

РЕКОМЕНДАЦІЇ
ЩОДО ЗАСТОСУВАННЯ КОМПОЗИТНИХ МАТЕРІАЛІВ ФІРМИ SİKA
ДЛЯ ПІДСИЛЕННЯ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ КОНСТРУКЦІЙ

Київ – 2014



МІНІСТЕРСТВО РЕГІОНАЛЬНОГО РОЗВИТКУ, БУДІВНИЦТВА ТА ЖИТЛОВО-
КОМУНАЛЬНОГО ГОСПОДАРСТВА УКРАЇНИ
Державне підприємство «Державний науково-дослідний інститут
будівельних конструкцій»
вул. Івана Клименка, 5/2, м. Київ-37, 03680, тел. (044) 249-72-34, факс (044) 248-89-09

УДК 91.080.40

Затверджую

Перший заступник директора
ДП НДІБК з наукової роботи
доктор техн. наук, проф.

_____ Ю.І. Немчинов

_____ лютого 2014 року

**РЕКОМЕНДАЦІЇ
ЩОДО ЗАСТОСУВАННЯ КОМПОЗИТНИХ МАТЕРІАЛІВ ФІРМИ
SIKA ДЛЯ ПІДСИЛЕННЯ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ КОНСТРУКЦІЙ**

Погоджено секцією №1 Науково-технічної ради ДП НДІБК Мінрегіону
Протокол № 1 від 29 січня 2014 року


Завідуючий відділом надійності
будівельних конструкцій,
д.т.н., с.н.с.

А.М. Бамбура

Завідуючий лабораторією надійності
залізобетонних конструкцій,
к.т.н.

О.Б. Гурківський

Київ – 2014

	ДП «Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій»	Стор. 3 Всього 45	
Найменування документа Рекомендації щодо застосування композитних матеріалів фірми SİKA для підсилення залізобетонних конструкцій	Позначення ЗНТ-219-2167.13-001		
	Статус ФІН	Ред. 001	Дата 28.01.14

ПЕРЕДМОВА

В даних методичних рекомендаціях наведено основні вимоги і фізико-механічні властивості композитних матеріалів фірми SİKA, щодо застосування для підсилення залізобетонних конструкцій.

В Рекомендаціях наведено методику розрахунку підсилення залізобетонних конструкцій зовнішнім армуванням композиційними матеріалами фірми SİKA на основі вуглецевих волокон.


Рекомендації розроблені з урахуванням результатів експериментальних досліджень та досвіду використання для підсилення залізобетонних конструкцій композиційними матеріалами фірми SİKA в Європейському Союзі та Російській Федерації.

Рекомендації розраховані на використання фахівцями виробничниками, проектними і науково-дослідними організаціями.

Розроблені:


- докт. техн. наук, с.н.с. А. Бамбурою, канд. техн. наук О. Гурківським, інж. О. Дороговою, інж. І. Сазоною, інж. Т. Мірошник (ДП НДІБК);
- канд. техн. наук, доц. Ю. Собко (НУ ЛП, Компанія Sika, Україна);
- інж. О. Панченко (Компанія Sika, Україна).

Пропозиції та зауваження просимо надсилати на адресу: 03680, Київ-37, вул. І.Клименка, 5/2, ДП НДІБК, відділ надійності будівельних конструкцій.

	ДП «Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій»	Стор. 4 Всього 45	
Найменування документа Рекомендації щодо застосування композитних матеріалів фірми SİKA для підсилення залізобетонних конструкцій	Позначення ЗНТ-219-2167.13-001		
	Статус ФІН	Ред. 001	Дата 28.01.14

Зміст

ПЕРЕДМОВА	3
1 СФЕРА ЗАСТОСУВАННЯ	5
2 НОРМАТИВНІ ПОСИЛАННЯ	6
3 ДАНІ ДЛЯ ПРОЕКТУВАННЯ ПІДСИЛЕНИХ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ КОНСТРУКЦІЙ.....	7
3.1 Загальні вимоги	7
3.2 Матеріали конструкцій	9
4 РОЗРАХУНОК ПІДСИЛЕНИХ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ КОНСТРУКЦІЙ ЗА ГРАНИЧНИМИ СТАНАМИ I ГРУПИ	13
4.1 Основні положення	13
4.2 Несуча здатність залізобетонних елементів прямокутного перерізу на дію згинальних моментів.....	15
5 РОЗРАХУНОК ПІДСИЛЕНИХ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ КОНСТРУКЦІЙ ЗА ГРАНИЧНИМИ СТАНАМИ II ГРУПИ.....	21
ДОДАТОК А.....	22

	ДП «Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій»	Стор. 5 Всього 45	
Найменування документа Рекомендації щодо застосування композитних матеріалів фірми SİKA для підсилення залізобетонних конструкцій	Позначення ЗНТ-219-2167.13-001		
	Статус ФІН	Ред. 001	Дата 28.01.14

1 СФЕРА ЗАСТОСУВАННЯ

1.1. Дані Рекомендації призначені для застосування при проектуванні підсилення залізобетонних конструкцій без попереднього напруження арматури, виготовлених з важкого і легкого бетонів щільної структури, композиційними матеріалами фірми SİKA в умовах експлуатації при розрахунковій температурі від мінус 30°C до 100°C включно, в неагресивному та слабо агресивному середовищах і які сприймають, як правило, статичні навантаження.

1.2. Для підсилення залізобетонних конструкцій зовнішнім армуванням композитними матеріалами необхідно використовувати вироби в вигляді стрічок і тканин, які відповідають вимогам відповідних стандартів або затверджених, в установленому порядку технічних умов.

1.3. Рекомендації розповсюджуються на проектування підсилення:

- залізобетонних конструкцій, які не мають пошкоджень, але їх необхідно підсилити у зв'язку зі збільшенням в результаті реконструкції (в т.ч. перепрофілювання) споруд, розрахункових експлуатаційних навантажень або через зміни схем роботи конструктивних елементів будівель і споруд;


- залізобетонних конструкцій, які пошкоджені в ході експлуатації (руйнування захисного шару, корозія арматури і бетону, наявність тріщин, надпроектних прогинів і т.д.) з метою відновлення їх експлуатаційних властивостей і підвищення довговічності.

1.4. Рекомендації поширюються на проектування та підсилення залізобетонних конструкцій об'єктів будівництва відповідно з ДБН В 2.6-98:2009.

1.5. У рекомендаціях розглядається підсилення конструкцій композитними матеріалами як заводського виготовлення (стрічки), так і створюваними безпосередньо на будівельному об'єкті з тканин за рахунок просочення і наклейки їх спеціальними полімерними сумішами (в основному на епоксидній основі).

1.6. Одиниці фізичних величин, наведені в даних рекомендаціях: сили виражені в ньютонах (Н) або кілоньютонах (кН); лінійні розміри - в "мм" (для перерізів) або в "м" (для елементів або їх ділянок); міцність матеріалів, напруження, опір і модуль пружності - у мегапаскалях (МПа); розподілені навантаження і зусилля - в кН/м або Н/мм.

1.7. Для залізобетонних конструкцій, які експлуатуються при впливі багаторазово повторних навантажень і розраховуються на витривалість при

	ДП «Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій»	Стор. 6 Всього 45	
Найменування документа Рекомендації щодо застосування композитних матеріалів фірми Sika для підсилення залізобетонних конструкцій	Позначення ЗНТ-219-2167.13-001		
	Статус ФІН	Ред. 001	Дата 28.01.14

впливі динамічних навантажень, а також при впливі низьких температур (нижче мінус 30°C) та середньоагресивних або сильноагресивних середовищ, застосування підсилення з композитних матеріалів не допускається без узгодження з Sika Україна та ДП НДІБК.

1.8. Підсилені конструкції повинні відповідати вимогам щодо вогнестійкості згідно з ДБН В.1.1-7 та ДБН В.1.2-7 [14, 15].

2 НОРМАТИВНІ ПОСИЛАННЯ

1 ДБН В 2.6-98:2009 Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення.

2 ДСТУ Б В.6.2-7-95 Вироби будівельні та залізобетонні збірні. Методи випробовувань навантаженням. Правила оцінки міцності, жорсткості та тріщиностійкості.

3 ДСТУ Б В 2.6-156:2010 Конструкції будинків і споруд. Бетонні та залізобетонні конструкції з важкого бетону. Правила проектування.

4 ДСТУ Б В 2.7-214:2009 Будівельні матеріали. Бетони. Методи визначення міцності за контрольними зразками.

5 ДСТУ Б В 2.7-217:2009 Будівельні матеріали. Бетони. Методи визначення призмової міцності, модуля пружності і коефіцієнта Пуассона.

6 ДСТУ Б В 2.7-219:2009 Будівельні матеріали. Бетони. Методи прискореного визначення міцності на стиск.


7 ДСТУ Б В 2.7-220:2009 Будівельні матеріали. Бетони. Визначення міцності механічними методами неруйнівного контролю.

8 ДСТУ Б В 2.7-223:2009 Будівельні матеріали. Бетони. Методи визначення міцності за зразками, відібраними з конструкцій.

9 ДСТУ 3058-95 (ГОСТ 7566-94) Металлопродукція. Приемка, маркировка, упаковка, транспортирование и хранение. Металлопродукція. Приймання, маркування, пакування, транспортування та зберігання

10 ДСТУ 3760:2006 Прокат арматурний для залізобетонних конструкцій. Загальні технічні умови. Прокат арматурний для залізобетонних конструкцій. Загальні технічні умови (ISO 6935-2:1991, NEQ).

11 Нормативні документи з питань обстежень, паспортизації та надійної експлуатації виробничих будівель і споруд. Київ – 2003.

	ДП «Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій»	Стор. 7 Всього 45	
Найменування документа Рекомендації щодо застосування композитних матеріалів фірми Sika для підсилення залізобетонних конструкцій	Позначення ЗНТ-219-2167.13-001		
	Статус ФІН	Ред. 001	Дата 28.01.14

12 ДБН В.3.1-1:2002 Ремонт і підсилення несучих і огорожувальних будівельних конструкцій і основ промислових будинків та споруд

13 ДСТУ Б В 2.7-43:1996 Бетони важкі. Технічні умови

14 ДБН В.1.1-7:2002 Пожежна безпека об'єктів будівництва

15 ДБН В.1.2-7:2008 Основні вимоги до будівель і споруд. Пожежна безпека

16 ДБН В 1.2-14: 2008 Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель, споруд, будівельних конструкцій та основ

3 ДАНІ ДЛЯ ПРОЕКТУВАННЯ ПІДСИЛЕНИХ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ КОНСТРУКЦІЙ

3.1 Загальні вимоги

3.1.1. Загальні вимоги до ремонту і підсилення залізобетонних конструкцій приймаються у відповідності до розділу 1 ДБН В.3.1-1:2002 [12].


3.1.2. Залізобетонні конструкції, підсилені композитними матеріалами Sika, повинні задовольняти вимогам:

- безпеки (за несучою здатністю);
- експлуатаційній придатності;
- довговічності;

- додатковим вимогам, які вказані в завданні на проектування підсилення.

3.1.3. Підсилення залізобетонних конструкцій слід забезпечувати на всі види граничних станів розрахунком, вибором показників якості матеріалів, призначенням розмірів та конструюванням згідно вимогам ДБН В 2.6-98, ДБН В 1.2-14 та ДСТУ Б В 2.6-156 [1, 16, 3] для конструкцій з важких бетонів і даних Рекомендацій.

3.1.4. Для зовнішнього підсилення матеріали Sika використовуються для поздовжнього і поперечного армування стержневих елементів, для створення армуючих підсилюючих оболонок на колонах і опорах мостів, естакад, консолях колон, для посилення плит, оболонок, елементів ферм та інших конструкцій.

	ДП «Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій»	Стор. 8 Всього 45	
Найменування документа Рекомендації щодо застосування композитних матеріалів фірми Sika для підсилення залізобетонних конструкцій	Позначення ЗНТ-219-2167.13-001		
	Статус ФІН	Ред. 001	Дата 28.01.14

3.1.5. Раціональним ступенем підсилення за допомогою системи Sika є діапазон 10-50% від початкової несучої здатності конструкції.

3.1.6. Система підсилення матеріалами Sika може застосовуватися, якщо фактична міцність на стиск бетону конструкції становить не менше 15 МПа. Це обмеження не поширюється на посилення позацентрово стиснутих елементів горизонтальними обоймами, коли важливий тільки механічний зв'язок обойми з конструкцією з метою відновлення довговічності та експлуатаційної придатності конструкцій.

3.1.7. Розрахунок конструкцій, підсиленних матеріалами Sika, за першою групою граничних станів проводиться у всіх випадках. Розрахунок за другою групою граничних станів проводиться тільки в тих випадках, коли підсилення виконується з умови збільшення розрахункового навантаження.


3.1.8. Розрахунок системи підсилення на основі матеріалів Sika вимагає розгляду декількох видів руйнування і граничних станів підсиленого елемента. Тому спочатку рекомендується орієнтовно призначити площу перерізу елементів підсилення обраного типу і потім змінювати її відповідно з результатами перевірок відповідних граничних станів. Розрахунки проводяться ітераційно, тому доцільно застосування комп'ютерних програм для автоматизації обчислень.

