

за відношенням відносних деформацій усадки (мм/мм), які зумовлені зменшенням його вологості за масою (г/г) на одиницю при рівномірному висиханні. Геометрично цей коефіцієнт дорівнює тангенсу кута нахилу кривої відносних деформацій усадки бетону до осі зміни його вологості за масою  $\beta = tg\alpha$ . Також визначають розрахункову граничну деформацію усадки, яка визначається досушуванням зразка до постійної маси.

1. Лівша Р.Я., Орловський Ю.І. Фізико-математична модель деформації усадки і випаровування води із призматичних зразків // *Матеріали III Науч.-прак. семінара, Ровно, 2003.*  
2. Александровский С.В. Расчет бетонных и железобетонных конструкций на изменение температуры и влажности с учетом ползучести. – М.: Стройиздат, 1974. – 439 с.  
3. Шейкин А.Е. Структура, прочность и трещиностойкость цементного камня. – М.: Стройиздат, 1974. – 192 с.  
4. Методические рекомендации по исследованию усадки и ползучести бетона. – М.: НИИЖБ, 1975. – 117 с.  
5. Вплив масштабного фактору та співвідношення вологісної і контракційної складових загальної усадки цементно-піщаних розчинів на напружений стан виробів і конструкцій на їх основі // *Вісн. Нац. ун-ту “Львівська політехніка”*. – 2002. – № 460.

УДК 624.014.2

М.Р. Більський, М.В. Котів

Національний університет “Львівська політехніка”,  
кафедра будівельного виробництва

## ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПОЗДОВЖНЬО-СТИСНУТИХ СТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ, ПОСИЛЕНИХ ПІД НАВАНТАЖЕННЯМ

© Більський М.Р., Котів М.В., 2004

**Описана методика і наведені результати експериментальних досліджень великогабаритних моделей поздовжньо-стиснутих сталевих конструкцій, посилені під навантаженням.**

**The presented papers deals with a specific problem of reconstruction joint metal structures and describe experimental methods research longitudinal compressed steel designs, intensified under the loading.**

**Актуальність проблеми.** Посилення сталевих конструкцій існуючими (традиційними) методами призводить не тільки до невіраваних витрат металу, але і до значних збитків, які матимуть підприємства від простоювань основних фондів у зв'язку із необхідністю значного розвантаження конструкцій перед їх посиленням. Можливість посилення конструкцій під експлуатаційним навантаженням досягається попередньо-напружуючими елементами посилення [1–3].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Результати досліджень сталевих конструкцій, посилені під навантаженням, наведені в монографіях [2–3]. Разом з тим не отримали достатнього експериментального підтвердження практично важливі питання впливу зварювання на роботу посилюваних конструкцій під навантаженням, найраціональнішої величини напружуючих зусиль.

**Метою роботи** було дати експериментальне підтвердження теоретичних положень [2, 3] про ступінь впливу попереднього напруження на роботу сталевих поздовжньо-стиснутих конструкцій як під час їхнього посилення, так і після посилення і збільшення на них зовнішнього навантаження.

**Задачі досліджень (постановка завдання)** зводились ось до яких: а) оцінка роботи стиснутих елементів сталевих конструкцій різних гнучкостей, з різними ексцентриситетами прикладання і

величинами зовнішнього навантаження, зусиллями попереднього напруження; б) порівняння роботи конструкцій, посилені напружуючими елементами з роботою аналогічних за геометричними і фізичними характеристиками конструкцій, але посилені традиційним методом; г) вивчення кількісного характеру впливу зварювання на роботу конструкцій, посилені під навантаженням.

**Виклад основного матеріалу досліджень.** Експериментальні дослідження здійснювали випробуванням моделей конструкцій різних гнучкостей і форм поперечного перерізу.

Маркування моделей прийняте таким. На початку позначена довжина моделей у сантиметрах, потім згідно з табл. 1 – група в буквах. Цифри після букв показують рівень зовнішнього навантаження. Остання арабська цифра: 1 – рівень напружуючого зусилля, розрахованого з умови рівності напружень на контакт старого і нового металу у розрахунковому перетині, 3 – нульовий рівень (традиційне посилення), 2 – проміжний. Посилення моделей виконувалося розпірками, виготовленими з кутників [1].

