

ПЕРСПЕКТИВИ ЗАСТОСУВАННЯ КОМПОЗИТНОЇ АРМАТУРИ В ШПАЛАХ ІЗ БЕТОНУ

PERSPECTIVES OF THE APPLICATION OF COMPOSITE REINFORCEMENT FOR CONCRETE SLEEPERS

**Плугін А.А., д.т.н., проф., Калюжна О.В., д-р філ., Муригін М.А.,
асп., Наджафов Е.Ф., асп., Плугін Д.А., д.т.н., проф. (Український
державний університет залізничного транспорту)**

**Plugin A.A., DSc (Eng), Professor, Kaliuzhna O.V., PhD, Murygin
M.A., postgraduate, Nadzhafov E.F., postgraduate, Plugin D.A., DSc (Eng),
Professor (Ukrainian State University of Railway Transport)**

В теперішній час на залізницях світу використовуються різні конструкції підрейкових основ із різних матеріалів. Оскільки умови експлуатації залізниць постійно змінюються – зростають швидкості руху, осьові навантаження, вантажонапруженість, змінюються і національні вимоги до конструкцій підрейкових основ та матеріалів для їх виготовлення. З XIX по середину XX століття практично єдиною масовою підрейковою основою були дерев'яні шпали. Однак у зв'язку з очевидними недоліками деревини для експлуатації в умовах змінної вологості – великими вологими деформаціями, низькою біостокістю, з другої половини XX століття їх активно витісняють попередньо напружені залізобетонні шпали. Проте залізобетонні шпали також мають ряд недоліків, в основному обумовлених корозійною вразливістю арматури та бетону. Вже в XXI столітті з'являються композитні шпали, які позбавлені багатьох недоліків дерев'яних і залізобетонних шпал, все більшого поширення набуває композитна арматура для армування бетону, що має ряд переваг над сталеву арматуру. Однак вони поки не знаходять широкого застосування і дерев'яні та залізобетонні шпали досі є наймасовішими. Тому обґрунтування виготовлення та використання шпал на основі сучасних композитних матеріалів в умовах змінних вимог до підрейкових основ залізниць є актуальним завданням.

Основними елементами верхньої будови залізничної колії є баласт, підрейкова основа та рейки, що з'єднуються з підрейковою основою проміжними рейковими скріпленнями [1]. Підрейкова основа призначена для розподілу та передачі навантаження від рухомого складу та рейок на баласт і через нього – на основну площадку земляного полотна або штучну споруду, а також для забезпечення незмінних положення рейок у плані та профілі та ширини колії, їх утримання від поздовжнього переміщення.

Підрейкова основа виконується зі шпал, брусів, плит, рам. На перегонах, станціях, мостах із їздою по баласту використовуються шпали та

бруси стрілочних переводів, на металевих мостах із безбаластним мостовим полотном – плити, мостові бруси. Найбільш масовими є дерев'яні та залізобетонні шпали, рідше використовуються металеві шпали або шпали із клеєної деревини [1]. Незважаючи на перевірені часом переваги дерев'яних, залізобетонних, металевих шпал, вони мають ряд недоліків.

Дерев'яні шпали в основному виготовляються з сосни, модрина, кедра, берези, рідше – з дуба, евкаліпта. Дерев'яні шпали схильні до утворення тріщин внаслідок вологих деформацій та біологічних ушкоджень дереворуїнуючими грибами та комахами, а також мають низьку зносостійкість у підрейковій зоні [2, 3]. Металеві шпали виготовляють коробчатого перерізу із сталі. Вони схильні до корозії та електрокорозії, мають зайву електропровідність, створюють великий шум під час руху поїздів, підрейкова основа з них характеризується високою металоємністю [4]. Тому сфера застосування металевих шпал обмежена і вони застосовуються рідко.

Залізобетонні шпали (рис. 1) випускають попередньо напруженими з бетону високих класів, армованими дротяною або стержневою арматурою, зусилля попереднього напруження якої передається на затверділий бетон [5]. Попереднє напруження багато в чому визначає значну ресурсоенергоємність виробництва шпал. Воно змушує застосовувати металомісткі силові форми, потужніше технологічне устаткування, вимагає великих площ виробничих приміщень. Попереднє напруження змушує також прискорювати твердіння бетону високими витратами цементу, енергоємною тепловологовою обробкою, добавками прискорювачами твердіння, що у ряді випадків може сприяти внутрішній корозії бетону від взаємодії лугів цементу з реакційно здатними заповнювачами (рис. 2, а), корозії арматури. У шпалах, особливо з анкерними рейковими скріпленнями (рис. 1, д), значне попереднє напруження арматури сприяє утворенню поздовжніх тріщин (рис. 2, а) [5]. Залізобетонні шпали мають велику вагу, що вимагає застосування більш важких колійних машин.