3.1.9. Визначення зусиль в елементах конструкцій проводиться з урахуванням даних, отриманих при обстеженні, перед підсиленням

3.1.10. Підсилення композитними матеріалами не зупиняє процеси корозії арматурної сталі в бетоні. Тому, перед підсиленням конструкції, необхідно обробити бетонну поверхню мігруючим інгібітором корозії арматурної сталі, а при руйнуванні захисного шару - оголити арматуру, очистити до ступеню Sa 2,5 за ISO 12944-IV, негайно захистити її від корозії матеріалом Sika Monotop® – 910N і потім відновити захисний шар спеціальними полімерцементними ремонтними сумішами, що забезпечують високу адгезію до «старого» бетону і запобігають розвитку корозії арматури.

3.1.11 При проектуванні підсилення залізобетонних конструкцій із використанням зовнішнього армування систем Sika важливою умовою надійної експлуатації є дотримання технологічних і конструктивних вимог, передбачених в відповідних рекомендаціях або технологічних картах виробника.

3.1.12 Підсилення на основі систем Sika повинно сприймати зусилля розтягу за умови забезпечення спільності деформацій зовнішнього армування і бетону конструкції.

	ДП «Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій»	Стор. 9 Всього 45	
Найменування документа Рекомендації щодо застосування композитних матеріалів фірми Sika для підсилення залізобетонних конструкцій	Позначення ЗНТ-219-2167.13-001		
	Статус ФІН	Ред. 001	Дата 28.01.14

3.1.13 У граничному стані згинального елемента зусилля в стиснутій зоні сприймаються бетоном і стиснутою стрижневою арматурою, а в розтягнутій зоні - стрижневою арматурою і зовнішньою композитною арматурою.

3.1.14 У граничному стані позacentрово стиснутих шарнірно обпертих залізобетонних колон з малим ексцентриситетом, поперечне розширення сприймається влаштованою оболонкою з систем Sika. Підсилення статично невизначених колон допускається тільки з метою відновлення або продовження довговічності конструкції.

3.1.15 У розрахунках підсилення вважається, що відсутні взаємні зміщення між сталевією арматурою і бетоном, а також між наклеєною зовнішньої арматурою систем Sika і бетонною основою.

3.1.16 У тих випадках, коли схема навантаження залізобетонних елементів призводить до зміни знака згинального моменту, несуча здатність зовнішньої арматури з систем Sika у стиснутій зоні не враховується.

3.1.17 При проектуванні підсилення конструкцій слід враховувати, що несуча здатність не зміцненої конструкції повинна бути достатня для сприйняття постійного і квазіпостійного тимчасового навантаження у разі пошкодження системи посилення внаслідок пожежі, вандалізму або інших причин.


3.2 Матеріали конструкцій

3.2.1. Характеристики бетону та арматури при відсутності пошкоджень приймаються за даними проекту у відповідності із ДБН В 2.6-98:2009 та ДСТУ Б В 2.6-156:2010 [1,2].

3.2.2 За наявністю результатів обстеження підсилюваних конструкцій призначення характеристик бетону та арматури виконують з урахуванням вимог [2, 11, 13].

3.2.3 Розрахункові значення міцності арматури на розтяг за відсутності проектних даних та неможливості відбору зразків допускається призначати в залежності від профілю арматури:

для гладкої арматури $f_{yd} = 155$ МПа;

	ДП «Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій»	Стор. 10 Всього 45	
Найменування документа Рекомендації щодо застосування композитних матеріалів фірми Sika для підсилення залізобетонних конструкцій	Позначення ЗНТ-219-2167.13-001		
	Статус ФІН	Ред. 001	Дата 28.01.14

для арматури періодичного профілю, що має виступи:
з однаковим заходом на обох сторонах профілю („гвинт»)

$$f_{yd} = 245 \text{ МПа};$$

з однієї сторони правий захід, а з другої — лівий („ялинка»)

$$f_{yd} = 295 \text{ МПа}.$$

При цьому значення f_{ywd} приймається $0,8 f_{yd}$.

3.2.4 Для армування в системі композитних матеріалів Sika (КМС) використовуються вуглецеві волокна.

Щільність армуючих вуглецевих волокон в композиті знаходиться в межах $1,5 - 1,6 \text{ г/см}^3$.

Коефіцієнт лінійного температурного розширення композитних матеріалів Sika на основі вуглецевих волокон знаходиться в діапазоні від $(1 \text{ до } 10) \times 10^{-4}/^{\circ}\text{C}$ в поздовжньому і від $(22 \text{ до } 50) \times 10^{-4}/^{\circ}\text{C}$ в поперечному напрямках.

3.2.5 При розтягу КМС мають лінійну залежність між напруженнями і деформаціями аж до руйнування. Властивості КМС в основному визначаються типом, орієнтацією і кількістю армуючих волокон. Механічні властивості всіх систем КМС, мають визначатися за результатами випробувань зразків шаруватого матеріалу з оцінкою об'ємного вмісту волокон, який повинен складати не менше 65%. Механічні характеристики багатошарових пластиків визначаються шляхом випробування зразків з відповідною кількістю шарів тканини (стрічки) відповідно з чинними нормативними документами. Якщо, з різних причин, неможливо отримати основні фізико-механічні характеристики КМС шляхом випробувань дослідних зразків, допускається використовувати дані наведені в таблицях 3.1 і 3.2 відповідно.

3.2.6 Основними характеристиками міцності і деформативності композитних матеріалів є їх характеристичні значення:


f_{fk} – міцність вуглепластиків і вуглецевих тканин на розтяг;

E_f – модуль пружності;

ε_{fuk} – величини граничних деформацій;

α – коефіцієнт лінійної температурної деформації.

3.2.7 Характеристичні значення опору розтягу f_{fk} , значення модуля пружності E_f , характеристичне значення граничних відносних деформацій

	ДП «Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій»		Стор. 11 Всього 45
	Найменування документа Рекомендації щодо застосування композитних матеріалів фірми Sika для підсилення залізобетонних конструкцій		Позначення ЗНТ-219-2167.13-001
		Статус ФІН	Ред. 001 Дата 28.01.14

ε_{fuk} , необхідно визначати за результатами випробовувань композитного матеріалу в відповідності з чинними нормативними документами та приймати значення з забезпеченістю 0,95.

3.2.8 До накопичення достатньої для нормування бази даних, щодо фізико-механічних характеристик вуглепластиків і впливу на них різних факторів у часі, рекомендується приймати характеристичні значення фізико-механічних властивостей отверділих пластиків на основі вуглецевих волокон, представлених у таблицях 3.1 і 3.2.


Таблиця 3.1 – Основні характеристичні фізико-механічні характеристики стрічок КМС

Марка	Товщина, мм	Ширина, мм	Модуль пружності, E_f , МПа	f_{fk} , МПа	ε_{fuk} , %	Наповнення, %
Sika CarboDur [®] S	1,2; 1,3; 1,4; 2,5; 2,6; 3,0	10; 15; 20; 50; 80; 90; 100; 120; 150	160000	3000	1,7	>68
Sika CarboDur [®] M	1,4	50; 60; 90; 100; 120	210000	3000	1,35	>68
CarboDur [®] S626 ¹⁾	2,6	60	165000	2800		>68

Примітка: 1) Стрічка використовується з попереднім напруженням ($\sigma_{p0,max} \leq 1410$ МПа, $\varepsilon_{p0} \leq 0,75\%$).

Таблиця 3.2 – Основні характеристичні фізико-механічні характеристики тканин КМС

Марка	Товщина, мм	Ширина, мм	Модуль пружності, E_f , МПа	f_{fk} , МПа	ε_{fuk} , %	Щільність, г/см ³
SikaWrap [®] -231C	0,129	300; 600	210000	3850	1,7	1,82
SikaWrap [®] -301C	0,167	300; 600	210000	3850	1,7	1,82
SikaWrap [®] -530C	0,290	300	220000	3200	1,7	1,82
SikaWrap [®] -600C	0,324	500	220000	3200	1,7	1,82
SikaWrap [®] -900C	0,478	300	200000	2400	1,43	1,81

	ДП «Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій»	Стор. 12 Всього 45		
		Найменування документа Рекомендації щодо застосування композитних матеріалів фірми Sika для підсилення залізобетонних конструкцій		Позначення ЗНТ-219-2167.13-001
		Статус ФІН	Ред. 001	Дата 28.01.14

3.2.8 Величина розрахункової міцності вуглепластиків і вуглецевих тканин на розтяг визначається, як:

$$f_{fd} = a_f f_{fk} / \gamma_f \quad (3.1)$$

де: f_{fd} - розрахункова міцність вуглепластиків і вуглецевих тканин на розтяг;

f_{fk} - характеристична міцність вуглепластиків і вуглецевих тканин на розтяг;

γ_f - коефіцієнт надійності для композитних матеріалів з вуглецевого волокна;

a_f - коефіцієнт надійності, що враховує вплив на міцність вуглепластика при розтягу, тривалості навантаження та несприятливих впливів, релаксації напружень і таке інше.


До накопичення достатньої для нормування бази даних щодо значення коефіцієнта варіації фізико-механічних характеристик вуглепластиків та впливу на них різних факторів в часі рекомендується приймати значення коефіцієнтів надійності $\gamma_f = 1,3$ та $a_f = 0,7$.

3.2.9 Для проектування підсилення залізобетонних конструкцій розрахункові значення фізико-механічних характеристик вуглепластиків при розтягу рекомендується приймати згідно таблиці 3.3.

3.2.10 Розрахункове значення опору стиску композитних матеріалів приймається рівним нулю.

Таблиця 3.3 Розрахункові значення фізико-механічних характеристик вуглепластиків

№ пп	Марка	Модуль пружності, E_f , МПа	f_{fd} , МПа	ϵ_{fu} , %
1	Sika CarboDur [®] S	160000	2080	1,3
2	Sika CarboDur [®] M	210000	2080	1,0
3	CarboDur [®] S626	165000	1512	0,9
4	SikaWrap [®] -231C	210000	2080	1,0
5	SikaWrap [®] -301C	210000	2080	1,0
6	SikaWrap [®] -530C	220000	1730	0,8
7	SikaWrap [®] -600C	220000	1730	0,8
8	SikaWrap [®] -900C	200000	1300	0,65с

	ДП «Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій»	Стор. 13 Всього 45	
Найменування документа Рекомендації щодо застосування композитних матеріалів фірми SIKА для підсилення залізобетонних конструкцій	Позначення ЗНТ-219-2167.13-001		
	Статус ФІН	Ред. 001	Дата 28.01.14

4 РОЗРАХУНОК ПІДСИЛЕНИХ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ КОНСТРУКЦІЙ ЗА ГРАНИЧНИМИ СТАНАМИ 1 ГРУПИ

4.1 Основні положення

4.1.1 Розрахунок несучої здатності нормальних до поздовжньої осі перерізів залізобетонних елементів, підсилених композиційними матеріалами, слід проводити на основі нелінійної деформаційної моделі згідно передумов, наведених в розділі 6.1 ДБН В.2.6-98 [1], та доповнень наведених нижче.

4.1.2 Розрахунок нормальних перерізів згинальних елементів за несучою здатністю передбачає розгляд декількох видів граничних станів. У загальному випадку можливі наступні типи руйнування підсилених елементів:

а) руйнування стиснутої зони бетону до досягнення напружень текучості в стрижневий розтягнутій арматурі, при цьому напруження в елементах підсилення з композитних матеріалів значно нижчі від розрахункових (переармований елемент);


б) настання текучості в розтягнутій стрижневий арматурі і в подальшому розрив зовнішньої арматури підсилення з композитних матеріалів (досягнення граничних значень деформацій ε_{fu}) без руйнування стиснутої зони бетону;

в) руйнування стиснутої зони бетону (досягнення граничних деформацій стиску бетону ε_{cu});

г) руйнування внаслідок відшарування елементів підсилення з композиційних матеріалів.

4.1.3 Несучу здатність залізобетонних елементів на дію згинальних моментів та поздовжніх сил, визначають, виходячи з наступних передумов:

– за розрахунковий, приймається усереднений переріз, що відповідає середнім деформаціям бетону та арматури по довжині блоку між тріщинами, якщо такі є;

	ДП «Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій»	Стор. 14 Всього 45	
Найменування документа Рекомендації щодо застосування композитних матеріалів фірми Sika для підсилення залізобетонних конструкцій	Позначення ЗНТ-219-2167.13-001		
	Статус ФІН	Ред. 001	Дата 28.01.14

– деформації у звичайній арматурі або приріст деформацій у попередньо напруженій арматурі однакові з оточуючим їх бетоном, як при розтягу, так і при стиску;

– деформації зовнішніх елементів підсилення композитними матеріалами або приріст деформацій у попередньо напружених елементах при підсиленні конструкцій завантажених тільки власною масою, однакові з умовними деформаціями бетону найбільш розтягнутої грані $\varepsilon_{c(2)}$;

– деформації зовнішніх елементів підсилення композитними матеріалами або приріст деформацій у попередньо напружених елементах при підсиленні завантажених конструкцій підраховуються з урахуванням реального напружено-деформованого стану конструкції, що підсилюється;

– для розрахункового перерізу вважається справедливою гіпотеза про лінійний розподіл деформацій по його висоті;

– зв'язок між напруженнями та деформаціями стиснутого бетону приймається у вигляді діаграм, які показані на рисунках 3.1 та 3.2 ДБН В.2.6-98;


– зв'язок між напруженнями та деформаціями у арматурі приймається у вигляді діаграм, які наведені на рисунках 3.1. При цьому:

а) для обох видів (звичайної та попередньо напруженої) арматури $\sigma_s = 0$ при $\varepsilon_s \geq \varepsilon_{su}$ (вважається, що стався розрив арматури);

б) при визначенні напружень у попередньо напруженій арматурі враховуються початкові деформації цієї арматури;

в) роботу бетону розтягнутої зони допускається не враховувати, приймаючи при $\varepsilon_{ci} \leq 0$ напруження $\sigma_{ci} = 0$. Для конструкцій, в яких не допускається утворення тріщин, розрахунок опору виконують з врахуванням того, що деформації бетону найбільш розтягнутого волокна не повинні перевищувати $\varepsilon_{ctu} = -2f_{ctm}/E_{ck}$;

– зв'язок між напруженнями та деформаціями у композитних матеріалах приймається у вигляді діаграми, яка відповідає закону Гука і напруження в армуючому матеріалі визначається за залежністю $\sigma_f = \Delta\varepsilon_{fi}E_f$. При визначенні напружень у попередньо напружених елементах з композитних матеріалів враховуються початкові деформації від попереднього напруження.