Під час стягування розпірок поступово збільшувалися довжини кінцевих швів. Після притиснення розпірок до повного контакту з елементом посилення здійснювалося їх точкове прикріплення з подальшим накладенням сполучних шпонкових швів. Перегини розпірок залежно від їхньої гнучкості виконувалися посередині чи в третинах їх довжини.

Випробування здійснювали на спеціально виготовленому стенді, що складається з двох штивних тяг, траверс і насосної станції з домкратом. Конструкція стенда дозволила випробувати елементи різних гнучкостей завдовжки до 5,1 м. З метою забезпечення стійкості моделей із силової площини було встановлено поперечні зв'язки, що не перешкоджали вільним переміщенням перетинів моделей – у площині дії моментів по напрямних столиках, завдяки відшліфованим і покритим графітним мастилом їх поверхням. Опорні частини моделей влаштовувалися у вигляді ножових шарнірів. Моделі по кінцях за допомогою регулюючих гвинтів закріплювали і центрували (за показниками тензорезисторів) на фрезерованих опорних плитах шарнірів. Центрування виконували при їх спробних завантаженнях з ретельною перевіркою за показаннями тензорезисторів, мікроіндикаторів і прогиномірів. Навантаження моделей здійснювали 200-тонним гідродомкратом, ступенями, величиною по 20,5 кН, і менше залежно від їх гнучкості, ексцентриситету, стадії роботи моделі. Кожного разу її витримували 10–15 хв під постійним навантаженням і записували показники вимірювальних приладів.

Величину зовнішнього навантаження заміряли спеціальним, відтарованим зразковим динамометром. Вимірювали фіброві деформації за допомогою автоматичного вимірювача деформацій АИД-4 за показниками тензорезисторів базою 5–20 мм, наклеєних посередині, у чвертях довжини і по кінцях моделі і розпірок. З метою взаємоперевірки результатів вимірювань установлювалися механічні тензометри і переносні індикатори. Вимірювання прогинів і поздовжніх деформацій здійснювали за допомогою прогиномірів типу ПАО-1 і індикаторів годинникового типу ИЧ-10МД. Для визначення кутів повороту опорних перетинів і зближення кінців моделі на відстані 200 мм від осі ножового шарніру на паралельних його сторонах встановлювалися індикатори годинникового типу. Кріплення всіх приладів не було зв'язано з випробувальним стендом. Гнучкість моделей була різною (мала, середня і велика). Кожна група мала у своєму складі чотири підгрупи (залежно від умовних гнучкостей  $\lambda_0 = 4,1$ ;  $\lambda_0 = 3,11$ ;  $\lambda_0 = 2$ ;  $\lambda_0 = 1,12$ ). Навантаження на випробовувані моделі прикладали з різними ексцентриситетами ( $m_0 = 3,0$ ;  $m_0 = 1,0$ ;  $m_0 = 0,5$ ), залежно від яких вони розбивалися на групи А, В, С відповідно. Посилення виконувалося з боку стиснутих волокон. Механічні характеристики матеріалу моделей наведені в табл. 1. Для оцінки впливу величини початкового напруження на несучу здатність посилені моделей, а також відпрацювання технологічних прийомів посилення під навантаженням, посилення виконувалося при різній величині початкового навантаження (табл. 2).

Таблиця 1

**Механічні характеристики зразків, відібраних і випробуваних за ГОСТ 1497-85**

Назва елементів, з яких вирізані і виготовлені стандартні зразки	Кількість випробуваних зразків	Середні значення механічних характеристик (МПа)	
		Границя текучості	Тимчасовий опір
Підсилені стрижні	12	254	418
Елементи підсилення	12	272	424

