

УДК 539.43

ПРО ВИЗНАЧАЛЬНІ ПАРАМЕТРИ РОБОТОЗДАТНОСТІ ПРУЖНИХ КЛЕМ РЕЙКОВИХ СКРІПЛЕНЬ

О. П. ОСТАШ, Р. В. ЧЕПІЛЬ, В. І. ГРИБОВСЬКА

Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів

Встановлено, що пружні клеми типу КП-5 рейкових скріплень типу КПП-5 зі сталі 65Г менш витривалі, ніж зі сталі 60С2, незважаючи на вищі її характеристики міцності і витривалості, встановлені окремо за розтягу, згину і закруту лабораторних зразків. Виявлено, що втомна довговічність клею у першу чергу залежить від здатності матеріалу релаксувати механічні напруження. Запропоновано параметр, за яким слід вибирати матеріал клею.

Ключові слова: *рейкові скріплення, пружна клема, витривалість, вибір матеріалу.*

Одними із найважливіших елементів верхньої будови колії є проміжні рейкові скріплення, які з'єднують рейки зі шпалами і містять пружні елементи – т.зв. клеми. Вони забезпечують необхідну силу притиску рейки до шпали і надають демпфувальні властивості скріпленню [1, 2]. З 2003 р. на залізничних коліях України встановлюють скріплення типу КПП-5 з клемою типу КП-5, яка працює за одночасної деформації згину і закруту, що забезпечує кращі її пружні властивості проти застосовуваних [2]. Подібні скріплення використовують за кордоном: Pandrol (Велика Британія), Vossloh (Німеччина), SB-W1 (Польща) [3–5].

Виготовляють пружні клеми зі сталей типу 55С2 і 60С2 [6–8] з вмістом 0,55...0,60% вуглецю і до 2% кремнію. Їх суттєвим недоліком є підвищена схильність до знеуглецювання поверхневих шарів на етапах формоутворення і термічної обробки виробів [9, 10]. Тому як заміник цих матеріалів видається перспективною сталь 65Г з вмістом 0,64...0,66% вуглецю і до 1% марганцю, яка не тільки менш схильна до знеуглецювання, а й за однакової твердості володіє вищою міцністю, витриваліша і пружніша (що забезпечує сильніший притиск скріплення), краще прогартовується і дешевша на 20...25% порівняно зі сталлю 60С2А [10]. Жорсткість клею зі сталі 60С2 становить 1,79 kN/mm, а зі сталі 65Г – 1,95 kN/mm.

Мета цього дослідження – порівняти характеристики витривалості сталей 60С2 і 65Г і встановити параметри, які визначають втомну довговічність клею типу КП-5.

Матеріали та методика. Циліндричні зразки $\varnothing 6$ mm у робочій частині та клеми типу КП-5 (рис. 1), виготовлені за штатною технологією з прутків $\varnothing 16$ mm зі сталей 60С2 (mass%: 0,59 С; 1,88 Si; 0,83 Mn; 0,12 Cr) та 65Г (mass%: 0,66 С; 0,29 Si; 1,02 Mn; 0,12Cr), гартували в оливі після нагріву у печі та електроконтактним способом до температури 870°C (сталь 60С2) і 810°C (сталь 65Г), а також відпускали за 470°C (сталь 60С2) і 400°C (сталь 65Г), щоб отримати однакову твердість.

Зразки випробовували на статичний і циклічний ($R = 0,1$ і $0,7$) розтяг та обертовий згин ($R = -1$) за стандартними методиками. Напружено-деформований стан клею за заданого навантаження визначали скінченно-елементним методом (розмір

тетроїдних елементів 0,13...2,6 mm, кількість вузлів – 51191, елементів – 32990), використовуючи пакет програм Solid Works.

На витривалість клеми випробовували за розробленою раніше методикою, яка моделює реальні параметри циклу їх навантаження під час проходження вантажного потягу: максимальне навантаження $P_{\max} = 8...19$ kN (максимальне вертикальне переміщення головки клеми $l_0 = 4,5...11$ mm) за розмаху навантаження $P_{\max} - P_{\min} = 2$ kN (розмах переміщення 1,1 mm) з асиметрією $R = 0,75...0,9$ і частотою синусоїдального циклу 10Hz [11]. Криві втоми клем будували в координатах $P_{\max} - N_f$, де N_f – кількість циклів до їх руйнування. Мікрофрактографічні особливості зламів вивчали на сканувальному електронному мікроскопі ZEIS EVO-40XVP.

