінки дозволяє **суттєво знизити матеріаломісткість** при **незначній втраті експлуатаційних властивостей**. На більшу сторону забезпечується значний запас жорсткості, а на меншу сторону показники еквівалентної розрахункової товщини стінки залишаються близькими до вихідних значень профілю з товщиною стінки **1,5 мм**.

- Враховуючи наявність незначного погіршення показників жорсткості при навантаженні на меншу стінку профіля, рекомендованою товщиною стінки для гнутозварного профілю 40\*50 є **1,3 мм**.

#### **Застереження**

У зв'язку з військовим конфліктом в Україні та можливістю впливу вибухових і імпульсних навантажень, зниження товщини стінки профілю до **1,2...1,3 мм** може бути недоцільним для конструкцій, що піддаються значним динамічним впливам. Рекомендується зберігати товщину стінки не менше **1,5 мм** у критичних умовах експлуатації.

**Професор кафедри металургії  
та організації виробництва,  
д-р техн. наук, професор**

**Володимир КУХАР**