

**МІЦНІСТЬ І ДЕФОРМАТИВНІСТЬ СТАЛЕВИХ БАЛОК,
ПІДСИЛЕНИХ ШЛЯХОМ ЗБІЛЬШЕННЯ ПЕРЕРІЗУ ПІД
НАВАНТАЖЕННЯМ**

Адаменко В.М.

Київський національний університет будівництва і архітектури

За різними оцінками, у основних галузях промисловості України експлуатується близько 36 мільйонів тон несучих металоконструкцій, із них понад 35% – несучі конструкції виробничих будівель, близько 80% яких побудовано ще у радянські часи. На даний час, експлуатація конструкцій даних будівель супроводжується підвищеною аварійністю та у переважній кількості вони потребують оновлення.

Вагоме місце серед несучих металевих конструкцій виробничих будівель займають сталеві балки. Необхідність підсилення сталевих балок, зокрема шляхом збільшення перерізів, виникає при фізичному зносі конструкцій, що особливо актуально для діючих підприємств хімічної промисловості та металургійного комплексу, за наявності агресивного середовища, та при збільшенні навантажень на конструкції при реконструкції будівель і споруд. Підсилення сталевих балок діючих підприємств та у багатьох випадках, при реконструкції будівель і споруд, виконують, як правило, під дією існуючих навантажень (тобто, без зупинки виробництва) або за умов їх часткового розвантаження.

У діючих національних нормах ДБН В.2.6-163:2010 [1] змінився підхід щодо розрахунку елементів конструкцій, які підсилюються методом збільшення перерізів. У нормах ДСТУ-Н Б EN 1993-1-1:2010 Єврокод 3 [2], будь-які вказівки щодо розрахунку елементів конструкцій, які підсилюються шляхом збільшення перерізів, відсутні. Таким чином, виникає питання узгодження діючих нормативних методів розрахунку сталевих балок, підсилених шляхом збільшення перерізів, та результатів експериментальних досліджень.

Дослідженнями міцності і деформативності підсилених сталевих балок, переважно під навантаженням, займалися Беленя Є.І., Доннік І.Я., Шепельський М.Я., Ребров І.С., Столбов А.В., Богза В.Г. та інш.

Є.І.Беленя в експериментальних і теоретичних дослідженнях, розглянув балки двотаврового перерізу, підсилені симетрично шляхом збільшення перерізу під навантаженням. За результатами досліджень,

було зроблено висновок, що в балках, підсилених під навантаженням, за граничний стан слід приймати початок текучості в крайній фібрі металу підсилення, допускаючи текучість в основному перерізі балки.

В роботі І.Я.Донніка [3] представлені результати експериментальних досліджень прокатних балок, симетрично підсилених, за відсутності та при різних рівнях діючого навантаження. У дослідженнях було виявлено вплив послідовності підсилення балок під навантаженням на їх деформативність.

В роботах І.С.Реброва [4, 5] розглянуті питання розрахунку підсилення плоских стержневих конструкцій довільного типу. Запропоновані І.С.Ребровим рекомендації з підсилення балок та позацентровостиснутих стержнів включені поряд із дослідженнями інших авторів до відповідних розділів Посібника [6].

В даній роботі проаналізовано вимоги діючих норм щодо розрахунку сталевих балок, підсилених шляхом збільшення перерізу під навантаженням. Розрахункові величини міцності і прогинів співставлені із відповідними значеннями, отриманими І.Я.Донніком при випробуванні сталевих підсилених балок.

Тривалий час основним нормативним документом з розрахунку підсилення металевих конструкцій залишався Посібник [6]. Вказаний документ розвиває вимоги розділу норм СНиП II-23-81* щодо проектування конструкцій при реконструкції будівель, що, на даний час, замінений відповідним розділом норм ДБН В.2.6-163:2010 [1].

У Посібнику [6] підсилювані елементи конструкцій поділені на чотири класи, які відрізняються нормою допустимих граничних пластичних деформацій. До 1-го класу віднесено зварні конструкції, які працюють в особливо важких умовах та розраховуються в пружній стадії роботи. Для конструкцій 2-го класу, що сприймають динамічні навантаження, $\varepsilon_{p,lim}=0,001$. Елементи 3-го класу працюють при статичних навантаженнях, $\varepsilon_{p,lim}=0,002$ (критерій малих пружнопластичних деформацій). Для елементів 4-го класу, $\varepsilon_{p,lim}=0,004$ (критерій розвинутих пластичних деформацій).

У нормах ДБН В.2.6-163:2010 [1] розрахунок міцності згинальних елементів, які підсилюються методом збільшення перерізів, аналогічний до розрахунку міцності за критерієм крайової текучості Посібника [6] (елементи 1...3 класів), і регламентовано виконувати залежно від категорії призначення конструкцій, із залежності:

$$\frac{M_x}{I_x} \cdot y \leq R_y \cdot \gamma_M \cdot \gamma_c, \quad (1)$$

де: $\gamma_M=0,95$ – для конструкцій категорії за призначенням А; $\gamma_M=1$ – для конструкцій категорій за призначенням Б і В (табл. В1 ДБН [1]).