	ДП «Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій»	Стор. 15 Всього 45	
Найменування документа Рекомендації щодо застосування композитних матеріалів фірми Sika для підсилення залізобетонних конструкцій	Позначення ЗНТ-219-2167.13-001		
	Статус ФІН	Ред. 001	Дата 28.01.14

За критерій вичерпання несучої здатності перерізу приймається:

– втрата рівноваги між внутрішніми та зовнішніми зусиллями (досягнення максимуму на діаграмах "момент-кривизна (прогин)" або «стискаюча сила – деформація бетону найбільш стиснутої фібри») – екстремальний критерій;

– руйнування стиснутого бетону при досягненні фібровими деформаціями граничних значень ϵ_{cu} (див 3.1.5 ДБН В.2.6-98) або розрив усіх розтягнутих стрижнів арматури внаслідок досягнення в них граничних деформацій ϵ_{ud} ;

– розрив при досягненні граничних значень деформацій композитного матеріалу підсилення ϵ_{fu} ;

– відшарування елементів підсилення з композиційних матеріалів.

4.1.4 Розрахунок виконується за нелінійною деформаційною методикою, сутність якої полягає в тому, що враховується приріст не зусиль (дій), а деформацій в бетоні та арматурі перерізу.

4.1.5 Приймається таке правило знаків: для стиску як бетону, так і арматури знак додатний, для розтягу – від'ємний.

4.2 Несуча здатність залізобетонних елементів прямокутного перерізу на дію згинальних моментів


4.2.1 Для перерізу конкретної форми достатньо виконати інтегрування і підставити границі інтегрування, після чого одержимо систему нелінійних алгебраїчних рівнянь з невідомими - $\epsilon_{c(1)}$ і \aleph (або $\epsilon_{c(2)}$).

4.2.2 Відповідно до прийнятих передумов при використанні формули (3.5) ДБН 2.6-98 напружено-деформований стан прямокутного перерізу при згині наведений на рисунку 4.1. При цьому може виникнути два випадки (дві форми рівноваги перерізу):

- весь переріз стиснутий;
- в перерізі є зона розтягу.

4.2.3 Для першої форми рівняння рівноваги набувають вигляду:

$$\frac{bf_{cd}}{\aleph} \sum_{k=1}^5 \frac{a_k}{k+1} \left(\frac{\epsilon_{c(1)}^{k+1} - \epsilon_{c(2)}^{k+1}}{\epsilon_{c1}^{k+1}} \right) + \sum_{i=1}^n \sigma_{si} A_{si} + \sum_{i=1}^n \sigma_{fi} A_{fi} = 0, \quad (4.1)$$

	ДП «Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій»	Стор. 16 Всього 45
	Найменування документа Рекомендації щодо застосування композитних матеріалів фірми SIKА для підсилення залізобетонних конструкцій	Позначення ЗНТ-219-2167.13-001
		Ред. 001
		Дата 28.01.14

$$\frac{bf_{cd}}{\bar{\aleph}^2} \sum_{k=1}^5 \frac{a_k}{k+2} \left(\frac{\varepsilon_{c(1)}^{k+2} - \varepsilon_{c(2)}^{k+2}}{\varepsilon_{c1}^{k+2}} \right) + \sum_{i=1}^n \sigma_{si} A_{si} (x_1 - z_{si}) + \sum_{i=1}^n \sigma_{fi} A_{fi} (x_1 - z_{fi}) = M. \quad (4.2)$$

4.2.4 Для другої форми рівноваги, рівняння в розгорнутому вигляді записуються:

$$\frac{bf_{cd}}{\bar{\aleph}} \sum_{k=1}^5 \frac{a_k}{k+1} \gamma^{k+1} + \sum_{i=1}^n \sigma_{si} A_{si} + \sum_{i=1}^n \sigma_{fi} A_{fi} = 0, \quad (4.3)$$

$$\frac{bf_{cd}}{\bar{\aleph}^2} \sum_{k=1}^5 \frac{a_k}{k+2} \gamma^{k+2} + \sum_{i=1}^n \sigma_{si} A_{si} (x_1 - z_{si}) + \sum_{i=1}^n \sigma_{fi} A_{fi} (x_1 - z_{fi}) = M. \quad (4.4)$$

У формулах (4.1) - (4.4):

$$\aleph = \frac{1}{r} = \frac{(\varepsilon_{c(1)} - \varepsilon_{c(2)})}{h} \quad \text{– кривизна вигнутої осі в перерізі;}$$

$\varepsilon_{c(1)}$ – деформації бетону стиснутої фібри;

$\varepsilon_{c(2)}$ – осереднені деформації розтягнутої фібри бетону;

$$\gamma = \frac{\varepsilon_{c(1)}}{\varepsilon_{c1}};$$

$$x_1 = \varepsilon_{c(1)} / \aleph \quad \text{– висота стиснутої зони;}$$

$$\bar{\aleph} = \aleph / \varepsilon_{c1} \quad \text{– відносна кривизна;}$$

z_{si} – відстань і-го стрижня або прошарку арматури від найбільш стиснутої грані перерізу;

z_{fi} – відстань до середини і-го прошарку композиційного армування від найбільш стиснутої грані перерізу


M – значення згинального моменту в перерізі.

4.2.5 Напруження в довільному шарі армування визначаються за діаграмами деформування звичайної або попередньо напруженої арматури згідно з рекомендаціями, які викладені в 3.2.1.11 та 3.2.2.12, ДСТУ Б В.2.6-156. Деформації визначаються за формулою

$$\varepsilon_{si} = \aleph (x_1 - z_{si}) + \varepsilon_{si,0}, \quad (4.5)$$

де

$\varepsilon_{si,0}$ – початкові (до прикладення зовнішніх зусиль) деформації і-го арматурного стрижня обумовлені, наприклад, усадкою бетону чи

	ДП «Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій»	Стор. 17 Всього 45
	Найменування документа Рекомендації щодо застосування композитних матеріалів фірми Sika для підсилення залізобетонних конструкцій	Позначення ЗНТ-219-2167.13-001
		Ред. 001
		Дата 28.01.14

попереднім напруженням з урахуванням відповідних втрат попереднього напруження.

4.2.6 Напруження в довільному шарі армування композитною системою визначаються для ненапруженої і попередньо напруженої арматури на всьому діапазоні її деформування $0 \leq \varepsilon_f < \varepsilon_{fu}$ згідно з наступною залежністю:

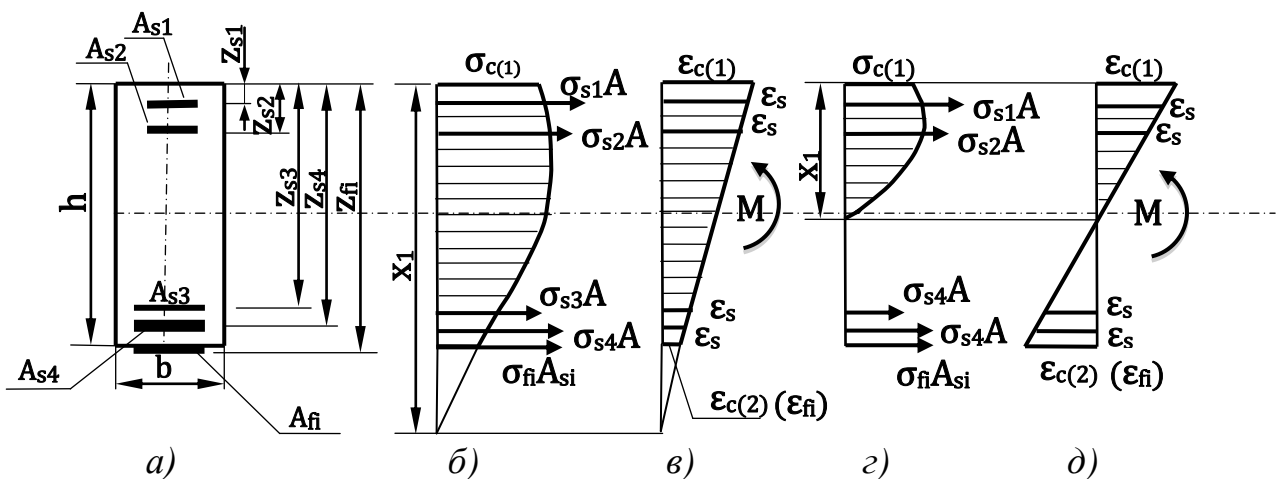
$$\sigma_f = \varepsilon_f \times E_f; \quad (4.6)$$

виходячи з того, що деформації визначаються за формулою

$$\varepsilon_{fi} = \varkappa(x_1 - z_{fi}) + \varepsilon_{fi,0} \quad (4.7)$$


де

$\varepsilon_{fi,0}$ – початкові (до прикладення зовнішніх зусиль) деформації i -го шару композитної арматури, обумовлені попереднім напруженням з урахуванням відповідних втрат попереднього напруження.



- а) - поперечний переріз елемента;
- б) - епюра напружень при 1-й формі рівноваги;
- в) - епюра деформацій при 1-й формі рівноваги;
- г) - епюра напружень при 2-й формі рівноваги;
- д) - епюра деформацій при 2-й формі рівноваги.

Рисунок 4.1 – Напружено - деформований стан прямокутного перерізу

	ДП «Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій»	Стор. 18 Всього 45	
Найменування документа Рекомендації щодо застосування композитних матеріалів фірми Sika для підсилення залізобетонних конструкцій	Позначення ЗНТ-219-2167.13-001		
	Статус ФІН	Ред. 001	Дата 28.01.14


4.2.7 Системи двох нелінійних алгебраїчних рівнянь (4.1 - 4.2) і (4.3 - 4.4) з двома невідомими розв'язуються підбором з контролем критеріїв вичерпання несучої здатності на кожному кроці розрахунків. При цьому можливі кілька варіантів пошуку рішення. Для оцінки напружено-деформованого стану розрахункового перерізу використовується деформаційний метод, алгоритм розв'язання задачі згідно деформаційного методу наведений в Додатку А ДСТУ Б В.2.6-156.

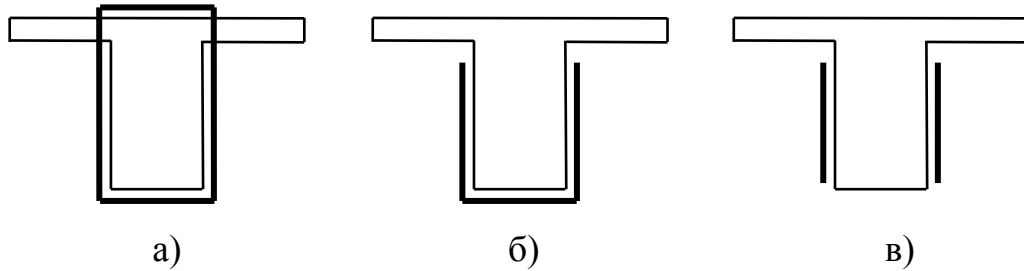
4.2.8 За результатами рішення систем рівнянь (4.1 - 4.2) і (4.3 - 4.4) будуються діаграми «момент – кривизна» для елементів що згинаються. Найбільші величини, зафіксовані на цих діаграмах, і приймаються за несучу здатність. В разі, якщо визначена величина несучої здатності буде меншою за зовнішній момент, необхідно збільшити підсилююче армування і виконати розрахунок спочатку. Величини зовнішніх впливів і підрахованої несучої здатності, як правило, не повинні відрізнятись більше ніж на 5 %.

4.2.9 Розрахунок виконується в два етапи. Як правило, елемент конструкції в загальному випадку до проведення підсилення знаходиться під навантаженням і має деякий напружено-деформований стан, і він визначається на першому етапі розрахунку. На другому етапі розрахунку деформації арматури в основному перерізі після підсилення знаходяться як сума незалежних деформацій від навантаження до підсилення і додаткових деформацій.

4.2.10 Матеріали системи Sika також можуть бути використані для посилення похилих перерізів. Посилення досягається наклеюванням композитних матеріалів у поперечному до осі елемента напрямку або перпендикулярно потенційним тріщинам в опорному перерізі.

На рис. 4.2 наведені основні схеми наклеювання, що використовуються при підсиленні похилих перерізів. Для балок, в основному, використовується наклейка КМС з трьох або двох сторін елемента.

