

УДК 625.14

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.148.2014.71820>

**МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ШПАЛ ТИПУ СБ 3-0 МЕТОДОМ  
СКІНЧЕНИХ ЕЛЕМЕНТІВ**

Канд. техн. наук В.Г. Вітольберг

**МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ШПАЛ ТИПА СБ 3-0 МЕТОДОМ  
КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ**

Канд. техн. наук В.Г. Витольберг

**MODELING OF WORK CONCRETE SLEEPERS TYPE SB 3-0 FINITE ELEMENT METHOD**

Cand. of techn. sciences V.G. Vitolberg

*За допомогою метода скінчених елементів розроблено моделі шпал типу СБ 3-0, скріплень типу КПП-5 та баласту, які дозволяють визначити напружено-деформований стан шпал цього типу, в тому числі в особливих умовах експлуатації колій незагального користування.*

**Ключові слова:** скінчені елементи, проміжне рейкове скріплення, залізобетонна шпала, баласт

*При помощи метода конечных элементов разработаны модели железобетонных шпал типа СБ 3-0, скреплений типа КПП-5 и баласта, которые позволяют определять напряженно-деформированное состояние этих элементов, в том числе в особых условиях эксплуатации путей необщего пользования.*

**Ключевые слова:** конечные элементы, промежуточное рельсовое скрепление, железобетонная шпала, баласт.

*Using the finite element method developed models of concrete sleepers type SB 3-0, fasteners type KPP-5 and ballast. Was modeled contact problem between the elements of the intermediate node bonds, as*

*well as the interaction of concrete tie ballast. The utilization of these models allows us to determine the stress-strain state of all the elements, including the special conditions of private usage.*

**Keywords:** *finite elements, intermediate rail fasteners, concrete sleepers, ballast.*

**Вступ.** Математична модель просторової динамічної системи «екіпаж-колія» і її реалізація в програмній системі *Mathcad* дозволяє визначати просторові сили дії рухомого складу на колію, отримати значення навантажень від рейок на шпали у вертикальній і горизонтальній поперечній площинах [1, 2].

Проте, для визначення працездатності залізобетонних шпал та сфер їх застосування на ділянках залізниць незагального користування потрібно знати їх напружений стан.

**Аналіз досліджень та публікацій.** В цей час розрахунки залізобетонних шпал [3, 4, 5], які використовуються в інженерній практиці для визначення їх працездатності при високих осьових навантаженнях, обмежуються, як правило, визначенням напружень в підрейковій зоні при вертикальних навантаженнях. Рідше, в основному на стадії конструювання, виконуються розрахунки напружено-деформованого стану залізобетонних шпал з використанням розрахункової схеми у вигляді балки змінного (три ділянки) перетину, що спирається на суцільну пружну основу Вінклеровського типу. Тертя по нижній постелі і бічним граням, однобічність зв'язків шпал і баласту, нелінійність характеристик основи не враховуються. Дія горизонтальних поперечних сил замінюється дією зосереджених моментів, прикладених по середині підрейкової площадки [4, 6].

Таким чином, прийняті в даний час в практиці розрахунків напруженого стану залізобетонних шпал способи і моделі розрахунків мають високий ступінь ідеалізації і допущень, які можуть істотно викривляти реальний стан, давати занижені результати.

**Постановка задачі.** З урахуванням висловленого, в основу вибору методу і моделі розрахунку були прийняті наступні основні положення і допущення.

1. Рейки спираються на окремі опори-шпали, просторові сили взаємодії рейок і шпал мають пружно-дисипативний характер, у ряді випадків існує їх одностороння дія.

2. Залізобетонні шпали мають достатньо складну форму, яка може істотно впливати на виникаючі в них напруги і деформації.

3. Залізобетонні шпали виготовляються заздалегідь напруженими. Попереднє напруження арматури складає 1170 МПа, загальна сила напруги всієї арматури – не менше 364 кН [4], що необхідно враховувати при розрахунках.

4. Між бічними і нижніми поверхнями шпал і баластом виникають як нелінійні пружні сили, так і сили зчеплення і тертя.

5. Матеріал баласту підкоряється нелінійному закону деформації з різними межами опору розтягуванню і стисненню.

6. Ґрунти основної площадки земляного полотна, як і баласт, мають нелінійні характеристики.

**Основна частина.** Цим положенням відповідає метод скінченних елементів (МСЕ) [7, 8], що є розвитком енергетичних методів розрахунків інженерних конструкцій.