При підсиленні конструкцій, у ДБН В.2.6-163:2010 [1] допускається розглядати пружно-пластичну роботу сталі, проте, як впливає із залежності (1), у явному вигляді наявність або відсутність пластичних деформацій у перерізі, який підсилюється не враховується.

В елементах конструкцій, які при підсиленні підлягають нагріванню внаслідок зварювання, розрахункове напруження σ_d , що діє на період підсилення, обмежується значенням $0,2R_y$; $0,4R_y$ та $0,8R_y$ (для конструкцій категорій за призначенням А, Б і В відповідно). У іншому випадку норми регламентують розвантаження або підведення тимчасових опор.

Вказівки щодо визначення вертикальних прогинів підсилюваних елементів конструкцій у ДБН В.2.6-163:2010 [1] відсутні. Проте, розрахунок на міцність і стійкість елементів, підсилених способом збільшення перерізів, норми регламентують виконувати з урахуванням напружень, які існували в елементі в момент підсилення, також необхідно враховувати викривлення елемента, викликані зварюванням.

Початковий прогин балки, завантаженої двома силами на відстанях a від опор, визначаємо від навантажень, які діяли на період підсилення, із залежності:

$$f_0 = \frac{P_{dn} \cdot a^3}{24 \cdot E \cdot I_{n0}} \cdot \left(3 \cdot \frac{\ell^2}{a^2} - 4 \right), \quad (2)$$

де: P_{dn} – зосереджена сила, що діє на період підсилення балки;

ℓ_0 – проліт балки; a – відстань від опори.

Приріст прогину балки від навантажень прикладених після підсилення, визначаємо із залежності:

$$\Delta f = \frac{(P_n - P_{dn}) \cdot a^3}{24 \cdot E \cdot I_n} \cdot \left(3 \cdot \frac{\ell^2}{a^2} - 4 \right), \quad (3)$$

де: P_n – зосереджена сила, що діє після підсилення балки.

Додатковий прогин балки, який виникає при приварюванні елементів підсилення [6, п.4.39]:

$$f_w = \frac{(a \cdot V \cdot l_n \cdot (2 \cdot l - l_n) \cdot \sum (n_i \cdot y_i))}{8 \cdot I_n}, \quad (4)$$

де: V – параметр поздовжнього скорочення елемента при накладенні одиночного шва, $V = 0.04k_f^2$;

n_i – коефіцієнт, що враховує початковий напружено-деформований стан швів розтягнутої та стиснутої зон;

y_i – відстань від нейтральної осі до центра ваги швів.

Повний прогин підсиленої балки [6, п.4.37]:

$$f = f_0 + \Delta f + f_w. \quad (5)$$

Для якісного аналізу міцнісних і деформативних характеристик сталевих балок, підсилених шляхом збільшення перерізу під навантаженням, розглянемо наявні експериментальні дослідження.

Досить детальні результати експериментальних досліджень підсилених балок, приведені, зокрема, у роботі І.Я.Донніка [3].

І.Я.Доннік [3] випробував 7 серій зразків прокатних балок №10 (по дві балки у кожній серії), підсилених за відсутності та при різних рівнях діючого навантаження. Підсилення виконувалося симетрично сталевими смугами 57x4мм, спочатку у нижній зоні балки, а після цього – у верхній. Перша серія зразків складалася з двотавру №10 без підсилення; 2-га серія, з двотавру №10 підсиленого до завантаження; 3-тя серія, з двотавру №10 підсиленого під навантаженням $0,28\sigma_T$; 4-та серія, при $0,56\sigma_T$; 5-та серія, при $0,85\sigma_T$; 6-та серія, при $0,92\sigma_T$; 7-ма серія балок аналогічна до 6-ї, проте смуги підсилення накладалися спочатку зверху, а потім – знизу балок.

Проліт дослідних балок складав 1150мм. Балки завантажувалися двома зосередженими силами, прикладеними на відстані 350мм від опор. Принципова схема підсилених балок із експериментів І.Я.Донніка приведена на рис. 1.



Рис. 1. Схема підсилених балок із експериментів І.Я.Донніка [3].

Величини експериментальних міцнісних характеристик балок і прогинів із досліджень І.Я.Донніка [3] та відповідні їм розрахункові значення, отримані із залежностей (1)...(5), приведені у таблицях 1 і 2.

Приведені експериментальні значення згинальних моментів (табл.1) відповідають появі текучості в полиці двотавра ($M_{п.т.п}$), в його стінці ($M_{п.т.с}$), в елементах підсилення ($M_{п.т.підс}$) та граничному значенню міцності (M_{ult}). Граничні експериментальні згинальні моменти (M_{ult}) за відсутності (2-га серія) та при різних рівнях діючого навантаження (3...6-та серії) відрізняються в межах 4%, при тому, що будь-якої залежності від рівня діючого при підсиленні навантаження не спо-

стерігається. Проте, як впливає із табл.1, наявність початкових напружень в перерізах зумовлює більш ранню текучість полиць і стінки підсилюваних балок (до 26%), що імовірно пов'язано із включенням елементів підсилення у роботу.