Таблиця 2

## Результати випробувань моделей, посилених напружувачими елементами

Маркування зразка	Навантаження під час посилення $N_0$	Прогин до посилення $f_0$ , мм		Прогин після посилення $f$ , мм		Зусилля попереднього напруження $N_{p1}$ , кН		Стрілка перегину розпірки $f_p$ , мм	Зварювальний прогин $f_w$ , мм (залишковий)		Несуча здатність $N$ , кН		
		теоретичний	експериментальний	теоретичний	експериментальний	теоретичний	експериментальний		теоретична	експериментальна	експериментальна	теоретична	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
495A	0	0	0	0	0	0	0	0	8,72	8,5	77,3	90	1,16
495A1=1	49	51,04	51,26	22,64	22,7	41,66	40,5	160	17,09	17,1	73	86	1,18
495A1=2	49	51,04	52,17	31,53	32,8	29	28,1	115	18,03	19,84	67,5	81,5	1,21
495A1=3	49	51,04	51,65	50,93	50,26	0	0	0	30,7	28,2	58,1	71	1,22
495A1=1	30	26,84	27,18	12,75	13,1	33,79	34,2	97	12,91	14,53	74,2	87,2	1,18
495A2=2	30	26,84	27,3	14,47	13,25	21	23,11	91	13,45	14,68	43,8	87,2	1,18
495A2=3	30	26,84	26,4	26,03	26,12	0	0	0	14,5	15,93	68,3	78,2	1,15
495B	0	0	0	0	0	0	0	0	8,72	8,31	139,7	152,2	1,09
495B1=1	80	37,87	36,2	9,05	8,72	31,15	32	143	18,42	17,92	125,6	141	1,12
495B1=2	80	37,87	38,2	20,13	19,4	20	21	98,4	20,64	21,4	108,3	131	1,21
495B1=3	80	37,87	37,9	36,9	36,86	0	0	0	31,51	26,31	90,3	107,2	1,19
495B2=1	49	17,03	17,14	4,76	4,38	17,87	18,2	86	13,46	14,34	130,7	141	1,08
495B2=2	49	17,03	16,96	2,61	1,72	21	22,3	93	13,73	13,05	135,8	150	1,1
495B2=3	49	17,03	16,85	16,58	16,54	0	0	0	14,93	14,46	114,6	133	1,16
495C	0	0	0	0	0	0	0	0	8,72	8,48	180,6	189	1,05
495C1=1	102	32,29	34,8	0,74	2,61	25,06	23	136	20	18,8	146	181	1,24
495C1=2	102	32,29	32,34	17,63	15,83	13	14,1	84	24,31	25,3	117,4	151	1,29
495C1=3	102	32,29	31,92	35,84	30,8	0	0	45,85	37,1	28,2	99,7	132	1,32
495C2=1	60	11,48	11,42	0,35	20,2	14,62	15,7	80	17,18	13,85	13,04	189	1,15

Продовження табл. 2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
495C2=3	60	11,48	11,56	11,81	11,32	0	0	0	15,25	14,68	139,7	166	1,19
375A	0	0	0	0	0	0	0	0	5	5,36	91,5	103,2	1,3
375A1=1	56	29,27	30,1	13,79	12,8	44,73	47,1	116	9,51	10,3	88,7	105,7	1,19
375A1=3	56	29,27	29,14	29,38	28,82	0	0	0	16,49	14,26	77,7	86,6	1,11
375B	0	0	0	0	0	0	0	0	5	5,63	177,4	184	1,04
375B1=1	100	21,5	20,6	5,8	5,4	37,07	38,9	106	10,32	9,13	168,8	183	1,08
375B1=3	100	21,5	21,56	21,18	21,04	0	0	0	17,46	14,2	132,3	148	1,12
375C	0	0	0	0	0	0	0	0	5	5,48	241,4	245	1,01
375C1=1	120	14,39	13,2	5,32	4,8	19,4	20,8	70	11,13	11,2	218,3	245,1	1,14
375C1=3	120	14,39	14,28	13,87	13,91	0	0	0	14,83	11,13	182,9	191	1,04
240A	0	0	0	0	0	0	0	0	2,05	2,12	110,7	130,5	1,18
240A1=1	60	11,28	10,6	5,67	6,8	45,2	40,2	71	3,66	3	108,7	126	1,16
240A1=3	60	11,28	11,41	11,24	11,18	0	0	0	5,61	5,24	102,8	106	1,13
240B	0	0	0	0	0	0	0	0	2,05	2,2	231,5	238	1,03
240B1=1	100	6,69	6,6	2,05	1,96	34,91	35,8	58	3,58	3,84	226,1	228	1,01
240B1=3	100	6,69	6,72	6,71	6,54	0	0	0	4,59	4,61	209,6	210,4	1,004
240C	0	0	0	0	0	0	0	0	2,05	2,26	319,5	330,5	1,03
240C1=1	140	5,01	4,98	0,169	0,13	33,94	34,2	58	3,85	4,12	304,6	321	1,05
240C1=3	140	5,01	5,03	4,96	4,91	0	0	0	5,11	5,24	270,8	277	1,02
135A	0	0	0	0	0	0	0	0	0,65	0,56	124,1	145	1,17
135A1=1	60	3,35	3,42	1,71	1,74	43,74	43,2	39	1,1	1,03	123,5	140	1,14
135A1=3	60	3,35	3,26	3,32	3,11	0	0	0	1,54	1,42	120,9	133	1,1
135B	0	0	0	0	0	0	0	0	0,65	0,71	272	277	1,02
135B1=1	120	2,3	2,41	0,73	0,8	40,99	41	39	1,16	1,04	270,4	279	1,03
135B1=3	120	2,3	2,36	2,33	2,3	0	0	0	1,62	1,51	261,4	266	1,02
135C	0	0	0	0	0	0	0	0	0,65	0,68	365	366	1
135C1=1	150	1,46	1,4	0,05	-0,12	36,26	36	38	1,16	1,28	361,1	368	1,02
135C1=3	150	1,46	1,38	1,36	1,37	0	0	0	1,49	1,56	349,3	346	0,99