	ДП «Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій»	Стор. 19 Всього 45		
		Позначення ЗНТ-219-2167.13-001		
Найменування документа Рекомендації щодо застосування композитних матеріалів фірми Sika для підсилення залізобетонних конструкцій		Статус ФІН	Ред. 001	Дата 28.01.14



а) загальне обгортання; б) наклейка з трьох сторін («U»-наклейка);
в) наклейка з двох сторін

Рисунок 4.2 – Схеми наклеювання композитних матеріалів при підсиленні похилих перерізів

4.2.11 Несуча здатність похилих перерізів елемента, підсиленого системою Sika, повинна перевищувати розрахункову поперечну силу. Для елементів, підсилених вертикальними стрічками (рис. 4.3б), опір зсуву визначається згідно вимог розділу 4.6.3.3 - 4.6.3.4 ДСТУ Б В.2.6-156 з наступною зміною в формулі 4.44:


$$V_{Rd,s} = \frac{A_{sw}}{s} \cdot z \cdot f_{ywd} \cdot \cot \Theta + \frac{A_{fw}}{s_f} \cdot z \cdot f_{fwd} \cdot \cot \Theta \quad (4.8)$$

Для елементів, підсилених похилою поперечною композитною арматурою (рис. 4.3 в), опір зсуву визначається згідно вимог розділу 4.6.3.5 ДСТУ Б В.2.6-156 з наступною зміною в формулі 4.52:

$$V_{Rd,s} = \frac{A_{sw}}{s} \cdot z \cdot f_{ywd} \cdot (\cot \Theta + \cot \alpha) + \frac{A_{fw}}{s_f} \cdot z \cdot f_{fwd} \cdot (\cot \Theta + \cot \alpha_f) \quad (4.9)$$

в формулах (4.8) та (4.9)

$A_{fw} = w_f \cdot t_f$ - площа армування композитними матеріалами похилого перерізу, де w_f і t_f відповідно ширина і товщина армуючої полоси;
 f_{fwd} - міцність композитного матеріалу при розрахунках на зсув $f_{fwd} = 0,4f_{fd}$;
 α_f - кут між стрічками з композитного матеріалу і віссю балки, перпендикулярною до поперечної сили.

	ДП «Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій»	Стор. 20 Всього 45		
		Найменування документа Рекомендації щодо застосування композитних матеріалів фірми Sika для підсилення залізобетонних конструкцій		Позначення ЗНТ-219-2167.13-001
		Статус ФІН	Ред. 001	Дата 28.01.14

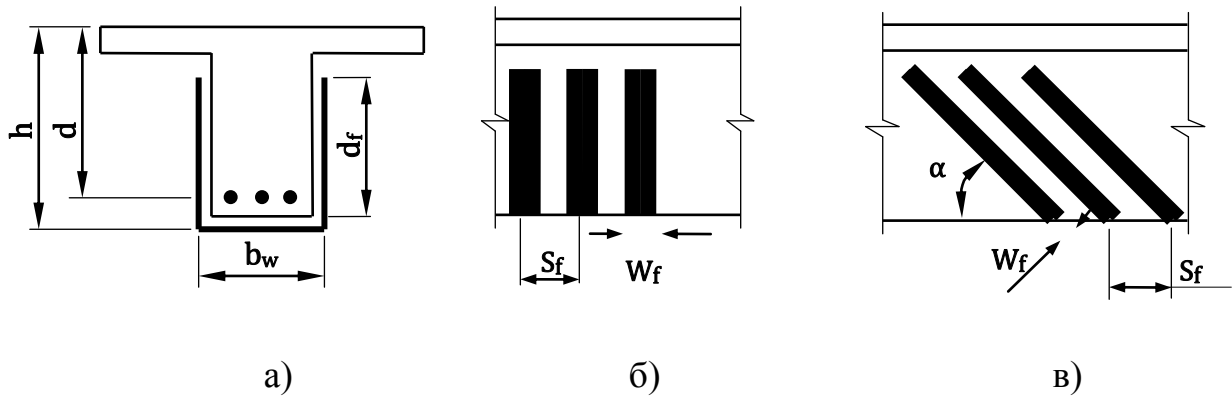


Рисунок 4.3 – Розміщення хомутів з системи Sika для посилення похилих перерізів

4.2.12 Несуча здатність за нормальними та похилими перерізами елемента, підсиленого системою Sika, може бути забезпечена тільки при забезпеченні необхідного опору зсуву по контакту “бетон-клей-композит” і який повинен перевищувати розрахункову величину зсувного зусилля. В разі неможливості забезпечити необхідний опір зсуву шляхом безпосередньо приклеюванням композита до бетонної поверхні конструкції, необхідно встановити додаткові анкерні пристрої.

4.2.13 Величина довжини необхідного анкерного закріплення визначається за виразом:

$$l_w = \frac{\gamma_R \sigma_{Ld} t_L}{\tau_{Rd}} + 0,5h \geq 0,5 \text{ м}, \quad (4.10)$$

при цьому повинна виконуватись нерівність $\gamma_R Z_{Ld} \leq f_{Lu} b_L t_L$

де:

l_w – довжина анкерного закріплення (м);


h – висота перерізу (м);

b_L – ширина стрічки (м);

t_L – товщина стрічки (м);

γ_R – коефіцієнт надійності рівний 1,2;

σ_{Ld} – розрахункове значення напружень в стрічці підсилення в розрахунковому перерізі (МПа);

	ДП «Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій»		Стор. 21 Всього 45		
	Найменування документа Рекомендації щодо застосування композитних матеріалів фірми SIKА для підсилення залізобетонних конструкцій		Позначення ЗНТ-219-2167.13-001		
		Статус ФІН	Ред. 001	Дата 28.01.14	

τ_{Rd} – розрахункова міцність бетону на відрив, яка приймається згідно таблиці 4.1 (МПа);

β_m – заміряна міцність бетону на відрив при обстеженнях підсилюваної конструкції (МПа);

Z_{Ld} – зусилля, що повинно сприйматись анкерним закріпленням (МН);

f_{Lu} – міцність стрічки на розтяг (МПа).

Таблиця 4.1–Розрахункові значення міцності бетону на відрив


β_m (МПа)	1,5	2,2	2,8	3,1	3,3
τ_{Rd} (МПа)	0,8	1,16	1,47	1,62	1,73

Для нерозрізних балок розрахунковий переріз призначається в місці нульового моменту. Для розрізних балок розрахунковий переріз призначається на відстані 0,25l від грані опори або в місці, в якому підсилення не потрібне (тобто, розрахунковий момент може сприйматись перерізом без підсилення).

У випадку, коли довжина зони анкетування більша ніж відстань від розрахункового перерізу до грані опори, потрібно збільшити ширину елементів підсилення або встановити додаткові анкери.


5 РОЗРАХУНОК ПІДСИЛЕНИХ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ КОНСТРУКЦІЙ ЗА ГРАНИЧНИМИ СТАНАМИ II ГРУПИ

Розрахунки за граничними станами другої групи виконуються відповідно до вказівок розділу 5 ДСТУ Б В.2.6-156.

	ДП «Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій»	Стор. 22 Всього 45	
Найменування документа Рекомендації щодо застосування композитних матеріалів фірми SİKA для підсилення залізобетонних конструкцій	Позначення ЗНТ-219-2167.13-001		
	Статус ФІН	Ред. 001	Дата 28.01.14

ДОДАТОК А

ПРИКЛАДИ РОЗРАХУНКІВ

	ДП «Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій»	Стор. 23 Всього 45	
	Найменування документа Рекомендації щодо застосування композитних матеріалів фірми Sika для підсилення залізобетонних конструкцій	Позначення ЗНТ-219-2167.13-001	
	Статус ФІН	Ред. 001	Дата 28.01.14

Приклад №1. Розрахунок балки перекриття за двома групами граничних станів

Дано: Залізобетонна балка перекриття довжиною 9 м з розмірами перерізу згідно рис. А.1: $b=300$ мм, $h=700$ мм; клас міцності бетону С25/30 ($E_{cm}=32500$ МПа, $f_{cd}=17$ МПа, $f_{ck}=22$ МПа, $f_{ctm}=2,6$ МПа; $\varepsilon_{cu1,cd}=0,00328$; $\varepsilon_{cu1,ck}=0,00355$; $\varepsilon_{c1,cd}=0,00169$; $\varepsilon_{c1,ck}=0,00176$); клас поздовжньої арматури А400С ($E_s=210000$ МПа, $f_{yd}=363,6$ МПа, $f_{yk}=400$ МПа). Поздовжня арматура розташована у два ряди: $z_{s1}=30$ мм, $A_{s1}=9,42$ см² = 0,000942 м² (3Ø20); $z_{s2}=636$ мм, $A_{s2}=30,54$ см² = 0,003054 м² (3Ø36).

Розрахункове навантаження, на яке була запроєктована балка 54 кН/м, граничний розрахунковий момент $M_{гр}=550$ кН·м, експлуатаційний розрахунковий момент $M_{екс.}=458$ кН·м.

Потрібно підсилити балку, щоб вона сприймала навантаження 74 кН/м (граничний розрахунковий момент $M_{гр}=750$ кН·м, експлуатаційний розрахунковий момент $M_{екс.}=625$ кН·м). Для цього визначити необхідне армування композитними матеріалами, обчислити ширину розкриття тріщин від короточасних навантажень, максимальний прогин в прольоті балки і виконати перевірку величини довжини необхідного анкерного закріплення.

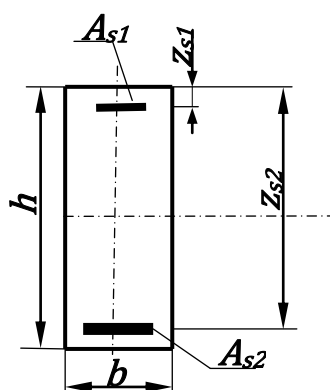



Рисунок А.1 – Поперечний переріз елемента

Для підсилення приймається композитний матеріал Sika[®] CarboDur[®] М ($E_f=210000$ МПа, $f_{fd}=1130$ МПа, $\varepsilon_{fu}=0,00476$). Площа армуючого композита $A_f=2,52$ см² = 0,000252 м² (2 смуги товщиною 1,4 мм, шириною 90 мм). Тобто, $z_{s3}=700$ мм, $A_{s3}=0,000252$ м².

	ДП «Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій»		Стор. 24 Всього 45
	Найменування документа Рекомендації щодо застосування композитних матеріалів фірми Sika для підсилення залізобетонних конструкцій		Позначення ЗНТ-219-2167.13-001
		Статус ФІН	Ред. 001
		Дата 28.01.14	

Перед підсиленням балка була розвантажена та виконано піддомкращування до напружень в робочій розтягнутій арматурі близьких до нуля.

Розрахунок за I групою граничних станів

Розрахунок несучої здатності перерізу, оскільки розглядається згин, виконуємо за другою формою рівноваги за формулами 4.3 та 4.4 ДСТУ Б В.2.6-156. Алгоритм розв'язання системи нелінійних рівнянь рівноваги наведено в Додатку А ДСТУ Б В.2.6-156.

1. На першому кроці розрахунку задаються величини деформацій $\varepsilon_{c(1)} = \Delta\varepsilon_{c(1)}^{(0)}$ та $\varepsilon_{c(2)}^{(0)} = 0$, причому $\Delta\varepsilon_{c(1)}^{(0)} = 0,1\varepsilon_{cu1} = 0,000328$.

2. Підраховуємо величини $\aleph = \frac{1}{\rho} = \frac{(\varepsilon_{c(1)} - \varepsilon_{c(2)})}{h} = \frac{(0,000328 - 0)}{0,6} = 0,000547$,

$\gamma = \frac{\varepsilon_{c(1)}}{\varepsilon_{c1}} = \frac{0,000328}{0,00169} = 0,194$, $x_1 = \varepsilon_{c(1)} / \aleph = 0,000328 / 0,000547 = 0,5996$,

$\bar{\aleph} = \aleph / \varepsilon_{c1} = 0,3237$, $\sigma_{si} = E_{si} \cdot \varepsilon_{si} = E_{si} \cdot \aleph(x_1 - z_{si})$


z_{si} , м	A_{si} , м ²	σ_{si} , МПа
0,03	0,000942	65,928
0,636	0,003054	6,2976
0,700	0,000252	0

3. Визначаємо зусилля N в перерізі за формулою для другої форми рівноваги (4.3) ДСТУ Б В.2.6-156.

Коефіцієнти a_k визначаємо за табл. Д.1 Додатку Д ДБН В.2.6-98 для першої групи граничних станів:

a_1	a_2	a_3	a_4	a_5
2,7404	-2,7649	1,3416	-0,35004	0,03295

$$\frac{bf_{cd}}{\bar{\aleph}} \sum_{k=1}^5 \frac{a_k}{k+1} \gamma^{k+1} + \sum_{i=1}^n \sigma_{si} A_{si} - N = 0$$

	ДП «Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій»		Стор. 25 Всього 45
	Найменування документа Рекомендації щодо застосування композитних матеріалів фірми Sika для підсилення залізобетонних конструкцій		Позначення ЗНТ-219-2167.13-001
		Статус ФІН	Ред. 001
		Дата 28.01.14	

$N = 0,915 \text{ МН}$.

При згині $N = 0$. Тобто збільшуємо деформації на розтягнутій грані

$$\varepsilon_{c(2)}^{(0)} = 0,01 \cdot \varepsilon_{cu1} = -0,0000328$$

Виконуємо всі дії пунктів 2 і 3 та знову визначаємо зусилля N .

$N = 0,818 \text{ МН}$.