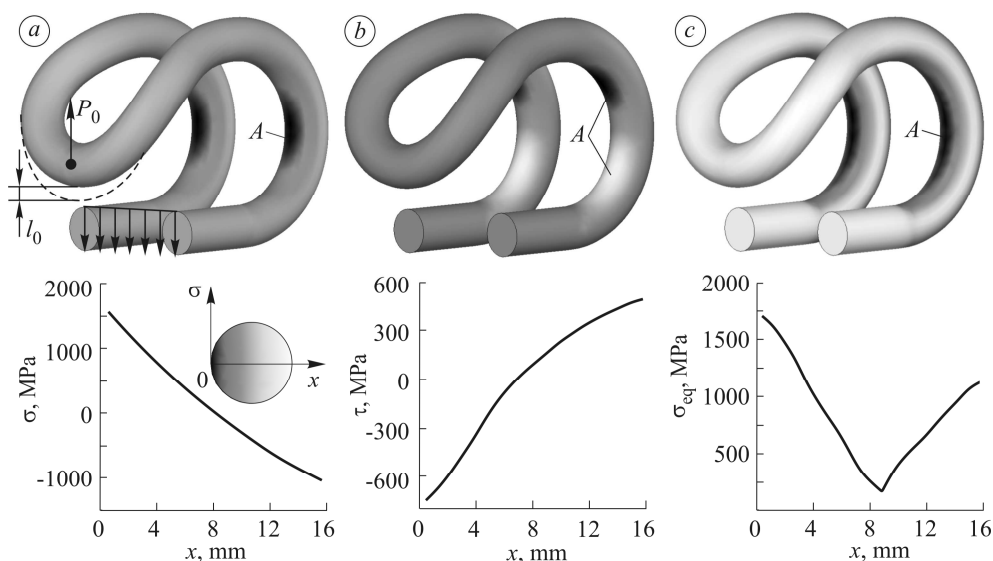


Рис. 1. Зони концентрації напружень (A) та їх розподіл у перерізі клеми типу КП-5: a – нормальні; b – дотичні; c – еквівалентні.

Fig. 1. Stress concentration areas (A) and their distribution in the cross section of KP-5 type clamp: a – normal; b – shear; c – equivalent.

Результати та їх обговорення. Напружено-деформований стан клем. Розрахунки в пружній поставі задачі свідчать, що під навантаженням у клемі формується складний напружений стан (рис. 1), спричинений деформаціями від розтягу, згину і закруту. Зокрема, за прикладеного навантаження $P = 12,5$ kN головка клеми переміщується по вертикалі на 7,27 mm, що добре узгоджується з отриманими раніше експериментальними результатами [11]. Визначили ділянки (зони A на рис. 1), де виникають максимальні нормальні, дотичні та еквівалентні за Мізесом напруження, а їх розподіл по перерізу клеми вказує на їх найбільші значення у приповерхневих шарах.

Механічні характеристики сталей. Роботоздатність клем визначають структура і механічні властивості конструкційних сталей. Виявили (табл. 1), що за переважно трооститної структури та практично однакової твердості сталь 65Г за міцністю, пружністю і границею витривалості переважає сталь 60С2, дещо поступаючись їй за характеристиками пластичності. Важливо, що перевага за витривалістю спостерігається за розтягу, згину і закруту та різної асиметрії циклу навантаження, що відповідає умовам роботи клем. Відзначимо також, що розрахункові значення розтягальних і еквівалентних напружень у приповерхневих ша-

рах клем (рис. 1а, с) перевищують границю плинності сталей (табл. 1), тобто за таких умов клеми були б нероботоздатними. Тому в умовах пружно-пластичного стану матеріалу під час навантаження ці напруження повинні бути меншими. Таким чином, за отриманими механічними характеристиками можна зробити висновок, що втомна довговічність клем зі сталі 65Г повинна бути вищою, ніж зі сталі 60С2, тобто сталь 65Г є альтернативним матеріалом для пружних клем рейкових скріплень [10].

Таблиця 1. Механічні властивості сталей 60С2 і 65Г

Марка сталі	Спосіб нагріву під гартування	Механічні характеристики				Твердість НРС	Границя витривалості, МПа					
		$\sigma_{0,2}$	σ_B	δ	ψ		власні дані		довідникові [3]			
							обертвий згин, σ_a^*	розтяг, $\Delta\sigma_R^{**}$		σ_{-1}^{tens}	σ_{-1}^{bend}	τ_{-1}^{tors}
		$R = 0,1$	$R = 0,7$									
МПа		%										
60С2	Пічний	1250	1380	10	29	44	$\frac{600}{290}$	480	355	520	650	340
65Г		1450	1600	7	24	45	$\frac{630}{450}$	510	360	530	670	400
60С2	Електроконтактний	1410	1530	9	28	45	$\frac{-}{400}$	-	-	-	-	-
65Г		1570	1690	7	23	46	$\frac{-}{490}$	-	-	-	-	-

* – база випробувань $N = 10^7$ cycles; ** – база випробувань $N = 10^6$ cycles; у чисельнику – дані після зняття знеуглецьованого шару, у знаменнику – за його наявності; σ_{-1}^{tens} , σ_{-1}^{bend} , τ_{-1}^{tors} – границі витривалості сталей за розтягу, згину і закруту, відповідно; наведено усереднені значення.