Експериментальні епюри нормальних напружень показані на рис. 1, 2.

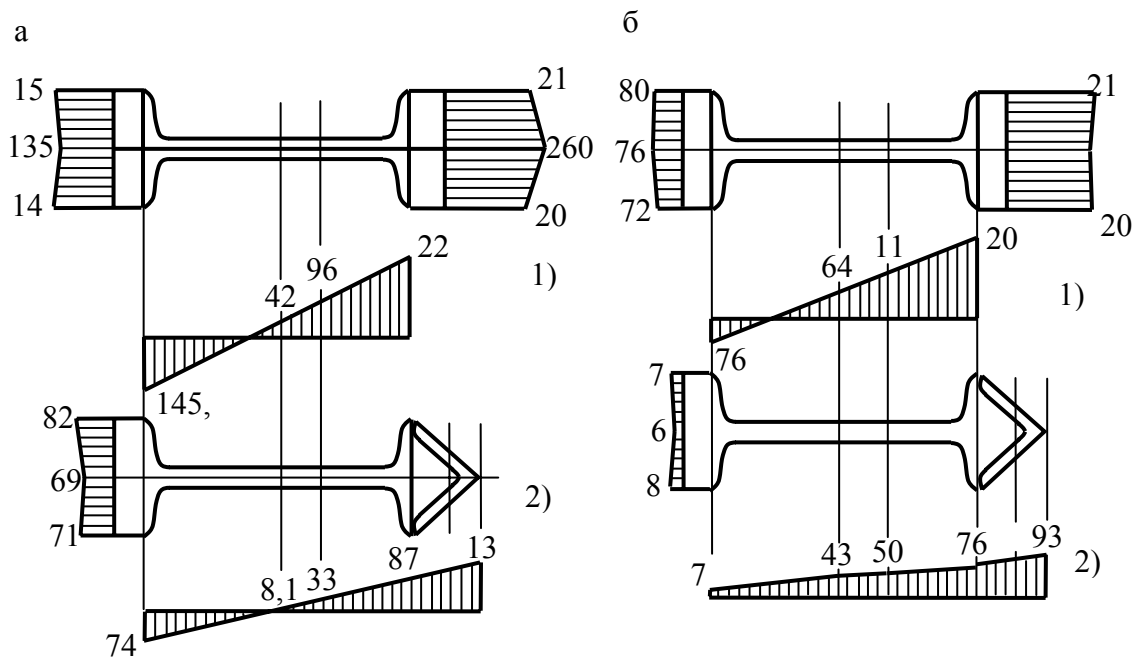


Рис. 1. Епюри нормальних напружень:  
а – 465 А1-1; б – 495 В1-1; 1, 2 – відповідно до і після посилення