Покроково збільшуємо деформації на розтягнутій грані перерізу доти, доки зусилля N не наблизиться до 0 з достатньою точністю:

$\varepsilon_{c(1)}^{(1)}$	$\varepsilon_{c(2)}^{(1)}$	\aleph	γ	$x_1, \text{ м}$	$\bar{\aleph}$	$N, \text{ МН}$
0.000328	-0.0005904	0.001312	0.194083	0.25	0.776331	-0.00114


4. Визначені величини підставляємо у рівняння рівноваги (4.4) ДСТУ Б В.2.6-156 та визначаємо згинальний момент, який відповідає першій точці на діаграмі стану перерізу.

Номери шарів арматури	σ_{si}	$\sigma_{si} \cdot A_{si}$	$\sigma_{si} \cdot A_{si} \cdot (x_1 - z_{si})$
1	60.6144	0.057099	0.012562
2	-106.351	-0.3248	0.125371
3	-123.984	-0.03124	0.01406

$$M = \frac{b f_{cd}}{\aleph^2} \sum_{k=1}^5 \frac{a_k}{k+2} \left(\frac{\varepsilon_{c(1)}^{k+2} - \varepsilon_{c(2)}^{k+2}}{\varepsilon_{c1}^{k+2}} \right) + \sum_{i=1}^n \sigma_{si} A_{si} (x_1 - z_{si}) =$$

$$= 0,2008 \text{ МН} \cdot \text{м} = 200,8 \text{ кН} \cdot \text{м}$$

Для отримання наступних точок діаграми стану перерізу необхідно, збільшити деформації на стиснутій грані, тобто

	ДП «Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій»		Стор. 26 Всього 45
	Найменування документа Рекомендації щодо застосування композитних матеріалів фірми Sika для підсилення залізобетонних конструкцій		Позначення ЗНТ-219-2167.13-001
		Статус ФІН	Ред. 001 Дата 28.01.14

$$\varepsilon_{c(1)}^{(2)} = \varepsilon_{c(1)}^{(1)} + \Delta\varepsilon_{c(1)} = 0,0000328 + 0,01\varepsilon_{cu1} = 0,0000656.$$

Виконуємо дії відповідно до п.п. 2-4, зберігаючи на першій ітерації величину деформації на розтягнутій грані, яка отримана на попередньому кроці розрахунку:

$$\varepsilon_{c(2)}^{(2)} = -0,0005904$$

Виконуємо п.п. 2-3 доти, доки зусилля N не наблизиться до 0 з достатньою точністю:

$\varepsilon_{c(1)}^{(2)}$	$\varepsilon_{c(2)}^{(2)}$	\mathcal{N}	γ	X_L, M	$\bar{\xi}$	N, MN
0.000656	-0.0011152	0.00253	0.388166	0.259259	1.49721	-0.0121


Номери шарів арматури	σ_{si}	$\sigma_{si} \cdot A_{si}$	$\sigma_{si} \cdot A_{si} \cdot (X_1 - Z_{si})$
1	121.8192	0.11475369	0.026308
2	-200.185	-0.6113649	0.230326
3	-234.192	-0.0590164	0.026011

Визначені величини підставляємо у рівняння рівноваги (4.4) ДСТУ Б В.2.6-156 та визначаємо згинальний момент, який відповідає другій точці на діаграмі стану перерізу.

$$M=0,3734 \text{ MN}\cdot\text{m}=373,4 \text{ кН}\cdot\text{м}.$$

При виконанні розрахунків необхідно контролювати величину напружень в арматурі. Вона не повинна перевищувати межу текучості.


Обчислення виконувались з більшою точністю за допомогою розробленої для цього програми. Результати обчислень зведені в таблицю А.1. На рисунку А.2 приведена повна крива стану перерізу до руйнування бетону.

	ДП «Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій»		Стор. 27 Всього 45
	Найменування документа Рекомендації щодо застосування композитних матеріалів фірми SIKА для підсилення залізобетонних конструкцій		Позначення ЗНТ-219-2167.13-001 Статус ФІН Ред. 001 Дата 28.01.14

Таблиця А.1

Номер точки	$\varepsilon_{c(1)}^{(i)}$	$\varepsilon_{c(2)}^{(i)}$	\mathcal{N}	σ_c	$x_1, \text{ м}$	$N, \text{ кН}$	$M, \text{ кН}\cdot\text{м}$
1	2	3	4	5	6	7	8
1	0.000102	-0.00011	0.00031	2.659	0.33333	91.731	55.365
2	0.000205	-0.00033	0.00076	5.001	0.26923	60.65	116.779
3	0.000307	-0.00054	0.00121	7.054	0.25301	29.249	182.059
4	0.000512	-0.00087	0.00198	10.396	0.25926	43.555	289.621
5	0.000717	-0.0012	0.00274	12.871	0.26203	31.569	392.125
6	0.00082	-0.00131	0.00304	13.834	0.26923	63.277	431.462
7	0.001025	-0.00164	0.00381	15.3	0.26923	16.986	527.153
8	0.001127	-0.00175	0.00411	15.833	0.27402	32.155	563.256
9	0.001229	-0.00186	0.00442	16.251	0.27815	33.68	602.155
10	0.001332	-0.00208	0.00487	16.566	0.27327	7.074	636.029
11	0.001434	-0.0024	0.00547	16.788	0.26203	1.856	649.336
12	0.001639	-0.00293	0.00653	16.993	0.25112	22.57	673.867
13	0.001742	-0.00325	0.00713	16.992	0.24435	19.089	686.032
14	0.001844	-0.00357	0.00773	16.931	0.23864	16.008	697.97
15	0.001947	-0.00388	0.00833	16.816	0.23374	13.031	709.697
16	0.002254	-0.00453	0.00969	16.199	0.23263	15.905	729.118
17	0.002356	-0.00474	0.01014	15.916	0.23232	11.485	734.66
18	0.002459	-0.00496	0.0106	15.599	0.23204	5.598	739.981
19	0.002664	-0.00529	0.01136	14.877	0.23454	7.466	747.891
20	0.002766	-0.0054	0.01167	14.475	0.23714	14.778	750.454
21	0.002869	-0.00561	0.01212	14.05	0.23671	2.984	754.899
22	0.002971	-0.00573	0.01243	13.603	0.2391	7.062	757.002
23	0.003074	-0.00584	0.01273	13.136	0.24138	9.552	758.885
24	0.003176	-0.00595	0.01304	12.652	0.24355	10.523	760.551
25	0.00328	-0.00607	0.01335	12.153	0.24561	11.412	761.383

Як видно з результатів розрахунків, несуча здатність перерізу балки після підсилення сягає величини 761 кН·м, що більше за граничний розрахунковий момент 750 кН·м.

	ДП «Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій»	Стор. 28 Всього 45		
		Найменування документа Рекомендації щодо застосування композитних матеріалів фірми Sika для підсилення залізобетонних конструкцій		Позначення ЗНТ-219-2167.13-001
		Статус ФІН	Ред. 001	Дата 28.01.14

М, кН·м

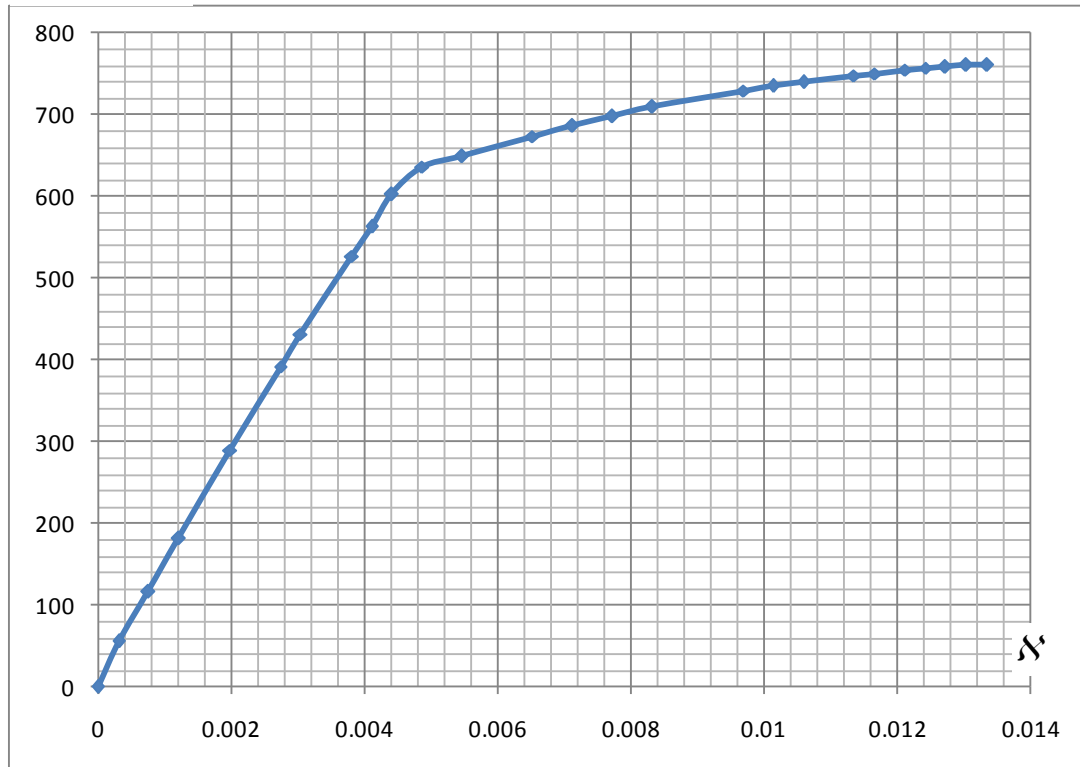


Рисунок А.2 – Залежність «момент-кривизна» для перерізу після підсилення композитними матеріалами

Визначимо довжину необхідного анкерного закріплення. За формулою (4.10)


$$l_w = \frac{\gamma_R \sigma_L d t_L}{\tau_{Rd}} + 0,5h \geq 0,5 \text{ м.}$$

Розрахунки зробимо для двох перерізів:

I- для перерізу, розташованого на відстані $0,25l = 0,25 \cdot 9 = 2,25$ м від опори;

II- для перерізу, в якому підсилення не потрібне (тобто, розрахунковий момент може сприйматися перерізом без підсилення).

Розрахунковий момент для перерізу I складає 562 кН·м.

	ДП «Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій»		Стор. 29 Всього 45
	Найменування документа Рекомендації щодо застосування композитних матеріалів фірми Sika для підсилення залізобетонних конструкцій		Позначення ЗНТ-219-2167.13-001
		Статус ФІН	Ред. 001
		Дата 28.01.14	

Розрахунковий момент для перерізу II дорівнює несучій датності перерізу до підсилення і складає 620 кН·м. Переріз, в якому розрахунковий момент сягає такої величини, знаходиться на відстані 2,62 м від опори.

Визначимо довжину необхідного анкерного закріплення:

$t_L = 0,0014$ м -- товщина стрічки (м);

$\gamma_R = 1,2$ – коефіцієнт надійності;

$\sigma_{Ld} = 100$ МПа – розрахункове значення напружень в стрічці підсилення в перерізі I та $\sigma_{Ld} = 114$ МПа в перерізі II ;

$\beta_m = 2,2$ МПа – заміряна міцність бетону на відрив при обстеженнях підсилюваної конструкції;

$\tau_{Rd} = 1,16$ МПа – розрахункова міцність бетону на відрив, яка приймається згідно таблиці 4.1 в залежності від величини β_m .

Для перерізу I

$$l_w = \frac{1,2 \cdot 100 \cdot 0,0014}{1,16} + 0,5 \cdot 0,7 = 0,145 + 0,35 = 0,495 \text{ м.}$$

Приймаємо для перерізу I - $l_w = 0,5$ м.

Для перерізу II

$$l_w = \frac{1,2 \cdot 114 \cdot 0,0014}{1,16} + 0,5 \cdot 0,7 = 0,165 + 0,35 = 0,515 \text{ м.}$$


Приймаємо для перерізу I - $l_w = 0,515$ м.

Таким чином, відстань від опори, на яку треба доводити стрічку для забезпечення необхідного анкерування, складає:

- для перерізу I – 2,0 м (2,5-0,5=2,0 м);
- для перерізу II – 2,105 м (2,62-0,515=2,105 м).

Приймаємо меншу з величин 2,0 м від опори.

Таким чином, довжина зони анкерування достатня.

	ДП «Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій»		Стор. 30 Всього 45	
	Найменування документа Рекомендації щодо застосування композитних матеріалів фірми Sika для підсилення залізобетонних конструкцій		Позначення ЗНТ-219-2167.13-001	
		Статус ФІН	Ред. 001	Дата 28.01.14

Розрахунок за II групою граничних станів

Розрахунок ширини розкриття тріщин

Розрахунок ширини розкриття тріщин виконується згідно з розділом 5.3 ДСТУ Б В.2.6-156.

Визначимо ширину розкриття тріщин при дії на переріз балки після підсилення експлуатаційного розрахункового моменту $M_{екс.}=625$ кН·м.

За деформаційною методикою отримуємо залежність «Момент-кривизна» для розрахунку за другою групою граничних станів ($f_{ck}=22$ МПа, $f_{yk}=400$ МПа), як це було зроблено для розрахунків несучої здатності перерізу. При цьому, на кожному кроці розрахунку отримуємо всі дані, необхідні для подальших розрахунків: величину деформацій бетону $\varepsilon_{c(1)}$ та $\varepsilon_{c(2)}$, кривизну, висоту стиснутої зони бетону, напруження в арматурі.