Для вирішення задач тривимірного напруженого стану масивних конструкцій найбільш споживані скінченні елементи (СЕ) у вигляді тетраедра, призми, паралелепіпеда, мають по три невідомі вузлові переміщення в кожному вузлі і полілінійну апроксимацію переміщень  $u_x$ ,  $u_y$  и  $u_z$ .

Матриці жорсткостей таких елементів приведені у ряді публікацій, наприклад [9, 10, 11]. Бібліотека скінченних елементів, вбудована в програмний комплекс [12], дозволяє виконувати моделювання залізобетонних шпал.

Таким чином, МСЕ відповідає викладеним вище вимогам, положенням і допущенням розрахунків просторового напружено-деформованого стану шпал в нелінійній постановці задачі з урахуванням виникаючих односторонніх сил моделі системи «екіпаж-колія».

Як комп'ютерна реалізація методу скінченних елементів в роботі був використаний програмний комплекс для розрахунків і проектування конструкцій "ЛІРА", версія 9.6 [13, 14, 15].

Контактна задача взаємодії усіх елементів скріплення вирішена за допомогою СЕ 265. Цей скінченний елемент об'єднує в спільну роботу суміжні вузли по поверхні підшви рейки і прокладки. За допомогою

цього СЕ між вузлами можна призначати 3 лінійні і 3 кутові зв'язки щодо осей  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  місцевої системи координат. В даному випадку в параметри жорсткості СЕ 265 входить одностороння жорсткість (тільки на стиснення) уздовж осі  $Z$ , перпендикулярної площини контакту, і жорсткості в площині контакту  $ХОУ$ , моделюючи в даному випадку тертя між нижньою гранню підшви рейки і підрейковою

прокладкою. Значення жорсткостей прокладок визначено в роботі раніше і залежить від рівня напруженого стану конструкції. Три зв'язки (на поворот щодо осей  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ ), що залишилися, задано з «нульовою» жорсткістю, що аналогічно установці шарнірів. Розміщення ряду СЕ 265 в перетині при контакті підшви рейки та прокладки показано на рис. 1.



Рис. 1. Моделювання контакту підшви рейки з підрейковою прокладкою

В загальному випадку СЕ 265 – це двовузловий скінченний елемент односторонніх пружних зв'язків, дозволяє враховувати нерівні граничні (прямі і протилежні) зусилля в зв'язках, наприклад, граничне зусилля розтягування в зв'язку можна задавати нерівним зусиллю стиснення. При розрахунках в моделях в цих скінченних елементах визначаються зусилля в зв'язках, накладених уподовж відповідних осей системи. Знаки цих зусиль визначаються знаками різниць відповідних переміщень або поворотів.

Скінченні елементи 265 дозволили також виконати моделювання контакту між бічними гранями підшви рейки і ізолюючими

вкладишами та анкера (рис. 2). При цьому задавалася нескінченна одностороння жорсткість (тільки на стиснення) із зазором (щоб уникнути ефекту заклинювання підшви рейки при поворотах рейки) в напрямі перпендикулярному осі рейки. Залишені 5 зв'язків (лінійна вертикальна, лінійна горизонтальна у напрямі осі рейки, на поворот щодо осей  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ ), задано з «нульовою» жорсткістю, що аналогічно установці шарнірів. Величина зазору була прийнята рівною 1 мм, що відповідає конструктивному зазору між бічними гранями підшви рейки і анкерами. Тільки після вибірки заданого зазору СЕ включається в роботу.

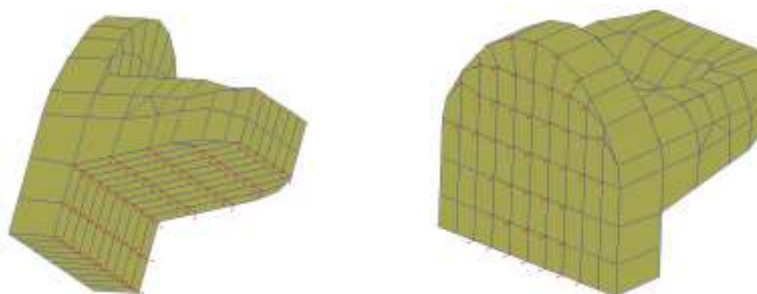


Рис. 2. Моделювання контактної задачі між боковими гранями підшви рейки і ізолюючого вкладиша та анкера

Підрейкова прокладка (рис. 3) моделювались з використанням СЕ 34 і СЕ 36 – універсальні просторові ізопараметричні шести і восьмивузлові скінченні елементи. При цьому коефіцієнт Пуассона, з урахуванням рифлений прокладок, приймався рівним  $0.32 \div 0.41$ , а приведений модуль пружності прокладки визначався як

$$E = \frac{U_{np}^{дин} \cdot h}{F},$$

де  $U_{np}^{дин}$  – жорсткість прокладки при її динамічному стисканні;

$F$  – опорна площа прокладки;

$h$  – товщина прокладки.

