Корнута В. Про розсіювання енергії в циклічно навантажу-ваному контакті зубця з шарошкою / Корнута В., Шацький І. // Вісник ТНТУ. — 2012. — Том 67. — № 3. — С.49-56. — (механіка та матеріалознавство).

УДК 539.3; 622.24

В. Корнута[1], канд. техн. наук;
І. Шацький[2], канд. фіз.-мат. наук

[1]Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
[2]Івано-Франківський відділ Інституту прикладних проблем механіки і математики ім. Я. С. Підстригача НАН України

ПРО РОЗСІЮВАННЯ ЕНЕРГІЇ В ЦИКЛІЧНО НАВАНТАЖУВАНОМУ КОНТАКТІ ЗУБЦЯ З ШАРОШКОЮ

Резюме. *Проведено порівняльний якісний аналіз роботи двокомпонентного та трикомпонентного з'єднань "шарошка-зубець" з урахуванням мікропроковзування під циклічним навантаженням. Розглянуто реологічні моделі з'єднань як систем із зосередженими параметрами. Пропонований підхід допускає аналітичне описання фізичних співвідношень за будь-якої програми немонотонного навантаження. Описано розсіювання енергії у фрикційному контакті та побудовано петлі конструкційного гістерезису. Встановлено залежність величини розсіяної енергії від порогового значення сили зрушування. Виявлено зменшення дисипації енергії у фрикційних контактах трикомпонентного з'єднання з оптимально підібраними натягами відносно двокомпонентного з'єднання з оптимальним натягом. Наведено приклади розрахунку. Проведений аналіз підтвердив сприятливий вплив раціонально спроектованої додаткової втулки на підвищення довговічності озброєння бурових шарошкових доліт.*

Ключові слова*: з'єднання зубець–шарошка, фрикційний контакт, розсіювання енергії, циклічне навантаження.*

V. Kornuta, I. Shatsky

ON DISSIPATION IN JUNCTION OF PIN WITH CONE UNDER CYCLIC LOADING

Summary. *The problem of rational design of cone bits carbide-tipped armament for oil and gas industry needs is being considered. Previously the authors had found a significant increase of load capacity of pressure coupling with intermediate elastic sleeve under the impact of monotonous static load.*

In the presenedt article a comparative qualitative analysis of two-component and three-component junctions "pin-cone" under the impact of cyclic loading has been carried out taking into account the microslip in frictional contacts.

Rheological models of compounds are considered as systems with lumped parameters, which are built using the Hooke's and Saint-Venant's elements. The proposed approach allows analytical description of the physical relationship for any program of nonmonotonic loading.The equations of curves of unloading and then repeated loading have been obtained basing on the Masing's principle from the formulas for the active load.

For zero-to-compression stress cycle the energy dissipation in frictional contact have been described and loops of construction hysteresis have been built. For both variants of the considered structures the dissipated energy values dependence on the force threshold values, when moving starts, has been found. The decrease of energy dissipation in frictional contact three-component compounds with optimally selected tightness relative to two-component compounds with optimal tension is shown. The examples of calculation are given for pressure coupling in the case, when both sleeve and toothed wheel are made of the same materials. The results of the calculation testify that, in the case when the load capacity for the optimal design of three-

component compound under one-act load is 30% higher than the same for the two-component compounds, the threshold value of microslip moving start effort for design with a bushing is only in 20% higher than the same value for construction without a bushing. Smaller effect is explained by the fact that three-component optimal design,t constructions is optimized for strength balance by equivalent stresses, but not for the tangential stresses in contacts.

The analysis testified the favorable effect of the rationally designed bushing on the reduce of the rate of contact wear and, consequently, on the improvement of armament of roller cone drill bits durability. To improve the analytic estimations obtained the numerical analysis for the optimization by most durability criteria for the contacting objects should be used taking into consideration the model with distributed parameters by elastic-plastic deformation.