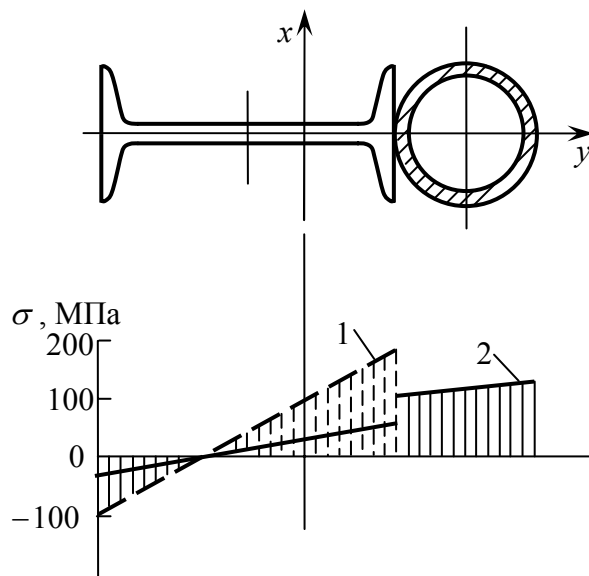


Рис. 2. Епюра нормальних напружень у посиленому перерізі:  
1 – до посилення; 2 – після посилення

Результати випробувань показали суттєвий вплив зовнішнього навантаження на несучу здатність посилених моделей. При величині напружуючого зусилля, яку визначали з умови рівності напружень у розрахункових перетинах на контакті основного і посилюючого елементів, несуча здатність посилених під навантаженням моделей збільшувалась до 37 %. При зменшенні величини зовнішнього навантаження на половину попереднє напруження дало можливість збільшити несучу здатність посиленої моделі тільки на 12,2 %. Отже, чим більше навантажена конструкція під час посилення, тим більшим буде ефект від застосування напружуючих елементів.

Під час посилення напружуючими елементами прогини посилених під навантаженням моделей, зменшувались до 5 і більше разів. Збільшення гнучкості посилюваних моделей ( $\lambda > 1$ ) зменшує прогини як від зовнішнього навантаження, так і залишкові зварювальні прогини.

На основі результатів випробувань були також побудовані графіки функції  $\varphi_e(\bar{\lambda})$  для посиленних стрижнів (рис. 3), а також криві збільшення їх несучої здатності (рис. 4) внаслідок посилення моделей напружуючими елементами. Підвищення несучої здатності посиленних стрижнів у зв'язку із збільшенням напружуючого зусилля також можна пояснити зменшенням початкових і залишкових зварювальних деформацій.

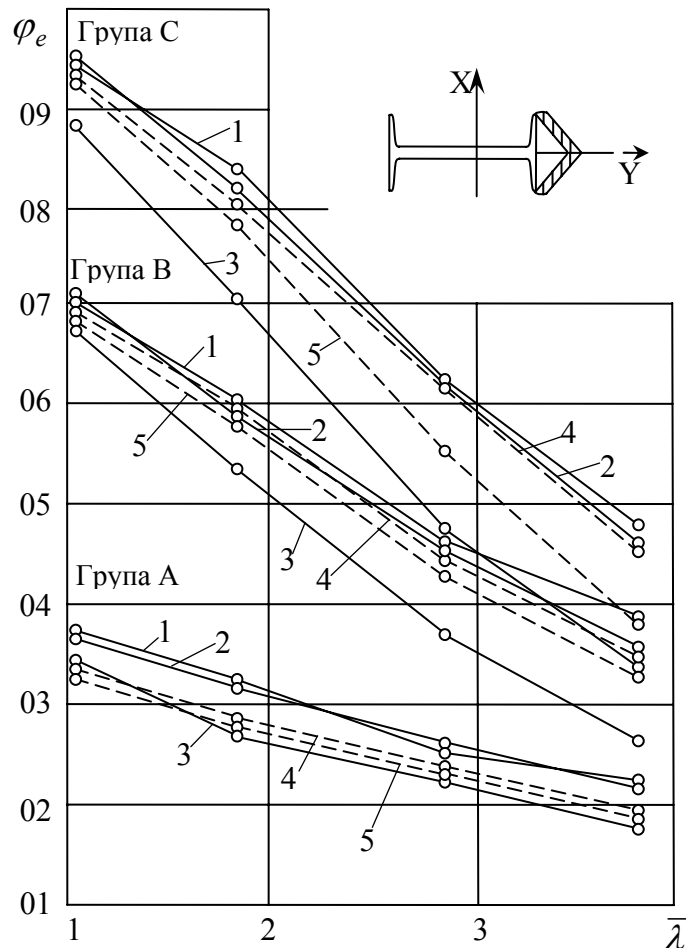


Рис. 3. Залежності  $\lambda - \varphi$ :  
 Експериментальні (суцільні лінії), теоретичні (штрихові лінії);  
 1, 4 – посилення після повного розвантаження; 2, 5 – те саме, напружуючими елементами під навантаженням; 3 – традиційним методом