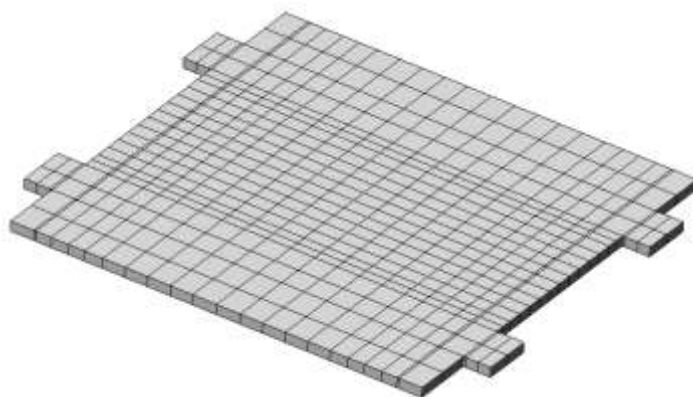


Рис. 3. Моделі підрейкової прокладки

При моделюванні залізобетонної шпали (рис. 4.) були використано три типи скінченних елементів: СЕ 34, СЕ 36 і СЕ 10. В параметри жорсткості СЕ 34 і СЕ 36, про які вже мовилося вище, в даному випадку були включені модуль

пружності, коефіцієнт Пуассона і густина бетону. СЕ 10 – це універсальний стержньовий елемент, який модулює роботу арматури з урахуванням зусиль попереднього натягнення.

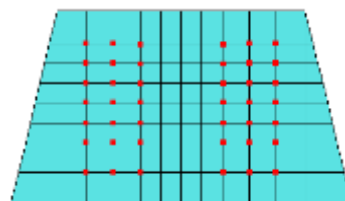
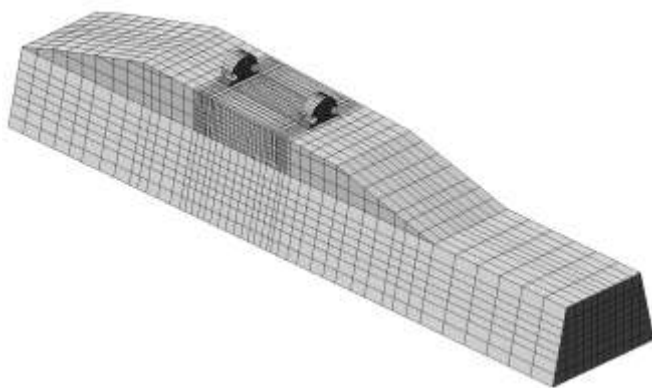


Рис. 4. Модель залізобетонних шпал СБ 3-0

Баласт моделювався із застосуванням трьох типів СЕ (рис. 5.):

– СЕ 274 – фізично нелінійний об'ємний шестивузловий ізопараметричний елемент ґрунту (довільна трикутна призма);

– СЕ 274 – фізично нелінійний об'ємний восьмивузловий ізопараметричний елемент ґрунту (довільний гексаедр);

– СЕ 56 – одновузловий скінченний елемент пружних зв'язків (для моделювання земляного полотна).

СЕ 274 і СЕ 276 призначені для моделювання односторонньої роботи, в даному випадку, баласту на стиснення з урахуванням зсуву. В параметрах жорсткості цих СЕ задаються:

- модуль деформації баласту по гілці первинного завантаження;
- коефіцієнт Пуассона;
- коефіцієнт переходу до модуля деформації по вітці вторичного навантаження;
- зчеплення баласта;
- гранична напружка при розтягуванні;
- кут внутрішнього тертя баласту;
- гранична напружка стискання.

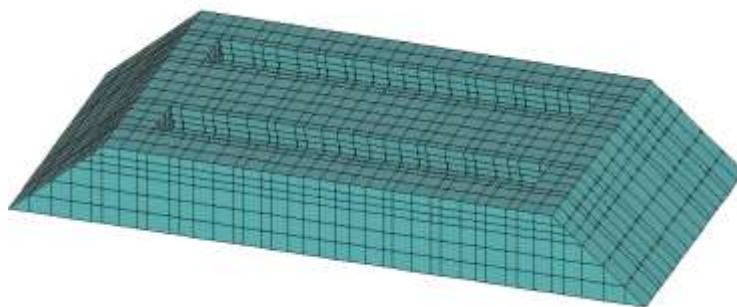


Рис. 5. Модель баласта

Контактна задача взаємодії поверхонь шпали (підшви і бічної поверхні) з баластом також вирішена за допомогою СЕ 265, властивості якого були розглянуті вище. В даному випадку в параметри жорсткості СЕ 265 входить одностороння жорсткість (тільки на стиснення) уздовж місцевої осі Z, завжди направленої перпендикулярно площини контакту, і жорсткості в площині самого

контакту XOY, що моделює тертя між поверхнею шпали і баластом.