Key words: *pin-cone junction, frictional contact, energy dissipation, cyclic loading.*

Вступ. Удосконалення з'єднання вставних твердосплавних зубців із шарошкою з метою підвищення надійності озброєння бурових доліт – актуальне завдання вітчизняного галузевого машинобудування.

За даними Кершенбаума В.Я. [1] та ін. [2, 3] поширеними видами втрати озброєння є сколювання (30÷50%) та випадання (до 20%) вставних твердосплавних елементів.

У роботах [4, 5] для зменшення втрат твердосплавних вставок запропоновано зміну двокомпонентної конструкції з'єднання з натягом на трикомпонентну з регульованим підбором натягів на поверхнях спряження (рис. 1).

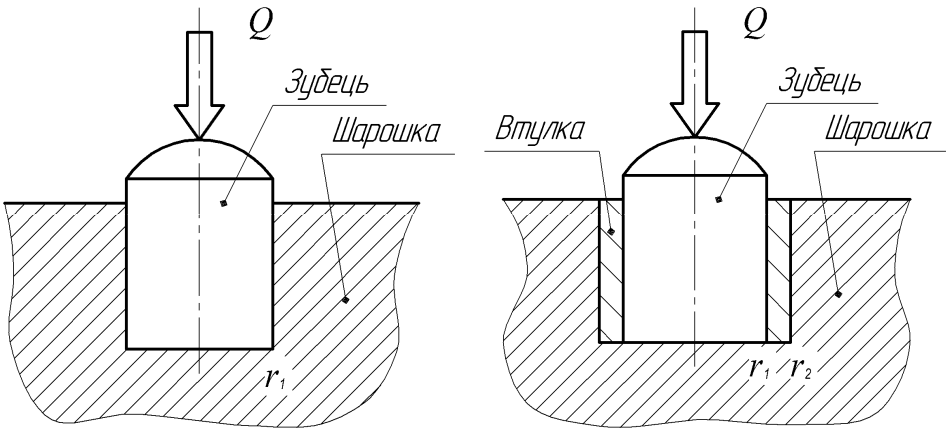

Рисунок 1. Схеми конструкцій з'єднання зубця з шарошкою
Figure 1. Schemes of design connection "pin-cone"

Як свідчать результати [6–8], використання так званого поліз'єднання з натягом дозволяє рознести концентрацію напружень на кілька поверхонь спряження і тим самим сприяти підвищенню несучої здатності конструкції. У праці [7] розв'язано задачі оптимізації обох варіантів з'єднань за критерієм максимальної несучої здатності. Обчислено натяги, які дають найменші значення еквівалентних напружень при обмежених силах зрушування або найбільші утримуючі сили за обмежених еквівалентних напружень. Порівнянням оптимальних проектів виявлено істотне підвищення несучої здатності трикомпонентного з'єднання проти двокомпонентного за умови монотонного статичного навантаження. Потребує подальшого дослідження поведінка з'єднань зубця з шарошкою під дією циклічно змінюваної сили.

Припустимо що циклічна довговічність дво- чи трикомпонентного спряження

зубця з шарошкою визначається, серед інших чинників, і можливістю мікропроковзування в номінально нерухомому з'єднанні, а, отже, і ймовірним механізмом фрикційного контактного зношування в режимі попереднього зміщення [9].

Описання циклічного деформування зубця в шарошці як системи з розподіленими параметрами призводить до трансцендентних співвідношень між силою, переміщенням та розмірами зони фрикційного проковзування і для зубця скінченної довжини допускає лише параметричне описання петлі конструкційного гістерезису [1, 11], тим паче, з урахуванням впливу ефекту Пуассона на перерозподіл контактних напружень [12]. Тому для якісного порівняльного аналізу мікропроковзувань у дво- та трикомпонентному з'єднаннях розглянемо найпростіші реологічні моделі з'єднань як систем із зосередженими параметрами (рис. 2), які принципово відображають суть конструкторських пропозицій.