Залишкові зварювальні прогини моделей, посиленних напружуючими елементами виявилися значно меншими (при середній гнучкості майже наполовину), ніж при посиленні традиційним способом. Це пояснюється також значним впливом на залишкові зварювальні деформації і напруження початкових напружень від впливу зовнішнього навантаження у посилюваному елементі.

Дослідження впливу зварювання на роботу посиленних моделей та експериментальне визначення величини стискувочої сили, що виникає внаслідок приварювання елементів посилення, проводили під час випробування моделей, виготовлених з двотавра № 23Б2. Напружуючі елементи посилення були виготовлені з швелера №10 і їх приварювали до посилюваного стрижня суцільними швами після введення їх у роботу. Наварювання й остигання швів відбувалося при постійній

величині зовнішнього навантаження, створеного на спеціально виготовленому для цих цілей важільному стенді [3]. Навантаження моделей створювали за допомогою вантажів, які встановлювали підвішену до кінця важеля вантажну платформу.

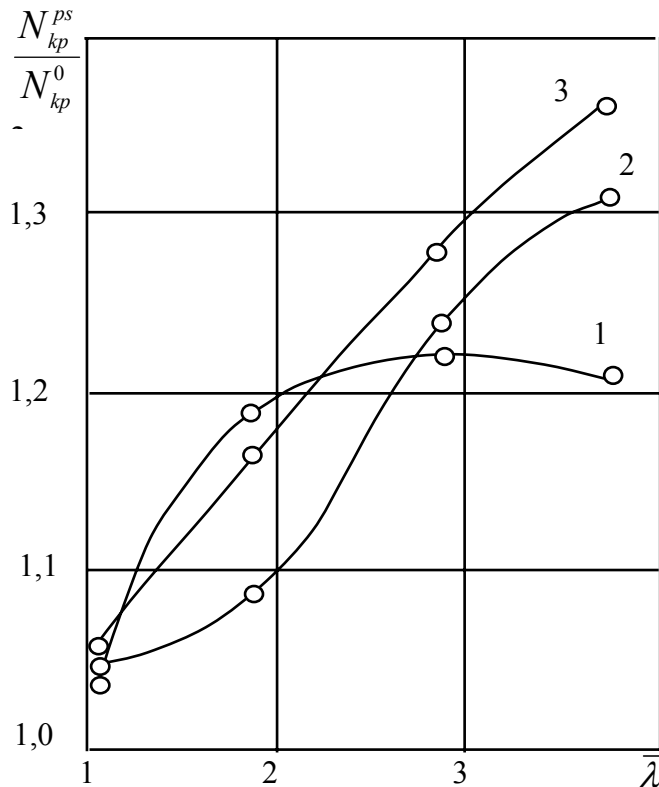


Рис. 4. Криві збільшення несучої здатності зразків, посилених з попереднім напруженням і традиційним методом:  
1–3 – групи відповідно А, В, С

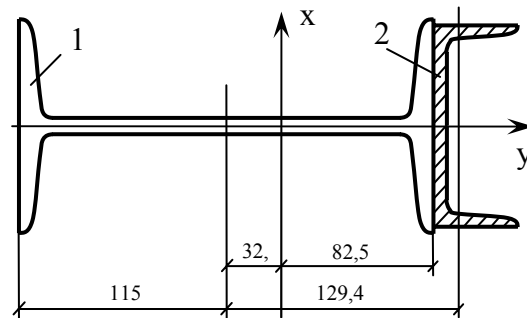


Рис. 5. Схема посилення:  
1 – посилюваний стрижень; 2 – напружуючий елемент

Загалом випробувальний стенд, що складається з двох спарених важільних систем, може створювати зовнішнє навантаження на випробовуваний об'єкт – величиною до 2000 кН.