Витривалість клем і визначальний параметр їх роботоздатності. Криві втоми демонструють (рис. 2), що витривалість клем з альтернативного матеріалу (сталь 65Г) на протигагу очікуванням менша, ніж з традиційного (сталь 60С2), і ця тенденція тим вираженіша, що вищий рівень навантаження. Вони руйнуються в зоні найбільшої концентрації напружень (рис. 3а і 1а, с).

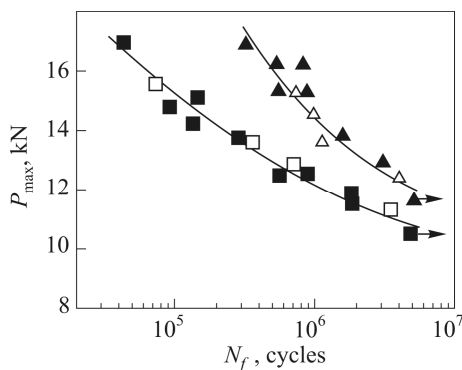


Рис. 2. Криві втоми клем типу КП-5, виготовлених зі сталей 60С2 (▲, △) та 65Г (■, □) після гартування за різних способів нагріву (■, ▲ – пічний; □, △ – електроконтактний).

Fig. 2. Fatigue curves of KP-5 type clamps, made from 60С2 (▲, △) and 65Г (■, □) steels after quenching using various types of heating (■, ▲ – furnace; □, △ – electrocontact).

Зауважимо, що на відміну від випробувань стандартних зразків [10], відсутня різниця у витривалості клем після пічного і електроконтактного нагрівів (рис. 2). Мікрофрактографічний аналіз виявив, що сталі 60С2 властивий переважно в'язкий мікромеханізми руйнування, де на окремих ділянках зафіксували втомні борозенки (рис. 3b), а сталі 65Г – мішаний крихко-в'язкий з через- і міжзеренними відкольними фасетками (рис. 3c).

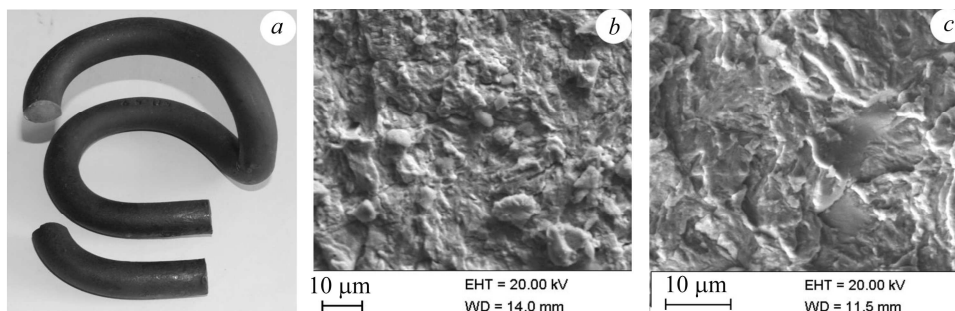


Рис. 3. Зруйнована клем (a) та мікрофрактограми зони початкового руйнування клем зі сталей 60С2 (b) і 65Г (c).

Fig. 3. Fractured clamp (a) and microfractography of the initial fracture zone of 60C2 (b) and 65Г (c) steels clamps.

Таку невідповідність витривалості лабораторних зразків сталей і клем із них можна пов'язати з тим, що напруження в їх приповерхневих шарах за складного напруженого стану під час циклічної деформації зменшуються до прийняттого рівня. Тому тут визначальною є здатність матеріалу релаксувати напруження внаслідок пластичної деформації його мікрооб'ємів, а енергія пружно-пластичного деформування повинна у першу чергу обумовлювати витривалість клем. Таку енергію деформування W_d можна характеризувати зменшенням сили притиску клем ($\Delta P = P_0 - P$) і зміною висоти її головки ($\Delta h = h - h_0$) після певної кількості циклів навантаження ($\Delta N = \text{const}$) порівняно з їх початковим значенням, тобто $W_d = \Delta P \cdot \Delta h$ для заданої геометрії клем (рис. 4 і табл. 2).