Тут C_3 асоціюється із жорсткістю зубця на стиск; $C_в$, $C_ш$ пов'язані з жорсткістю на зсув відповідно об'єктів $r_1 \le r \le r_2$ та $r \ge r_2$; $T_i = -f_i \sigma_{r_i} S_i$ – граничні кулонівські сили зсуву на поверхнях; f_i – коефіцієнти тертя; σ_{r_i} – радіальні напруження на поверхнях $r = r_i$, $(i = 1, 2)$; S_i – площі поверхонь фрикційного контакту.

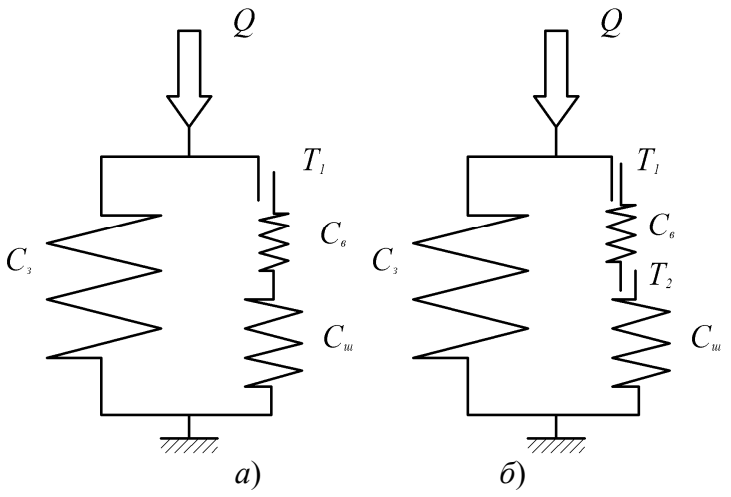

Рисунок 2. Реологічні моделі двокомпонентного (*а*) та трикомпонентного (*б*) з'єднань
Figure 2. Rheological model of two-component (*a*) and three-component(*b*) compounds

Докладніший аналіз наведених схем показує, що вони насправді еквівалентні одній реологічній моделі (рис. 3), в якій слід прийняти $C^{-1} = C_{\text{в}}^{-1} + C_{\text{ш}}^{-1}$, $T = T_1$ для двокомпонентної і $T = \min\{T_1, T_2\}$ для трикомпонентної конструкцій.

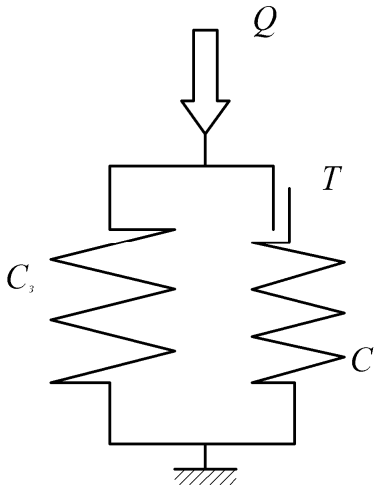

Рисунок 3. Підсумкова реологічна модель
Figure 3. Final rheological model

Зображенана рис. 3 комбінація елементів Гука та Сен-Венана допускає аналітичне описання фізичних співвідношень за будь-якої програми немотонного навантаження (Q, Δ).

Розглянемо пульсуючий віднульовий цикл $Q_{\min} \le Q \le Q_{\max}$, $Q_{\min} = 0$.

1. Навантаження ($0 \le Q \le Q_{\max}$):

$$Q = (C_з + C)\Delta,\ 0 \le Q \le Q_*;$$
$$Q = C_з\Delta + T,\ Q_* \le Q \le Q_{\max}. \qquad (1)$$

2. Розвантаження ($Q_{\max} \ge Q \ge 0$):

$$(Q_{\max} - Q)/2 = (C_з + C)(\Delta_{\max} - \Delta)/2,\ Q_{\max} \ge Q \ge Q_{\max} - 2Q_*;$$
$$(Q_{\max} - Q)/2 = C_з(\Delta_{\max} - \Delta)/2 + T,\ Q_{\max} - 2Q_* \ge Q \ge 0. \qquad (2)$$