Розрахункова міцність балок, підсилених під навантаженням, у середньому на 23% менше граничних експериментальних значень.

Таблиця 1.

Експериментальні і розрахункові значення міцності дослідних балок

Серія	σ_0/σ_T	Експериментальні [3], кН·м				Розрахункові (1)	Δ , %
		$M_{п.т.п}$	$M_{п.т.с}$	$M_{п.т.підс}$	M_{ult}	M_{cal} , кН·м	
1	-	12,0	13,0	-	13,6	10,4	31
2	0	16,7	18,8	-	19,9	15,7	27
3	0,28	16,3	18,2	18,5	18,9	15,7	20
4	0,56	15,2	16,7	18,9	19,1	15,7	22
5	0,85	12,8	15,0	19,0	19,2	15,7	23
6	0,92	12,4	14,5	19,0	19,2	15,7	23

Таблиця 2.

Експериментальні і розрахункові значення прогинів дослідних балок

Серія	Експеримент [3], мм				Розрахункові (2)...(5), мм				$f_{(Mcal)}/f$, %
	$f_{(Mcal)}$	$f_{(Mcal)}/f_{(Mcal)2}$, %	$f_{п.т.с}$	$f_{п.т.підс}$	f_0	Δf	f_w	f	
1	3,9	-	12,65	-	-	-	-	3,0	30
2	4,2	0	12,5	-	0,0	3,0	0,0	3,0	40
3	5,1	21	13,25	14,2	1,0	2,3	1,8	5,1	0
4	5,6	33	7	14,9	2,0	1,7	3,5	7,2	-22
5	5,8	38	5,1	15,75	3,0	1,0	5,5	9,5	-39
6	6,0	43	5,22	17,74	3,2	0,9	6,0	10,1	-41

Приведені експериментальні прогини (табл.2) відповідають навантаженню розрахункової міцності балки ($f_{(Mcal)}$), появи текучості в стінці двотавра ($f_{п.т.с}$) та в елементах підсилення ($f_{п.т.підс}$).

Приріст експериментальних прогинів $f_{(Mcal)}$, що відповідають навантаженню розрахункової міцності балки ($M_{cal}=15,7$ кН·м), зі зростанням рівня діючого при підсиленні навантаження від 0 до $0,92\sigma_T$, відносно прогину балок серії 2 ($f_{(Mcal)}=4,2$ мм) склав 43%. Аналогічний приріст розрахункових прогинів f складає 237%. Таким чином, для розглянутого випадку методика Посібника [6] до 5,5 разів завищує розрахункові значення прогинів, що зумовлено насамперед впливом додаткового прогину від приварювання елементів підсилення (f_w).

Розрахункові прогини балок без підсилення (серії 1) на 30% менші експериментальних прогинів $f_{(Mcal)}$. Розрахункові прогини підсилених балок серії 2 на 40% *менші* експериментальних прогинів $f_{(Mcal)}$, та зі зростанням рівня діючого при підсиленні навантаження до $0,92\sigma_T$ (серія 6), закономірність змінюється на протилежну.

Висновки. За результатами проведених досліджень встановлено наступне:

- гранична несуча здатність балок, підсилених під навантаженням, не залежить від рівня діючого при підсиленні навантаження. Наявність початкових напружень в перерізах зумовлює більш ранню текучість полиць і стінки підсилюваних балок (до 26%);

- розрахункова міцність балок, підсилених під навантаженням, узгоджується із експериментальними значеннями (у межах 23%);

- прогини балок залежать від рівня діючого при підсиленні навантаження. Зі зростанням рівня діючого при підсиленні навантаження до $0,92\sigma_T$, приріст прогину складає 43%;

- методика Посібника [6] суттєво (до 5,5 разів) завищує розрахункові значення прогинів балок, підсилених під навантаженням, та потребує уточнення.

Summary

Methods of calculation of steel beams strengthening under loading according to active standards are analyzed. Design values of strengths and deflections are compared with I.Y.Donnik experimental values of steel beams strengthening under loading.

Література

1. ДБН В.2.6-163:2010. Сталеві конструкції. Норми проектування, виготовлення і монтажу. – Київ: Мінрегіонбуд, 2011. – 127 с. 2. ДСТУ-Н Б EN 1993-1-1:2010. Єврокод 3. Проектування сталевих конструкцій. Частина 1-1. Загальні правила і правила для споруд (EN 1993-1-1:2005, IDT). - Введ. з 2013-07-01. 3. Донник И.Я. Несущая способность прокатных двутавровых балок, усиленных под нагрузкой: Дис...канд. техн. наук: 05.23.01. – Харьков, 1956. – 219 с. 4. Ребров И.С. Проектирование и расчет усиления стальных балок. – Л.: Ленингр. дом науч.-техн. пропаганды, 1984. – 28с. 5. Ребров И.С. Усиление стержневых металлических конструкций: Проектирование и расчет. – Ленинград: Стройиздат, 1988 . – 288с. 6. Пособие по проектированию усиления стальных конструкций (к СНиП II-23-81*)/ Укрниипроектстальконструкция. – М.: Стройиздат, 1989. – 159с.