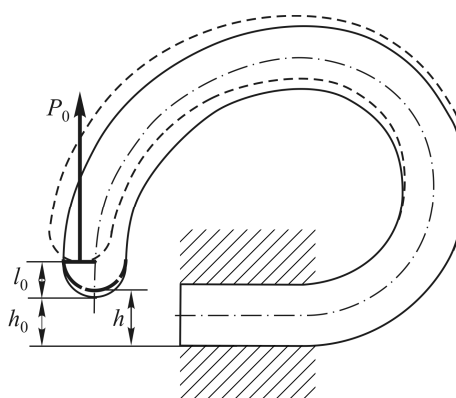


Рис. 4. Схема навантаження клем типу КП-5 та її залишкової деформації.

Fig. 4. Loading mode of KP-5 type clamp and its residual deformation.

Встановлено (табл. 2), що за заданого навантаження ($l_0 = 9 \text{ mm}$) клем зі сталі 60С2, які дещо відрізнялись за твердістю (1...2 HRC), довговічність N_f підвищується зі зростанням енергії деформування W_d (здатності матеріалу до релаксації напружень). Аналогічну тенденцію виявили, порівнюючи клем з різних сталей: зменшенню періоду N_f у 2,8–6 рази клем зі сталі 65Г проти клем зі сталі 60С2 відповідає падіння енергії W_d у 5,1–5,8 рази залежно від навантаження ($l_0 = 6...8 \text{ mm}$). Таким чином, їх витривалість залежить від здатності релаксувати прикладені напруження, а не від характеристик міцності та опору втомному руйнуванню матеріалу, оцінених на лабораторних зразках (рис. 5).

Тому за заданого навантаження (P_0, l_0) у клемах зі сталі 65Г, яка характеризується меншою пластичністю (δ і ψ , табл. 1) і релаксаційною здатністю (W_d , табл. 2), локальні напруження в зоні руйнування вищі, ніж у клемах зі сталі 60С2, що сприяє реалізації крихких мікромеханізмів втомного руйнування (рис. 3с), а отже, зниженню їх витривалості (див. рис. 2).

Таблиця 2. Зв'язок між втомною довговічністю клем та релаксаційною здатністю матеріалу

Вихідне переміщення головки клеми l_0 , mm	Сила притиску від статичного складника навантаження, kN, зі сталей		Зміна висоти головки клеми Δh^* , mm		Енергія деформування W_d , kN·mm		Період до руйнування N_f , cycles	
	60С2	65Г	60С2	65Г	60С2	65Г	60С2	65Г
9	$\frac{16,30}{15,56}$	–	0,35	–	0,260	–	$8,9 \cdot 10^5$	–
	$\frac{15,47}{15,00}$	–	0,25	–	0,118	–	$5,4 \cdot 10^5$	–
8	$\frac{14,00}{13,45}$	$\frac{14,20}{14,00}$	0,30	0,15	0,165	0,030	$1,5 \cdot 10^6$	$2,5 \cdot 10^5$
7	$\frac{12,35}{11,77}$	$\frac{12,60}{12,45}$	0,15	0,10	0,087	0,015	$3,9 \cdot 10^6$	$9,2 \cdot 10^5$
6	$\frac{11,81}{11,40}$	$\frac{11,90}{11,75}$	0,10	0,05	0,041	0,008	$5,0 \cdot 10^6$	$1,8 \cdot 10^6$

Примітка: у чисельнику – початкове значення притискової сили (P_0); у знаменнику – після $2 \cdot 10^5$ cycles навантаження; * – після $2 \cdot 10^5$ cycles навантаження.

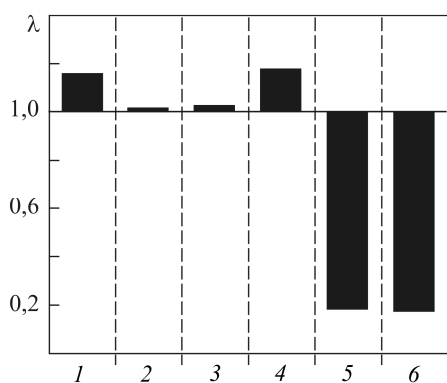


Рис. 5. Порівняння характеристик сталей 65Г і 60С2 і клем:
 λ – відношення характеристик;
 I – границі міцності сталей;
2–4 – границі їх витривалості за розтягу, згину та закруту, відповідно;
5 і 6 – релаксаційна здатність (розсіяна енергія деформування) клем і кількість циклів до їх руйнування при $l_0 = 8$ mm.