3. Повторне навантаження ($0 \le Q \le Q_{\max}$):

$$(Q - 0)/2 = (C_з + C)(\Delta - \Delta_{\min})/2,\ 0 \le Q \le 2Q_*;$$
$$(Q - 0)/2 = C_з(\Delta - \Delta_{\min})/2 + T,\ 2Q_* \le Q \le Q_{\max}. \qquad (3)$$

Тут $Q_{\max}/2$ – амплітуда циклу; Δ – переміщення, $\Delta_{\max} = \Delta\big|_{Q=Q_{\max}}$, $\Delta_{\min} = \Delta\big|_{Q=0}$; $Q = (1 + C_з/C)T$.

Співвідношення (2), (3) для розвантаження та повторного навантаження отримані із формул (1) для активного навантаження на підставі принципу Мазінга [13].

Розсіяна енергія у фрикційному контакті визначається як площа петлі конструкційного гістерезису

$$\Psi = \frac{2Q_*}{C_з(1 + C_з/C)}\left(\frac{1}{2}Q_{\max} - Q_*\right)H\left(\frac{1}{2}Q_{\max} - Q_*\right), \qquad (4)$$

де $H(...)$ – функція Гевісайда.

Із формули (4) бачимо, що величина розсіяної енергії, а, отже, і пропорційної до неї швидкості контактного зношування [9] істотно залежить від порогового значення

$Q_* = (1 + C_з / C)T$.

Типові діаграми навантаження для обох конструкцій наведено на рис. 4, а на рис. 5 порівняно величини розсіяної за цикл енергії.

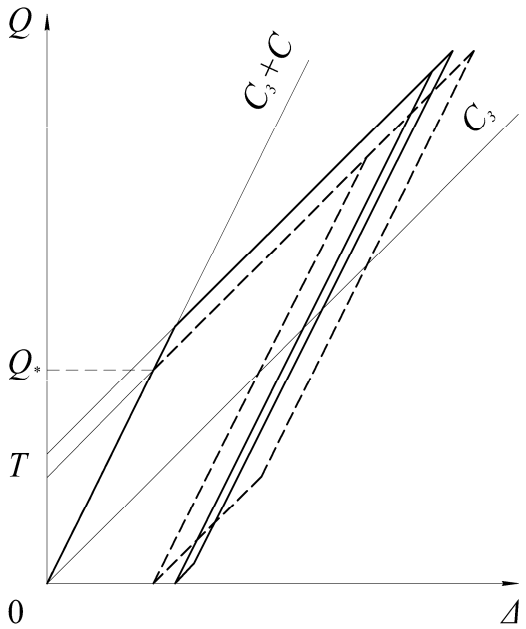

Рисунок 4. Діаграми циклічного деформування:

– – – – – двокомпонентне з'єднання;

——— – трикомпонентне з'єднання

Figure 4. Diagrams of cyclic strain:

– – – – – two-component compounds coupling;

——— – three-component coupling.

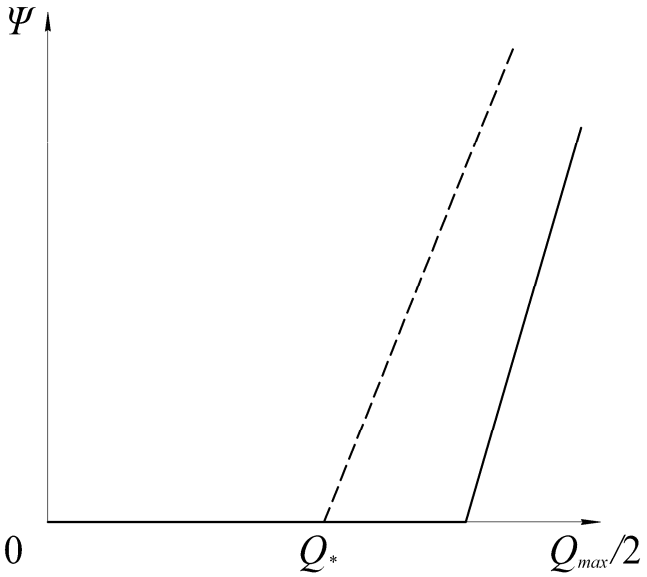

Рисунок 5. Робота сил тертя при мікропроковзуванні:

– – – – – двокомпонентне з'єднання;

——— – трикомпонентне з'єднання

Figure 5. The work of friction forces under microslip:

– – – – – two-component coupling;

——— – three-component coupling.