Коефіцієнти a_k визначаємо за табл. Д.1 Додатку Д ДБН В.2.6-98 для другої групи граничних станів:


a_1	a_2	a_3	a_4	a_5
2.518	-2.0904	0.6077	-0.01675	-0.01867

Виконуючи відповідні розрахунки, отримаємо точки діаграми «Момент-кривизна» для другої групи граничних станів. В таблиці А.2 наведені результати розрахунку для точок, близьких до експлуатаційного моменту 625 кН·м.

Таблиця А.2

Номер точки	$\varepsilon_{c(1)}^{(i)}$	$\varepsilon_{c(2)}^{(i)}$	κ	σ_c	$x_l, м$	$N, кН$	$M, кН·м$
10	0.000774	-0.00143	0.00315	16.542	0.24561	28.998	463.773
11	0.000871	-0.00154	0.00344	17.694	0.25301	67.416	505.338
12	0.000968	-0.00174	0.00387	18.683	0.25	6.368	568.474
13	0.001065	-0.00185	0.00416	19.521	0.25581	34.381	608.012
14	0.001162	-0.00196	0.00445	20.218	0.26087	57.586	646.829

При цьому, напруження в шарі розтягнутої арматури на кожному кроці складають:

	ДП «Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій»	Стор. 31 Всього 45
	Найменування документа Рекомендації щодо застосування композитних матеріалів фірми Sika для підсилення залізобетонних конструкцій	Позначення ЗНТ-219-2167.13-001
		Ред. 001
		Дата 28.01.14

Номер шару арматури	$\sigma_{si}, \text{МПа}$				
	10	11	12	13	14
2	-267,50	-286,786	-325,08	-344,364	-363,64

Напруження при дії моменту 625 кН·м визначаємо за інтерполяцією $\sigma_{s2} = -353$ МПа.

Ширину розкриття тріщин w_k визначаємо за виразом (5.8) ДСТУ Б В.2.6-156:

$$w_k = s_{r,max} (\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}),$$

де

$$\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{ctm} = \frac{\sigma_s - k_t \frac{f_{ct,eff}}{\rho_{p,eff}} (1 + \alpha_e \rho_{p,eff})}{E_s} \geq 0,6 \frac{\sigma_s}{E_s} :$$

$$\alpha_e = 210000/32500 = 6,46 - \text{відношення } E_s/E_{cm};$$

$$\rho_{p,eff} = (A_s + \xi_l^2 A_p') / A_{c,eff} = 0,003054/0,048 = 0,0636,$$

$A_p' = 0$, $A_{c,eff} = b \cdot h_{c,eff}$ де $h_{c,eff}$ – менше із значень $2,5 \cdot (h-d)$, $(h-x)/3$ або $h/2$:

$$2,5 \cdot (h-d) = 2,5 \cdot 0,064 = 0,16 \text{ м}, \quad (h-x)/3 = (0,7-0,26)/3 = 0,147 \text{ м},$$

$$h/2 = 0,7/2 = 0,35 \text{ м}.$$

$$\text{Менше із значень } h_{c,eff} = 0,147 \text{ м}, \quad A_{c,eff} = 0,3 \cdot 0,147 = 0,048 \text{ м}^2.$$


k_t – коефіцієнт, що залежить від тривалості навантаження

$k_t = 0,6$ - для короткотривалого навантаження;

$$f_{ct,eff} = f_{ctm} = 2,6 \text{ МПа}.$$

$$\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm} = 0,001516.$$

Максимальний крок тріщин визначаємо за виразом (5.11) ДСТУ Б В.2.6-156:

	ДП «Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій»	Стор. 32 Всього 45	
	Найменування документа Рекомендації щодо застосування композитних матеріалів фірми Sika для підсилення залізобетонних конструкцій	Позначення ЗНТ-219-2167.13-001	
	Статус ФІН	Ред. 001	Дата 28.01.14

$$s_{r,max} = k_3 c + k_1 k_2 k_4 \phi / \rho_{p,eff}$$

де $\phi = 36$ мм - діаметр стрижня;

$c = 46$ мм - захисний шар бетону для поздовжньої арматури;

$k_1 = 0,8$ - для стрижнів із високим зчепленням;

$k_2 = 0,5$ для згину;

$k_3 = 3,4$;

$k_4 = 0,425$.

$$s_{r,max} = 3,4 \cdot 46 + 0,8 \cdot 0,5 \cdot 0,425 \cdot 36 / 0,0636 = 252,6 \text{ мм.}$$

$$w_k = 252,6 \cdot 0,001516 = 0,383 \text{ мм.}$$

Для класів впливу Х0 та ХС1 вимоги нормативних документів виконуються. Для інших класів площу армуючого композитного матеріалу необхідно збільшити або виконувати попереднє напруження.

Розрахунок прогинів

Розрахунок прогинів виконуємо для постійних та змінних тривалих навантажень згідно ДСТУ Б В.1.2-3 «Прогини і переміщення».

Для статично визначених елементів постійного перерізу, що працюють за балковою схемою, прогин допускається визначати за формулою (5.19) ДСТУ Б В.2.6-156:

$$f = \frac{1}{r} k_m l^2$$


де $1/r$ (N) - кривизна у перерізі із найбільшим згинальним моментом;

k_m - коефіцієнт, що визначається за таблицею 5.5.

Кривизна обчислена і наведена в табл. А.4 (точка №14) $1/r = 0,00445$; $k_m = 5/48$; $l = 9$ м. Таким чином, прогин дорівнює

$$f = 0,00445 \cdot 5/48 \cdot 9^2 = 0,0375 \text{ м, що менше за граничний прогин } 0,041 \text{ м.}$$

Переріз балки, підсиленої полосами композитного матеріалу, задовольняє вимогам нормативних документів за I та II групами граничних станів.

	ДП «Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій»	Стор. 33 Всього 45		
		Найменування документа Рекомендації щодо застосування композитних матеріалів фірми Sika для підсилення залізобетонних конструкцій		Позначення ЗНТ-219-2167.13-001
		Статус ФІН	Ред. 001	Дата 28.01.14

Приклад №2. Розрахунок балки за двома групами граничних станів

Дано: Залізобетонна балка перекриття довжиною 9 м таврового перерізу з розмірами згідно рис. А.3: $b_w=300$ мм, $b_{ef}=75$ мм, $h=700$ мм, $h_{ef}=75$ мм; клас міцності бетону С25/30 ($E_{cm}=32500$ МПа, $f_{cd}=17$ МПа, $f_{ck}=22$ МПа, $f_{ctm}=2,6$ МПа; $\varepsilon_{cu1,cd}=0,00328$; $\varepsilon_{cu1,ck}=0,00355$; $\varepsilon_{c1,cd}=0,00169$; $\varepsilon_{c1,ck}=0,00176$); клас поздовжньої арматури А400С ($E_s=210000$ МПа, $f_{yd}=363,6$ МПа, $f_{yk}=400$ МПа). Поздовжня арматура розташована у два ряди: $z_{s1}=40$ мм, $A_{s1}=9,42$ см² = 0,000942 м² (3Ø20); $z_{s2}=642$ мм, $A_{s2}=24,13$ см² = 0,002413 м² (3Ø32).

Розрахункове навантаження, на яке була запроєктована балка 54 кН/м, граничний розрахунковий момент $M_{гр}=550$ кН·м, експлуатаційний розрахунковий момент $M_{екс.}=458$ кН·м.

Потрібно підсилити балку, щоб вона сприймала навантаження 74 кН/м (граничний розрахунковий момент $M_{гр}=750$ кН·м, експлуатаційний розрахунковий момент $M_{екс.}=625$ кН·м). Для цього визначити необхідне армування композитними матеріалами, обчислити ширину розкриття тріщин від короточасних навантажень і максимальний прогин в прольоті балки.

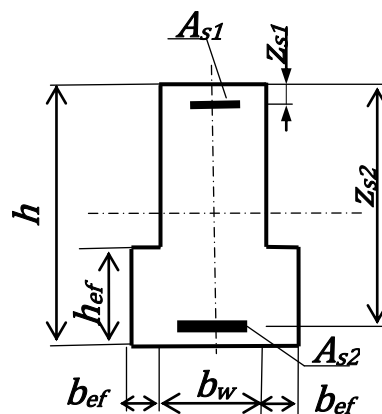



Рисунок А.3 – Поперечний переріз елемента

Підсилення виконується без піддомкращування. Якщо, по результатах обстеження ширина розкриття тріщин від постійних навантажень перевищує 0,2 мм, то такі тріщини потрібно заін'єктувати.

Згинальний момент від постійних навантажень дорівнює 360 кН·м.

	ДП «Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій»		Стор. 34 Всього 45
	Найменування документа Рекомендації щодо застосування композитних матеріалів фірми Sika для підсилення залізобетонних конструкцій		Позначення ЗНТ-219-2167.13-001
		Статус ФІН	Ред. 001
		Дата 28.01.14	

Для підсилення приймається композитний матеріал Sika® CarboDur®M ($E_f=210000$ МПа, $f_{fd}=1130$ МПа, $\varepsilon_{fu}=0,00476$). Площа армуючого композита $A_f= 5,04 \text{ см}^2 = 0,000504 \text{ м}^2$ (4 полоси товщиною 1,4 мм, шириною 90 мм). Тобто, $z_{s3}=700$ мм, $A_{s3}= 0,000504 \text{ м}^2$.

Розрахунок за I групою граничних станів

Розрахунок несучої здатності перерізу виконуємо для другої форми рівноваги за формулами 4.3 та 4.4 ДСТУ Б В.2.6-156. Алгоритм розв'язання системи нелінійних рівнянь рівноваги наведено в Додатку А ДСТУ Б В.2.6-156.

Виконання розрахунків виконується в два етапи.

I етап. За наведеним в Додатку А ДСТУ Б В.2.6-156 алгоритмом визначається напружено-деформований стан балки на момент підсилення.

1) Задаємо величини деформацій $\varepsilon_{c(1)} = \Delta\varepsilon_{c(1)}^{(0)}$ та $\varepsilon_{c(2)}^{(0)} = 0$, причому $\Delta\varepsilon_{c(1)}^{(0)} = 0,1\varepsilon_{cu1} = 0,000328$.

2) Підраховуємо величини

$$\aleph = \frac{1}{\rho} = \frac{(\varepsilon_{c(1)} - \varepsilon_{c(2)})}{h} = \frac{(0,000328 - 0)}{0,6} = 0,000547,$$

$$\gamma = \frac{\varepsilon_{c(1)}}{\varepsilon_{cl}} = \frac{0,000328}{0,00169} = 0,194 \quad , \quad x_1 = \varepsilon_{c(1)} / \aleph = 0,000328 / 0,000547 = 0,5996,$$


$$\bar{\aleph} = \aleph / \varepsilon_{cl} = 0,3237, \quad \sigma_{si} = E_{si} \cdot \varepsilon_{si} = E_{si} \cdot \aleph(x_1 - z_{si})$$

$z_{si}, \text{м}$	$A_{si}, \text{м}^2$	$\sigma_{si}, \text{МПа}$
0,03	0,000942	65,928
0,636	0,003054	6,2976

3) Визначаємо зусилля N в перерізі за формулою для другої форми рівноваги (4.3) ДСТУ Б В.2.6-156.

Коефіцієнти a_k визначаємо за табл. Д.1 Додатку Д ДБН В.2.6-98 для першої групи граничних станів:

a_1	a_2	a_3	a_4	a_5
2.7404	-2.7649	1.3416	-0.35004	0.03295

	ДП «Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій»	Стор. 35 Всього 45
	Найменування документа Рекомендації щодо застосування композитних матеріалів фірми Sika для підсилення залізобетонних конструкцій	Позначення ЗНТ-219-2167.13-001
		Ред. 001
		Дата 28.01.14

$$\frac{bf_{cd}}{\bar{\kappa}} \sum_{k=1}^5 \frac{a_k}{k+1} \gamma^{k+1} + \sum_{i=1}^n \sigma_{si} A_{si} - N = 0$$

$N = 0,915 \text{ МН}$.

При згині $N = 0$. Тобто збільшуємо деформації на розтягнутій грані

$$\varepsilon_{c(2)}^{(0)} = 0,01 \cdot \varepsilon_{cu1} = -0,0000328$$

Виконуємо всі дії пунктів 2 і 3 та знову визначаємо зусилля N .

Покроково збільшуємо деформації на розтягнутій грані перерізу доти, доки зусилля N не наблизиться до 0 з достатньою точністю:

$\varepsilon_{c(1)}^{(1)}$	$\varepsilon_{c(2)}^{(1)}$	$\bar{\kappa}$	γ	$x_1, \text{ м}$	$\bar{\kappa}$	$N, \text{ МН}$
0.000328	-0.0006232	0.001359	0.194083	0.241379	0.804057	0.000446


4) Визначені величини підставляємо у рівняння рівноваги (4.4) ДСТУ Б В.2.6-156 та визначаємо згинальний момент, який відповідає першій точці на діаграмі стану перерізу.