Характер роботи шпали і її бетону в колії визначає застосований тип проміжного рейкового скріплення. Роздільні скріплення (рис. 1, г) через металеву підкладку розподіляють навантаження по великій площі, у горизонтальному напрямку через розташування закладного болта в отворі із зазором є податливими і в цілому створюють менші напруження в бетоні. Але вони є надто жорсткими у вертикальному напрямку, що неприйнятно для високих швидкостей руху, матеріаломісткими й багатодетальними, їх експлуатація трудомістка, тому їх поступово замінюють нероздільними пружними скріпленнями, позбавленими зазначених недоліків (рис. 1, д). Проте анкерний варіант цих скріплень має надто високу жорсткість у поперечних напрямках, що у шпалах з ними може сприяти утворенню як подовжніх (рис. 2, а), так і поперечних (рис. 2, б) тріщин. Нерівномірне

динамічне навантаження шпали з такими скріпленнями, вимагає більш високих класів бетону – нормованих С32/40 (В40, М500) недостатньо.

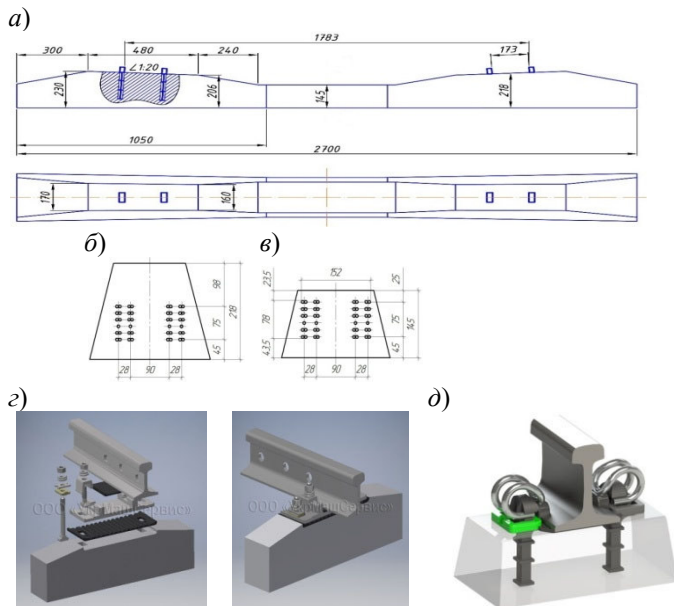


Рис. 1. Попередньо напружені залізобетонні шпали: а - загальний вигляд; б - підрейковий переріз; в - середній переріз; з - роздільне клемно-болтове рейкове скріплення КБ-65 (<https://ukrmashservis.com.ua/>); д - нероздільне безпідкладкове анкерне пружне рейкове скріплення КПП-5 (<https://krt.co.ua/>)



Рис. 2. Тріщини у залізобетонних шпалах: а – дрібна сітка тріщин від внутрішньої корозії і велика подовжня тріщина у кінці шпали; б – поперечна тріщина в зоні анкера

Значний вплив на експлуатаційні якості шпал мають також електричні і корозійні характеристики сталеві арматури. Електропровідність,

Органічні і мінеральні в'язучі та дорожні бетони на їх основі

корозійна та електрокорозійна уразливість сталеві арматури, особливо попередньо напруженого високоміцного дроту $\varnothing 3\text{Вр}1400$:

- обумовлює низький електричний опір шпал, витік (втрату) тягового струму та його електрокорозійний вплив на самі шпали та, особливо, оточуючі конструкції;

- спричиняє утворення і розвиток пошкоджень шпал від корозії та електрокорозії арматури;

- вимагає високих вимог до тріщиностійкості шпал.

Високі вимоги до тріщиностійкості вимагають значного зусилля попереднього напруження, яке, у свою чергу:

- створює значні розтягувальні напруження у поперечному напрямку, які сприяють утворенню та розвитку пошкоджень шпал (рис. 2, а);

- вимагає застосування для виробництва шпал важких металомістких силових форм;

- вимагає призначення великої передаточної міцності бетону 32 МПа.

Досягнення такої передаточної міцності за 8-24 години вимагає енергоматеріалоємної інтенсифікації твердіння (ТВО, добавки-прискорювачі тощо).

В теперішній час у різних галузях все ширше використовуються полімери та композиційні матеріали на їх основі [3, 6–8]. Попередній аналіз їх властивостей показує, що шпали із таких матеріалів можуть бути позбавлені зазначених недоліків. Композитні (полімерні) шпали успішно проходили експлуатаційні випробування, але поки не знайшли широкого застосування. Однак відомі й недоліки полімерів – старіння під впливом ультрафіолетового випромінювання, невисока теплостійкість, горючість. Істотно відрізняються від залізобетону та деревини і їх фізико-механічні властивості, особливо деформативні характеристики.