Порівняємо значення Q_* для проектів двокомпонентного та трикомпонентного з'єднань, оптимальних за найбільшою несучою здатністю при одноактному навантаженні [7].

Нехай шарошка і втулка виготовлені з однакового матеріалу з модулем Юнга E, коефіцієнтом Пуассона ν та допустимим напруженням $[\sigma]$; нехай іще $r_2/r_1 = k^{-1} = 1.2$, $f_1 = f_2 = 0.1$, $\nu = 0.3$. Тоді за результатами праці [7] оптимальний безрозмірний натяг для двох тіл

$$x_1^* = \frac{E}{(1+\nu)[\sigma]}\frac{\delta_1}{r_1} = 0.574$$

дає максимальне значення допустимого навантаження

$$Q = 0.057[\sigma]S_1,$$

а оптимальні безрозмірні натяги для трьох тіл

$$x_1^* = \frac{E}{(1+\nu)[\sigma]}\frac{\delta_1}{r_1} = 0.464, \quad x_2^* = \frac{E}{(1+\nu)[\sigma]}\frac{\delta_2}{r_2} = 0.282$$

дають найбільше значення сили

$$Q = 0.074[\sigma]S_1.$$

Порівняння $0.074/0.057 \approx 1.3$ свідчить про $30\,\%$-ий виграш трикомпонентної конструкції у несучій здатності.

Обчислимо безрозмірні значення порогових T:
для двох тіл

$$t = \frac{T}{[\sigma]S_1} = f\frac{|\sigma_{r_1}(r_1)|}{[\sigma]} = fx_1^* = 0.1\cdot 0.574 = 0.0574;$$

для трьох тіл

$$t_1 = \frac{T_1}{[\sigma]S_1} = f\frac{|\sigma_{r_1}(r_1)|}{[\sigma]} = f\left(x_1^* + x_2^*\right) = 0.1\cdot(0.464 + 0.282) = 0.0746,$$

$$t_2 = \frac{T_2}{[\sigma]S_1} = \frac{T_2}{[\sigma]S_2}\frac{S_2}{S_1} = f\frac{|\sigma_{r_2}(r_2)|}{k[\sigma]} = \frac{f}{k}\left(k^2 x_1^* + \left(\frac{1+\nu}{2} + k^2\frac{1-\nu}{2}\right)x_2^*\right) =$$

$$= 1.2\cdot 0.1\left(\frac{0.464}{1.2^2} + \left(0.65 + \frac{0.35}{1.2^2}\right)0.282\right) = 0.0689.$$

Отож, для двокомпонентної конструкції $t = 0.0574$, для трикомпонентної конструкції $t = \min\{t_1, t_2\} = t_2 = 0.0689$ (проковзування відбудеться по межі $r = r_2$). Порівняння цих величин $0.0689/0.0574 = 1.2$ свідчить про $20\,\%$ зростання порога T, а, отже і Q_* у трикомпонентній моделі.

Висновки. Якщо несуча здатність оптимальної трикомпонентної конструкції щодо одноактного навантаження вища від такої ж для двокомпонентної конструкції на 30%, то порогове значення зусиль зрушування при мікропроковзуванні для конструкції із втулкою лише на 20% перевищує значення T для конструкції без втулки. Дещо менший виграш пояснюємо тим, що оптимальна трикомпонентна конструкція є

рівноміцною за еквівалентними напруженнями, але не за дотичними напруженнями в контактах.