Номери шарів арматури	σ_{si}	$\sigma_{si} \cdot A_{si}$	$\sigma_{si} \cdot A_{si} \cdot (x_1 - z_{si})$
1	60.6144	0.057099	0.012562
2	-106.351	-0.3248	0.125371

$$M = \frac{bf_{cd}}{\bar{\kappa}^2} \sum_{k=1}^5 \frac{a_k}{k+2} \left(\frac{\varepsilon_{c(1)}^{k+2} - \varepsilon_{c(2)}^{k+2}}{\varepsilon_{c1}^{k+2}} \right) + \sum_{i=1}^n \sigma_{si} A_{si} (x_1 - z_{si}) =$$

$= 0,1932 \text{ МН} \cdot \text{м} = 193,2 \text{ кН} \cdot \text{м}$.

Для отримання наступних точок діаграми стану перерізу необхідно збільшити деформації на стиснутій грані, тобто

	ДП «Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій»	Стор. 36 Всього 45	
	Найменування документа Рекомендації щодо застосування композитних матеріалів фірми Sika для підсилення залізобетонних конструкцій	Позначення ЗНТ-219-2167.13-001	
	Статус ФІН	Ред. 001	Дата 28.01.14

$$\varepsilon_{c(1)}^{(2)} = \varepsilon_{c(1)}^{(1)} + \Delta\varepsilon_{c(1)} = 0,0000328 + 0,01\varepsilon_{cu1} = 0,0000656.$$

Виконуємо дії відповідно до п.п. 2-4, зберігаючи на першій ітерації величину деформації на розтягнутій грані, яка отримана на попередньому кроці розрахунку:

$$\varepsilon_{c(2)}^{(2)} = -0,0006232$$

Виконуємо п.п. 2-3 доти, доки зусилля N не наблизиться до 0 з достатньою точністю:

$\varepsilon_{c(1)}^{(2)}$	$\varepsilon_{c(2)}^{(2)}$	\aleph	γ	X_1, M	\bar{N}	N, MN
0.000656	-0.001188	0.002624	0.388166	0.25	1.552663	-0.01127

Номери шарів арматури	σ_{si}	$\sigma_{si} \cdot A_{si}$	$\sigma_{si} \cdot A_{si} \cdot (X_1 - z_{si})$
1	121.2288	0.11419753	0.025123
2	-212.701	-0.6495902	0.250742

Визначені величини підставляємо у рівняння рівноваги (4.4) ДСТУ Б В.2.6-156 та визначаємо згинальний момент, який відповідає другій точці на діаграмі стану перерізу.

$$M=0,3603 \text{ MN}\cdot\text{m}=360,3 \text{ кН}\cdot\text{м}.$$


Отриманий згинальний момент відповідає розрахунковому моменту від постійних навантажень. Тобто, ми отримали параметри напружено-деформованого стану перерізу на момент підсилення і можемо перейти до другого етапу розрахунків.

II етап. Визначення несучої здатності перерізу балки з підсиленням.

На момент виконання підсилення деформації на розтягнутій грані перерізу дорівнюють $\varepsilon_{c(2)}^{(2)} = -0,001188$.

При збільшенні навантаження в шарі армуючого композиту виникають напруження, які обчислюються за формулою

$$\sigma_{fi} = E_{fi} \cdot \varepsilon_{fi} = E_{fi} \cdot (\aleph(x_1 - z_{fi}) - \varepsilon_{c(2)}^{(2)}).$$

	ДП «Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій»		Стор. 37 Всього 45
	Найменування документа Рекомендації щодо застосування композитних матеріалів фірми Sika для підсилення залізобетонних конструкцій		Позначення ЗНТ-219-2167.13-001
		Статус ФІН	Ред. 001 Дата 28.01.14

Тобто, віднімаються деформації $\varepsilon_{c(2)}^{(2)}$, що існують на момент підсилення на розтягнутій грані перерізу.

Для отримання наступних точок діаграми стану перерізу, необхідно збільшити деформації на стиснутій грані, тобто

$$\varepsilon_{c(1)}^{(3)} = \varepsilon_{c(1)}^{(2)} + \Delta\varepsilon_{c(1)} = 0,0000656 + 0,01\varepsilon_{cul} = 0,0000984.$$

Виконуємо дії відповідно до п.п. 2-4, зберігаючи на першій ітерації величину деформації на розтягнутій грані, яка отримана на попередньому кроці розрахунку:

$$\varepsilon_{c(2)}^{(3)} = -0,001188.$$


Виконуємо п.п. 2-3 доти, доки зусилля N не наблизиться до 0 з достатньою точністю:

$\varepsilon_{c(1)}^{(3)}$	$\varepsilon_{c(2)}^{(3)}$	\mathcal{N}	γ	X_1, M	\bar{N}	N, MN
0.000984	-0.001607	0.003702	0.582249	0.265823	2.190363	-0.01393

Номери шарів арматури	σ_{si}	$\sigma_{si} \cdot A_{si}$	$\sigma_{si} \cdot A_{si} \cdot (X_1 - Z_{si})$
1	183.3192	0.172687	0.040723
2	-287.761	-0.87882	0.32532
3*	-89.544	-0.04513	0.019594

*) Шар армуючого композиту.

При виконанні розрахунків необхідно контролювати величину напружень в арматурі. Вона не повинна перевищувати межу текучості. Результати обчислень зведені в таблицю А.3. На рисунку А.4 приведена повна крива стану перерізу до руйнування бетону.

	ДП «Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій»	Стор. 38 Всього 45	
	Найменування документа Рекомендації щодо застосування композитних матеріалів фірми SIKА для підсилення залізобетонних конструкцій	Позначення ЗНТ-219-2167.13-001	
	Статус ФІН	Ред. 001	Дата 28.01.14

Таблиця А.3

Номер точки	$\varepsilon_{c(1)}^{(i)}$	$\varepsilon_{c(2)}^{(i)}$	\mathcal{N}	γ	$x_1, \text{ м}$	$N, \text{ кН}$	$M, \text{ МН}\cdot\text{м}$
1	0.000328	-0.0006232	0.001359	0.194083	0.241379	0.000446	0.19322619
2	0.000656	-0.0011808	0.002624	0.388166	0.25	-0.01127	0.3602823
3	0.000984	-0.0016072	0.003702	0.582249	0.265823	-0.01393	0.5096442
4	0.001312	-0.001968	0.004686	0.776331	0.28	-0.00561	0.63301661
5	0.00164	-0.002624	0.006091	0.970414	0.269231	0.001214	0.70211628
6	0.001968	-0.0033456	0.007591	1.164497	0.259259	0.00757	0.75466417
7	0.002296	-0.0038376	0.008762	1.35858	0.262032	0.00446	0.77934723
8	0.002624	-0.004264	0.00984	1.552663	0.266667	-0.00116	0.78014772
9	0.002788	-0.004264	0.010074	1.649704	0.276744	0.044183	0.79493816
10	0.002952	-0.004592	0.010777	1.746746	0.273913	-0.00236	0.80003907
11	0.00328	-0.0048216	0.011574	1.940828	0.283401	-0.00043	0.81199033

$M, \text{ кН}\cdot\text{м}$

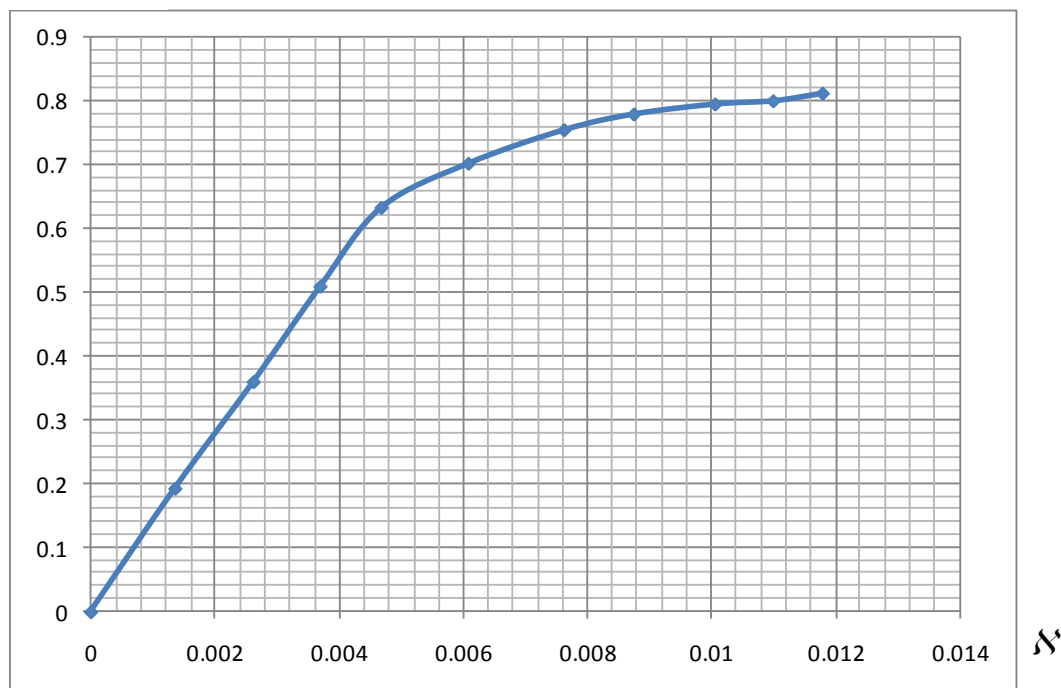



Рисунок А.4 – Залежність «момент-кривизна» для перерізу після підсилення композитними матеріалами

Як бачимо з результатів розрахунків, несуча здатність перерізу балки після підсилення сягає величини 812 кН·м, що більше за граничний розрахунковий момент 750 кН·м.

	ДП «Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій»	Стор. 39 Всього 45	
Найменування документа Рекомендації щодо застосування композитних матеріалів фірми SIKА для підсилення залізобетонних конструкцій	Позначення ЗНТ-219-2167.13-001		
	Статус ФІН	Ред. 001	Дата 28.01.14

Визначимо довжину необхідного анкерного закріплення. За формулою (4.10)

$$l_w = \frac{\gamma_R \sigma_{Ld} t_L}{\tau_{Rd}} + 0,5h \geq 0,5 \text{ м.}$$

Розрахунки зробимо для двох перерізів:

I- для перерізу, розташованого на відстані $0,25l = 0,25 \cdot 9 = 2,25$ м від опори;

II- для перерізу, в якому підсилення не потрібне (тобто, розрахунковий момент може сприйматися перерізом без підсилення).

Розрахунковий момент для перерізу I складає 562 кН·м.

Розрахунковий момент для перерізу II дорівнює несучій датності перерізу до підсилення і складає 620 кН·м. Переріз, в якому розрахунковий момент сягає такої величини, знаходиться на відстані 2,62 м від опори.

Визначимо довжину необхідного анкерного закріплення:

$t_L = 0,0014$ м – товщина стрічки (м);

$\gamma_R = 1,2$ – коефіцієнт надійності;

$\sigma_{Ld} = 120$ МПа – розрахункове значення напружень в стрічці підсилення в перерізі I та $\sigma_{Ld} = 165$ МПа в перерізі II ;

$\beta_m = 2,2$ МПа – заміряна міцність бетону на відрив при обстеженнях підсилюваної конструкції;

$\tau_{Rd} = 1,16$ МПа – розрахункова міцність бетону на відрив, яка приймається згідно таблиці 4.1 в залежності від величини β_m .


Для перерізу I

$$l_w = \frac{1,2 \cdot 120 \cdot 0,0014}{1,16} + 0,5 \cdot 0,7 = 0,174 + 0,35 = 0,524 \text{ м.}$$

Приймаємо для перерізу I - $l_w = 0,53$ м.

Для перерізу II

$$l_w = \frac{1,2 \cdot 165 \cdot 0,0014}{1,16} + 0,5 \cdot 0,7 = 0,239 + 0,35 = 0,589 \text{ м.}$$

	ДП «Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій»		Стор. 40 Всього 45
	Найменування документа Рекомендації щодо застосування композитних матеріалів фірми SİKA для підсилення залізобетонних конструкцій		Позначення ЗНТ-219-2167.13-001
		Статус ФІН	Ред. 001 Дата 28.01.14

Приймаємо для перерізу I - $l_w = 0,59$ м.

Таким чином, відстань від опори, на яку треба доводити стрічку для забезпечення необхідного анкерення, складає:

- для перерізу I – 1,97 м ($2,5-0,53=1,97$ м);
- для перерізу II – 2,03 м ($2,62-0,59=2,03$ м).

Приймаємо меншу з величин 1,97 м від опори.

Таким чином, довжина зони анкетування достатня

Розрахунок за II групою граничних станів

Розрахунок ширини розкриття тріщин

Розрахунок ширини розкриття тріщин виконується згідно з розділом 5.3 ДСТУ Б В.2.6-156.


Визначимо ширину розкриття тріщин при дії на переріз балки після підсилення експлуатаційного розрахункового моменту від постійних навантажень $M_{екс.} = 327,3$ кН·м.

За деформаційною методикою отримуємо залежність «Момент-кривизна» для розрахунку за другою групою граничних станів ($f_{ck} = 22$ МПа, $f_{yk} = 400$ МПа), як це було зроблено для розрахунків несучої здатності перерізу. При цьому, на кожному кроці розрахунку отримуємо всі дані, необхідні для подальших розрахунків: величину деформацій бетону $\epsilon_{с(1)}$ та $\epsilon_{с(2)}$, кривизну, висоту стиснутої зони бетону, напруження в арматурі.