Fig. 5. Comparison of 65Г and 60С2 steels and clamps characteristics:
 λ – characteristics ratio; I – steels ultimate strength; 2–4 – endurance limits of steels under bending and torsion, respectively; 5 and 6 – clamps relaxation ability (scattered deformation energy) and a number of cycles to their failure at $l_0 = 8$ mm.

ВИСНОВКИ

Втомна довговічність пружних клем типу КП-5 рейкових скріплень типу КПП-5 зі сталі 65Г менша, ніж зі сталі 60С2, незважаючи на її вищі характеристики міцності і витривалості, встановлені окремо за розтягу, згину і закруту лабораторних зразків. Визначальним параметром їх роботоздатності в умовах складного напруженого стану за циклічного навантаження є здатність матеріалу до ре-

лаксації механічних напружень, яку можна оцінити за падінням притискної сили і залишковою деформацією клеми після певної кількості циклів навантаження.

РЕЗЮМЕ. Выявлено, что упругие клеммы типа КП-5 рельсовых скреплений типа КПП-5 из стали 65Г менее выносливы, чем из стали 60С2, несмотря на ее высокие характеристики прочности и выносливости, установленные отдельно при растяжении, изгибе и кручении лабораторных образцов. Обнаружено, что усталостная долговечность клемм в первую очередь зависит от способности материала к релаксации механических напряжений. Предложен параметр, по которому следует выбирать материал клемм.

SUMMARY. It is established that the KP-5 type elastic clamps of rail fasteners KPP-5 made from 65Г steel have lower endurance value comparing to clamps from 60С2 steel, despite of the high strength and durability characteristics of 65Г steel determined under tension, bending and torsion of laboratory specimens. It is found that clamps fatigue durability primarily depends on the material ability to mechanical stress relaxation. A parameter for clamp material selection is proposed.

1. *Говоруха В. В.* Механика деформирования и разрушения упругих элементов промежуточных рельсовых скреплений. – Днепропетровск: Лира ЛТД, 2005. – 388 с.
2. *Даніленко Е. І.* Залізнична колія. Улаштування, проектування і розрахунки, взаємодія з рухомим складом. – К.: Інпрес, 2010. – Т. 1.– 522 с.
3. *News, views and contacts from the global railway industry.* – URL: <http://www.railway-technology.com/contractors/rail/>
4. *Judge T.* Rail fastening of North American companies // *Railway Track & Struct.* – 2008. – № 6. – P. 45–53.
5. *Стагл Дж.* Рельсовые скрепления и их компоненты // *Железные дороги мира.* – 2005. – № 5. – С. 73–76.
6. *ГОСТ 14959-79.* Прокат из рессорно-пружинной углеродистой и легированной стали. Технические требования. – М.: Изд-во стандартов, 1973. – 18 с.
7. *Yamada Y.* Materials for Springs. Translated from the Japanese original edition published by JSSE [electronic resource]. – Berlin: Springer; Tokyo: Japan Society of Spring Engineers, 2007. – 378 с.
8. *Development of Si–Mn alloyed spring steels suitable for elastic rail clip (ERC) application / K. K. Keshari, S. Kumar, A. Chatterjee, S. Ghosh, A. K. Bhakat, and B. Sarkar // Int. J. of Metallurgical Eng.* – 2015. – 4, №1. – P. 1–5.
9. *Вплив формоутворення та термообробки пружних елементів рейкових скріплень на структуру їх матеріалу / В. І. Грибовська, О. П. Остап, Р. В. Чепіль, В. Я. Подгурська // Наук. нотатки. Міжвуз. зб. ЛНТУ.* – 2013: – Вип. 41, ч. 1. – С. 184–190.
10. *Грибовська В. І., Чепіль Р. В., Остап О. П.* Вплив знеуглецювання на витривалість сталей для рейкових скріплень // *Фіз.-хім. механіка матеріалів.* – 2016. – 52, № 3. – С. 56–62. (*Hrybovs'ka V. I., Chepil' R. V., Ostash O. P.* Influence of decarburization on the durability of steels for rail accessories // *Materials Science.* – 2016. – 52, № 3. – P. 357–364.)
11. *Грибовська В. І., Чепіль Р. В.* Оцінювання витривалості пружних клем рейкового скріплення КПП-5 // *Фіз.-хім. механіка матеріалів.* – 2013. – 49, № 1. – С. 124–129. (*Hrybovs'ka V. I., Chepil' R. V.* Estimation of the durability of elastic clamps of the KPP-5 rail fastening // *Materials Science.* – 2013. – 49, № 1. – P. 124–129.)

Одержано 05.08.2016