Обидві важільні системи стенда ретельно тарували за допомогою 100-тонного зразкового динамометра, на підставі чого будували графіки залежності величини навантаження від ваги знімних вантажів і положення важелів. Такі графіки дали можливість визначати величину зовнішнього навантаження на випробовувану модель.

Посилення випробовуваних моделей виконували під навантаженням  $N_0 = 250$  кН. Напружуючі елементами посилення, розпірки з швелера № 10, встановлювали в проектне положення за

схемою, зображеною на рис. 5. Матеріал елементів посилення (розпірок) підбирався так, щоб метал основний і метал, що додається, мали приблизно однакові механічні характеристики. Внаслідок такого підбору були скомплектовані основні і посилюючі елементи так, що вони мали приблизно однакову границю текучості металу, визначену випробуванням плоских моделей на розтяг – близько 275 МПа.

Посилювані моделі перед випробуванням центрували в випробувальному стенді для досягнення початкового ексцентриситету. Власна вага елементів стенда створювала навантаження на модель величиною 20 кН.

Прогини випробовуваних моделей вимірювали в п'яти перетинах по довжині прогиномірами типу ПАО-1 та індикаторами годинникового типу. Фіброві деформації по довжині моделі і периметра її перетинів заміряли за допомогою приладу АИД-4 за показниками дровових тензорезисторів. Для взаємоконтролю і компенсації відсутніх чи недостовірних вимірювань величин фібрових деформацій проводили також рівнобіжні вимірювання останніх за допомогою переносних мікроіндикаторів на заздалегідь установлених базах. Методика випробувань на важільному стенді загалом була аналогічна.

Характерною особливістю випробування моделей було переміщення вверх кінців важелів разом з вантажними платформами при введенні в дію напружуючих елементів. За величиною вертикального переміщення останніх можна було визначити (для порівняння з показами вимірювальних приладів) величину зближення або віддалення кінців випробовуваного зразка. Аналогічно визначали переміщення під час зварювання й остигання зварних швів. Останні накладали ділянками завдовжки до 130 мм у порядку, що забезпечує зрівноважування зварювальних деформацій. Висота катета шва становила близько 8 мм, сила зварювального струму – 150 А. Результати отриманих експериментальних і розрахункових даних наведені в табл. 3.

Таблиця 3

Результати випробування моделей на важільному стенді

Марка зразка	Навантаження під час посилення, кН	Прогин до підсилення, мм		Прогин після підсилення, мм		Стискуюча сила, кн.		Залишковий зварювальний прогин, мм		
		розрахунковий	експериментальний	розрахунковий	експериментальний	розрахунк.	експериментальна	за методом Окерблома	за методом МВТУ	експериментальний
K=1	250	1,72	1,78	0,83	0,9	575	553	2,42	2,24	2,34
K=2	250	1,72	1,69	0,83	0,77	575	584	2,42	2,24	2,08
K=3	250	1,2	1,73	0,83	0,85	575	549	2,42	2,24	2,17

**Висновки:** 1. Посилення традиційним методом без регулювання зусиль пов'язані з підвищеною деформативністю і скорішим вступом в пружно-пластичну стадію роботи посилюваних конструкцій порівняно з посиленням напружуючими елементами.

2. Збільшення несучої здатності посилюваних напружуючими елементами поздовжньо-стиснутих конструкцій залежно від їх гнучкості і ексцентриситету діючих у них зусиль, досягало в дослідних моделях 5–37 % порівняно з їх посиленням традиційним методом.

3. Експериментальна величина стискуючої сили, що виникає внаслідок тужавіння звареного шва у всіх випадках була дещо меншою від теоретичної. Існуючі методики визначення залишкових зварювальних прогинів (Окерблома О.Н. і МВТУ ім. Баумана) забезпечують деяке завищення розрахункових величин цих прогинів (відповідно на 4–17 % і 4–8 %).

1. А. с. 100439 СССР, МКИ 37ю 3/03. Способ усиления колонн / Н.М. Онуфриев. – Оубл. Бюл. // Открытия. Изобрет. – 1955. – № 4. 2. Бельский М.Р. Усиление металлических конструкций под нагрузкой. – К.: Будівельник, 1975. – 117 с. 3. Бельский М.Р. Усиление сжатых стальных конструкций под эксплуатационной нагрузкой. – М.: Стройиздат, 1984. – 152 с.