**Висновки.** Таким чином, розроблені моделі, які на відміну від існуючих, дозволяють досліджувати об'ємний напружено-деформований стан залізобетонних шпал типу СБ 3-0 в умовах роботи колій як на магістральних залізницях, так і в особливих умовах експлуатації залізничних колій незагального користування.

### Список використаних джерел

1. Даренський, О.М. Визначення приведеної вертикальної жорсткості рейкової нитки при використанні розрахункової схеми як балки на пружних опорах з випадковими характеристиками [Текст] / О.М. Даренський, Н.В. Бугаєць, В.Г. Вітольберг // 36. наук. праць УкрДАЗТ. – 2010. – №115. – С. 151-162.
2. Darenskiy A., Vitolberg V. Results of researches by the numeral methods of vertical influences on the way of carriages of industrial transport at the railroad ties SB 3-0 // ТЕКА – Vol.12. – №4. – Р. 36-40.
3. Даніленко, Е.І. Залізнична колія. Улаштування, проектування і розрахунки, взаємодія з рухомим складом [Текст]: підручник для вищих навчальних закладів; у 2х томах / Е.І. Даніленко. – К.: Імпрес, 2010. – Том 2. – 456 с.
4. Железобетонные шпалы для рельсового пути [Текст] / А.Ф. Золотарский, Б.А. Евдокимов, Л.Г. Исаев, Л.Г. Крысанов [и др.]; под ред. А.Ф. Золотарского. – М.: Транспорт, 1980. – 270 с.
5. Шахунянц, Г.М. Железнодорожный путь [Текст]: монография / Г.М. Шахунянц. – М.: Транспорт, 1987. – 479 с.
6. Исследование работ железобетонных шпал на промышленном железнодорожном транспорте [Текст]: сб. трудов / под. ред. Б.А. Евдокимова. – М.: Стройиздат, 1982. – 132 с.
7. Городецкий, А.С. Компьютерные модели конструкций [Текст] / А.С. Городецкий, И.Д. Евзеров. – К.: Факт, 2005. – 343 с.

8. Клованич, С.Ф. Метод конечных элементов в нелинейных расчетах пространственных железобетонных конструкций [Текст] / С.Ф. Клованич, Д.И. Безушко. – ОНМУ, 2009. – 89 с.
9. Зенкевич, О.К. Метод конечных элементов в технике [Текст] / О.К. Зенкевич. – М.: МИР, 1975. – 541 с.
10. Метод конечных элементов в проектировании транспортных сооружений [Текст] / А.С. Городецкий, В.И. Заварицкий, А.А. Рассказов, А.И. Лантух-Ляшенко. – М.: Транспорт, 1981. – 142 с.
11. Шайдуров, В.В. Многосеточные методы конечных элементов [Текст] / В.В. Шайдуров. – М.: Наука, 1989. – 349 с.
12. Программный комплекс “ЛИРА - Windows” III 1-8 [Текст]. – К.: НИИ АС, 1997. – 254 с.
13. Программный комплекс для расчета и проектирования конструкций ЛИРА версия 9.0: Кн. 1. Основные теоретические и расчетные положения [Текст]: руководство пользователя. – К.: НИИ АС, 2002. – 147 с.
14. Программный комплекс для расчета и проектирования конструкций ЛИРА версия 9.0: Кн. 2. Путеводитель [Текст]: руководство пользователя. – К.: НИИ АС, 2002. – 189 с.
15. Программный комплекс для расчета и проектирования конструкций ЛИРА версия 9.0: Кн. 3. Примеры расчета и проектирования [Текст]: руководство пользователя. – К.: НИИ АС, 2002. – 99 с.

Рецензент д-р техн. наук, професор О.М. Даренський

---

Вітольберг Володимир Геннадійович, канд. техн. наук, доцент кафедри колії та колійного господарства  
Української державної академії залізничного транспорту. Тел.: 730-10-60.

Vitolberg Vladimir Gennadievich, cand. of techn. science Department «Road and track facilities» Ukraine State of  
Railway Transport Tel.: (057) 730-10-60