Таким чином традиційні дерев'яні, металеві, попередньо напружені залізобетонні шпали, а також клеєні дерев'яні та композитні шпали, що з'явилися в останні десятиліття, мають недоліки, що зумовлюють в сучасних умовах високу вартість будівництва та експлуатації залізниць, значні додаткові витрати на підвищення ресурсу та довговічності конструкцій шляху, забезпечення безпеки руху.

В результаті аналітичного огляду показано, що багатьох недоліків можуть бути позбавлені бетонні шпали, армовані композитною арматурою [3, 6, 8]. Серед їх переваг можна відзначити захищеність полімеру бетоном від ультрафіолетового випромінювання, високу корозійну стійкість арматури. Заміна сталеві арматури корозійностійкою композитною арматурою дозволить знизити вимоги до тріщиностійкості шпал і зменшити зусилля попереднього натягу (або відмовитися від нього). Це дозволить оптимізувати вимоги до ранньої міцності бетону, зменшити ушкоджувальність шпал при експлуатації за рахунок зниження напруг, що розтягують, у поперечному напрямку.

Виконано теоретичні та експериментальні дослідження, в результаті яких з'ясовано механізм протікання електричного струму через бетонну шпалу, у тому числі роль мікротріщин у ньому (рис. 2), показано, що заміна сталевий дрітної арматури неелектропровідною композитною арматурою дозволить підвищити електричний опір шпали навіть при роботі під навантаженням з тріщинами. Отже, заміна сталевий арматури композитною арматурою може дозволити: знизити вимоги до тріщиностійкості шпал і, відповідно, зменшити зусилля попереднього натягу (або відмовитися від нього), оптимізувати вимоги до ранньої міцності бетону; зменшити ушкоджувальність шпал під час експлуатації за рахунок зниження напруг, що розтягують, у поперечному напрямку, відсутність корозії та електрокорозії арматури.

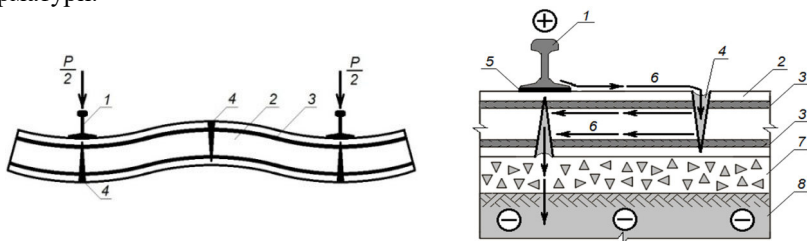


Рис. 3. Вплив мікротріщин на електропровідність шпал: 1 - рейка; 2 - бетон шпали; 3 - арматура; 4 - мікротріщини, заповнені електролітом (насиченим розчином $Ca(OH)_2$); 5 - підрейкова ізолююча прокладка; 6 - струм витоку; 7 - баласт; 8 - основна площадка земляного полотна

На основі конструкції попередньо напруженої залізобетонної шпали, армованої високоміцним сталевим дротом $44\text{Ø}3$ мм, розроблено конструкцію бетонної шпалі, армованої композитною (епоксидний склопластик) арматурою $8\text{Ø}12$ мм (рис. 4) [9].

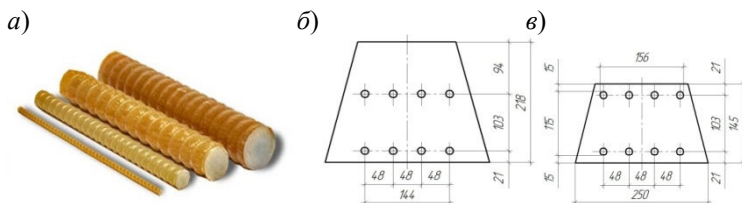


Рис. 4. Бетонні шпалі, армовані композитною арматурою: а – загальний вигляд композитної арматури; б, в – перерізи шпалі (рис. 1), армованої композитною арматурою – підрейковий (б) та середній (в)

В результаті виконаних методом скінчених елементів розрахунків і аналізу напружено-деформованого стану шпал (рис. 5) [9] встановлено, що за однакового попереднього напруження 353 кН максимальні стискаючі

Органічні і мінеральні в'язучі та дорожні бетони на їх основі

напруження у шпалах, армованих сталевим дротом (25,7 МПа, рис. 5, б) і композитною арматурою (26,6 МПа, рис. 5, в), майже однакові. Максимальні розтягувальні напруження у бетоні шпали з композитною арматурою у середньому перерізі (0,8 МПа) перевищують напруження у шпалі зі сталеву арматурою (0,12 МПа), хоча умови для утворення тріщин не створюються. Зниження попереднього напруження композитної арматури на 25 % та більше призводить до незначного збільшення максимальних стискаючих напружень, проте розтягувальні напруження у середньому перерізі збільшуються до величин до 6,3 МПа, що перевищують границю міцності на розтяг, отже, шпала працює з тріщинами у розтягнутій зоні середнього перерізу. Таким чином, зниження попереднього напруження композитної арматури аж до відмови від нього не призведе до руйнування бетону в стиснутих зонах, проте обумовить роботу шпал із тріщинами.