Коефіцієнти a_k визначаємо за табл. Д.1 Додатку Д ДБН В.2.6-98 для другої групи граничних станів:

a_1	a_2	a_3	a_4	a_5
2.518	-2.0904	0.6077	-0.01675	-0.01867

Виконуючи відповідні розрахунки, отримаємо точки діаграми «Момент-кривизна» для другої групи граничних станів. В таблиці А.4 наведені результати розрахунку для точок, близьких до експлуатаційного моменту 625 кН·м.

	ДП «Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій»		Стор. 41 Всього 45
	Найменування документа Рекомендації щодо застосування композитних матеріалів фірми SIKА для підсилення залізобетонних конструкцій		Позначення ЗНТ-219-2167.13-001
		Статус ФІН	Ред. 001
		Дата 28.01.14	

Таблиця А.4

Номер точки	$\varepsilon_{c(1)}^{(i)}$	$\varepsilon_{c(2)}^{(i)}$	\mathcal{N}	γ	$x_l, м$	$N, кН$	$M, МН·м$
1	0.000355	-0.0007277	0.001547	0.201705	0.229508	0.001403	0.2279047
2	0.000525	-0.0010508	0.002252	0.298523	0.233333	-0.00159	0.3270169 3
3	0.00071	-0.0013845	0.002992	0.403409	0.237288	-0.00918	0.4276455 4
4	0.001065	-0.0018815	0.004209	0.605114	0.253012	0.000349	0.6057641 3
5	0.001109	-0.0019347	0.004349	0.630327	0.255102	0.005735	0.6249643 7

Як видно з таблиці, в п'ятій точці маємо згинальний момент 625 кН·м. Приріст деформацій в розтягнутій арматурі після ін'єктування тріщин визначається за наступним виразом:

$$\Delta\varepsilon_{s2} = \varepsilon_{s2}^{(4)} - \varepsilon_{s2}^{(2)} = -0,00073.$$

Відповідно, приріст напружень при дії моменту 625 кН·м дорівнює $\Delta\sigma_{s2}=154$ МПа. При такому прирості напружень перевірку ширини розкриття тріщин можна не виконувати. Наступні обчислення наведені для прикладу.

Ширину розкриття тріщин w_k визначаємо за виразом (5.8):

$$w_k = s_{r,max} (\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}),$$

де

$$\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm} = \frac{\sigma_s - k_t \frac{f_{ct,eff}}{\rho_{p,eff}} (1 + \alpha_e \rho_{p,eff})}{E_s} \geq 0,6 \frac{\sigma_s}{E_s} :$$


$$\alpha_e = 210000/32500 = 6,46 - \text{відношення } E_s/E_{cm};$$

$$\rho_{p,eff} = (A_s + \xi_1^2 A_p') / A_{c,eff} = 0,003054/0,0444 = 0,0688,$$

$A_p' = 0$, $A_{c,eff} = b \cdot h_{c,eff}$, де $h_{c,eff}$ – менше із значень $2,5 \cdot (h-d)$, $(h-x)/3$ або $h/2$:

$$2,5 \cdot (h-d) = 2,5 \cdot 0,064 = 0,16 \text{ м}, \quad (h-x)/3 = (0,7-0,255)/3 = 0,148 \text{ м},$$

$$h/2 = 0,7/2 = 0,35 \text{ м}.$$

	ДП «Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій»	Стор. 42 Всього 45
	Найменування документа Рекомендації щодо застосування композитних матеріалів фірми Sika для підсилення залізобетонних конструкцій	Позначення ЗНТ-219-2167.13-001
	Ред. 001	Дата 28.01.14

Менше із значень $h_{c,eff} = 0,148$ м, $A_{c,eff} = 0,3 \cdot 0,148 = 0,0444$ м².

k_t - коефіцієнт, що залежить від тривалості навантаження

$k_t = 0,6$ для короткотривалого навантаження;

$f_{ct,eff} = f_{ctm} = 2,6$ МПа.

$$\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm} = 0,000577.$$

Максимальний крок тріщин визнаємо за виразом (5.11) ДСТУ Б В.2.6-156:

$$s_{r,max} = k_3 c + k_1 k_2 k_4 \phi / \rho_{p,eff}$$

де

$\phi = 36$ мм - діаметр стрижня;

$c = 46$ мм - захисний шар бетону для поздовжньої арматури;

$k_1 = 0,8$ для стрижнів із високим зчепленням;

$k_2 = 0,5$ для згину;

$k_3 = 3,4$;

$k_4 = 0,425$.

$$s_{r,max} = 3,4 \cdot 46 + 0,8 \cdot 0,5 \cdot 0,425 \cdot 36 / 0,0688 = 245,4 \text{ мм.}$$

$$w_k = 245,4 \cdot 0,000577 = 0,142 \text{ мм} < 0,4 \text{ мм.}$$


Вимоги нормативних документів виконуються.

Розрахунок прогинів

Розрахунок прогинів виконуємо для постійних та змінних тривалих навантажень згідно ДСТУ Б В.1.2-3 «Прогини і переміщення».

Для статично визначених елементів постійного перерізу, що працюють за балковою схемою, прогин допускається визначати за формулою (5.19) ДСТУ Б В.2.6-156:

$$f = \frac{1}{r} k_m l^2$$

	ДП «Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій»	Стор. 43 Всього 45	
	Найменування документа Рекомендації щодо застосування композитних матеріалів фірми Sika для підсилення залізобетонних конструкцій	Позначення ЗНТ-219-2167.13-001	
	Статус ФІН	Ред. 001	Дата 28.01.14

де $1/r$ - кривизна у перерізі із найбільшим згинальним моментом;

k_m - коефіцієнт, що визначається за таблицею 5.5.

Кривизна обчислена і наведена в табл. А.4 (точка №5) $1/r = 0,004349$; $k_m = 5/48$; $l = 9$ м. Таким чином, прогин дорівнює

$f = 0,004349 \cdot 5/48 \cdot 9^2 = 0,0367$ м, що менше за граничний прогин 0,041 м.

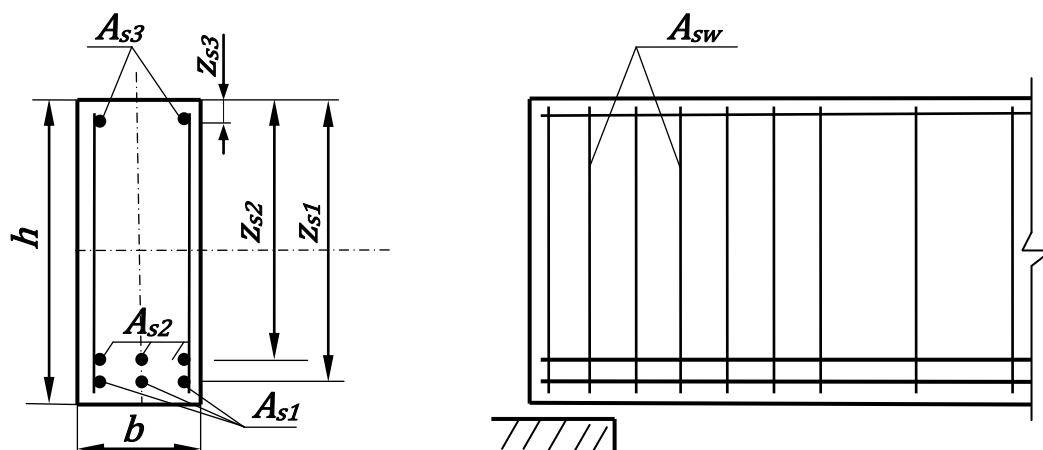
Переріз балки, підсиленої полосами композитного матеріалу, задовольняє вимогам нормативних документів за I та II групами граничних станів.

Приклад №3. Розрахунок балки за несучою здатністю похилих перерізів

На балку діє рівномірно розподілене навантаження 50 кН/п.м. Після реконструкції навантаження на балку збільшується на 20% і становить 60 кН/п.м. Необхідно перевірити опір похилих перерізів при збільшенні навантаження.

Нижня поздовжня арматура розташована у два ряди $3\varnothing 25$ A500C + $3\varnothing 25$ A500C, верхнє армування конструктивне $2\varnothing 12$ A500C (див. рис. А.5). Захисний шар для першого шару арматури $25+10=35$ мм, для другого шару – $35+25+26=86$ мм, для верхньої арматури - 29 мм.

Розрахункове значення поперечної сили на опорі від дії зовнішнього навантаження $V_{Ed} = 60 \cdot 4,5 = 270$ кН. До опори доводиться $3\varnothing 25$ A500C, тобто 50% розтягнутої арматури, встановленої у прольоті балки. Робоча висота поперечного перерізу $d = 0,5625$ м. Поперечна арматура $2\varnothing 12$ A240C з кроком 100 мм ($A_{sw} = 2,26$ см²) на відстані 0,5 м від грані опори та з кроком 250 мм на відстані 0,5 ... 1,2 м від грані опори (рис. А.5).




	ДП «Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій»	Стор. 44 Всього 45
	Найменування документа Рекомендації щодо застосування композитних матеріалів фірми Sika для підсилення залізобетонних конструкцій	Позначення ЗНТ-219-2167.13-001
		Ред. 001
		Дата 28.01.14

Рисунок А.5 – Поздовжнє та поперечне армування балки

В першу чергу треба визначити $V_{Rd,max}$ – розрахункове значення максимальної поперечної сили, яку може сприйняти елемент, обмежене руйнуванням умовних стиснутих елементів.

$$V_{Rd,max} = \alpha_{cw} \cdot v_1 \cdot f_{cd} \cdot b_w \cdot z / (\cot \Theta + \tan \Theta) =$$

$$= 1,0 \cdot 0,5472 \cdot 17,0 \cdot 3 \cdot 0,506 / (1 + 1) = 0,706 \text{ MN} = 706 \text{ кН},$$

де

$$z = 0,9d = 0,506 \text{ м},$$

кут між стиснутим умовним елементом і віссю балки прийнятий $\Theta = 45^\circ$,

$$\cot \Theta = \tan \Theta = 1,0, \quad v_1 = 0,6 \cdot (1 - 22/250) = 0,5472.$$

$$V_{Ed} = 270 \text{ кН} < V_{Rd,max} = 706 \text{ кН}.$$

Руйнування умовних стиснутих елементів не відбудеться.

Обчислимо несучу здатність похилого перерізу на відстані $l = z \cot \theta$ від грані опори.

$$V_{Rd,s} = \frac{A_{sw}}{s} \cdot z \cdot f_{ywd} \cdot \cot \Theta = (0,000226 / 0,1) \cdot 0,506 \cdot 170 \cdot 1 = 0,1944 \text{ MN} = 194,4 \text{ кН},$$

на довжині $l = z \cdot \cot \theta$ при $\Theta = 45^\circ$:


$$V_{Ed} = 270 - (0,12 + 0,9 \cdot 0,5625) \cdot 60 = 232 \text{ кН}, \text{ що більше за опір зсуву.}$$

Для підсилення приймається композитний матеріал Sika CarboDur[®]S 512 ($E_f = 160000 \text{ МПа}$, $f_{fd} = 2080 \text{ МПа}$). Площа армуючого композита $A_f = 1,2 \text{ см}^2 = 0,00012 \text{ м}^2$ (полоса товщиною 1,2 мм, шириною 50 мм), крок полос $s_f = 250 \text{ мм}$, $f_{fwd} = 0,4 \cdot f_{fd} = 0,4 \cdot 2080 = 832 \text{ МПа}$.

Загальний опір зсуву обчислюємо за формулою:

$$V_{Rd,s} = \frac{A_{sw}}{s} \cdot z \cdot f_{ywd} \cdot \cot \Theta + \frac{A_{fw}}{s_f} \cdot z \cdot f_{fwd} \cdot \cot \Theta =$$

$$= (0,000226 / 0,1) \cdot 0,506 \cdot 170 \cdot 1 + (0,00012 / 0,25) \cdot 0,506 \cdot 832 \cdot 1 =$$

	ДП «Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій»	Стор. 45 Всього 45	
Найменування документа Рекомендації щодо застосування композитних матеріалів фірми SİKA для підсилення залізобетонних конструкцій	Позначення ЗНТ-219-2167.13-001		
	Статус ФІН	Ред. 001	Дата 28.01.14

$$=0,1944+0,202=0,3964\text{MN} = 396 \text{ кН} > 232 \text{ кН}.$$

Несуча здатність похилого перерізу балки, розташованого на відстані 0,5 м від грані опори, з врахуванням підсилення забезпечена.

Виконаємо перевірку несучої здатності похилого перерізу, розташованого на відстані $l = z \cdot \cot\theta = 1,265$ м від грані опори, при максимальному значенні кута $\Theta (\cot\theta=2,5)$. На цій ділянці крок поперечних стрижнів складає 250 мм.

Найменше значення розрахункової поперечної сили V_{Ed} :

$$V_{Ed} = (270 - 60 \cdot (0,12 + 2,5 \cdot 0,506)) = 187 \text{ кН}.$$

Обчислимо несучу здатність похилого перерізу на відстані $l = 1,265$ м від грані опори.

$$V_{Rd,s} = \frac{A_{sw}}{s} \cdot z \cdot f_{ywd} \cdot \cot \Theta = (0,000226 / 0,25) \cdot 0,506 \cdot 170 \cdot 2,5 = 0,1944 \text{ MN} = 194,4 \text{ кН},$$

$$194,4 \text{ кН} > 187 \text{ кН}.$$

Несуча здатність похилого перерізу балки, розташованого на відстані 1,265 м від грані опори, забезпечена і підсилення не потребує.