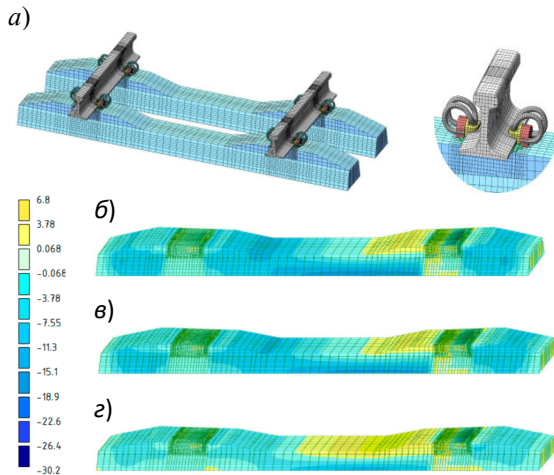


Рис. 5. Аналіз напружено-деформованого стану попередньо напружених шпал: а – скінчено елементна модель; б, в, з – поля напружень шпал залізобетонної (б), бетонної з композитною арматурою (в) і бетонної з композитною арматурою зі зменшеним на 25 % попереднім напруженням (з)

Таким чином, припущено, що заміна сталеві арматури композитною у попередньо напружених шпалах із бетону дозволить зменшити зусилля попереднього натягу, оптимізувати вимоги до ранньої міцності бетону, зменшити ушкоджуваність шпал під час експлуатації за рахунок зниження напруг, що розтягують, у поперечному напрямку, виключити корозію та електрокорозії арматури, підвищити електричний опір шпал. Для шпал,

армованих композитною арматурою, рекомендовано знизити вимоги до тріщиностійкості шпал і, відповідно, зменшити зусилля попереднього натягу на 50 %. Дослідження продовжуються.

Список використаних джерел

1. Даніленко Е.І. Залізнична колія. Київ. 2010.
2. Плуґін Д.А. Клеєні дерев'яні бруси підвищеної тріщиностійкості. Дис... к.т.н. УкрДУЗТ. Харків. 2003.
3. Ferdousa W., Manalob A., Al Ajarmehc O., Mohammedd A.A., Salihe C., Yuf P., Khotbehsarag M.M., Schubelh P. Static behaviour of glass fibre reinforced novel composite sleepers for mainline railway track. *Engineering Structures*. 2021. v.229. 111627.
4. Guoqing J., Hao F., Peyman A. Lateral displacement of different types of steel sleepers on ballasted track. *Construction and Building Materials*. 2018. V.186. P.1268–1275.
5. Plugin A.A., Miroshnichenko S.V., Lobiak O.V., Kalinin O.A., Plugin, D.A. Crack resistance of reinforced-concrete sleepers with elastic rail fastening systems without base-plate. *IOP Confer. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 2020. V.1002(1). 012010. DOI: 10.1088/1757-899X/1002/1/012010
6. Raj A., Nagarajan P., Shashikala A.P. A Review on the Development of New Materials for Construction of Prestressed Concrete Railway Sleepers. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 2018. v.330. 012129. DOI:10.1088/1757-899X/330/1/012129
7. Indhiradevi, P., Saravanakumar, P., Manikandan, P., Rajkumar, K., Logeswaran, S., Arul pandian, S. A Comparative Study on Recycled Plastic Railway Sleeper with Concrete Sleeper. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 2021. V.1145. 012125. DOI: 10.1088/1757-899X/1145/1/012125
8. Shokrieh M.M., Rahmat M. On the reinforcement of concrete sleepers by composite materials. *Composite Structures*. 2006. V.76. p.326–337.
9. Plugin A., Kaliuzhna O., Lobiak O., Plugin D., Nadzhafov E., Lagler M. Regarding the Replacement of Steel Reinforcement in Pre-Stressed Concrete Sleepers with Composite Rebars. *Internat. Scient. Confer. on Aeronautics, Automotive and Railway Engineering and Technologies BulTrans-2022*. <http://bultrans.org/BulTrans-2022-program.pdf>