Тим не менше, важливим є наступне. Пропонована конструкція з оптимально підібраними натягами на двох поверхнях забезпечує також і менше розсіювання енергії при циклічному навантаженні, а, отже, і меншу швидкість контактного зношування, що сприятиме підвищенню довговічності озброєння доліт. Уточнення отриманих аналітичних оцінок доцільно проводити числовим аналізом задач оптимізації за критерієм найбільшої довговічності, враховуючи пружно-пластичне деформування контактуючих об'єктів з розподіленими параметрами.

Conclusions. Thus, if the carrying capacity for the optimal design of three-component construction under one-act load is 30% higher than the same for the two-component construction, the threshold value of microslip start moving effort for design with a sleeve is only in 20% higher than the value for construction without a sleeve. Somewhat smaller gains attributed to the three-component optimal design we explain by the fact that constructions are optimized for strength balance by equivalent stresses, but not by the tangential stresses in contacts.

However, it is important that: the proposed construction of optimally chosen to tighten on the two surfaces also provides less energy dissipation during cyclic loading and consequently lower rate of contact surface wear, which will increase the longevity of drill bits armament. Improvement of the obtained here analytions estimates should be conducted by a numerical analysis for the optimization by criteria of the most durability taking into consideration an elastic-plastic deformation of contacting objects with distributed parameters.

Список використаної літератури

1. Шарошечные долота: Международный транслятор-справочник: Международная инженерная энциклопедия [Текст]; под науч. ред. В.Я. Кершенбаума, А.В. Торгашова, А.В. Торгашова. – М.: Недра, 2000. – 245 с.
2. Крилов, К.А. Повышение эффективности и долговечности буровых долот [Текст] / К.А. Крылов, О.А. Стрельцова. – М.: Недра, 1983. – 206 с.
3. Петрина, Ю.Д. Підвищення надійності з'єднання "шарошка–зубок" в тришарошкових бурових долотах [Текст] / Ю.Д. Петрина, Р.С. Яким, Т.Б. Пасинович // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2007. – № 2 (23). – С. 67–69.
4. Корнута, В.А. Вдосконалення твердосплавного озброєння шарошок на основі аналізу роботи з'єднань з натягом [Текст] / В.А. Корнута, О.Т. Драганчук // Нафтогазова енергетика. – 2009. – № 1 (10). – С. 5–15.
5. Пат. 44935 U Україна, МПК (2009) E 21 B 10/46. Робочий орган інструменту з твердосплавними вставками / Корнута В.А., Драганчук О.Т., Корнута О.В.; заявник та патентовласник Івано-Франківський нац. техн. ун-т нафти і газу. – № u200903171; заявл. 03.04.2009; опубл. 26.10.2009, Бюл. № 20.
6. Корнута, В.А. Визначення впливу способу збирання з'єднань з натягом "твердосплавна вставка–матриця" на їх несучу здатність [Текст] / В.А. Корнута // Сб. трудов "Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника, технология его изготовления и применения". – Вып. 13. – Киев, ИСМ им. В.Н. Бакуля НАН Украины, 2010. – 560 с. – С. 131–137.
7. Корнута, В.А. Порівняльна оцінка несучої здатності дво- та трикомпонентного з'єднань "шарошка–твердосплавна вставка" [Текст] / В.А. Корнута, І.П. Шацький // Розвідка і розробка нафтових і газових родовищ. – 2010. – №1 (34). – С. 101–105.

8. Корнута, В.А. Моделювання напружено-деформованого стану нової конструкції з'єднання "корпус (шарошка) – твердосплавна вставка" [Текст] / В.А. Корнута // Науковий вісник Івано-Франківського нац. техн. ун-ту нафти і газу. – 2009. – № 4 (22). – С. 101–109.
9. Крагельский, И.В. Основы расчетов на трение и износ [Текст] / И.В. Крагельский, М.Н. Добычин, В.С. Комбалов. – М.: Машиностроение, 1977. – 528 с.
10. Конструкционное демпфирование в неподвижных соединениях [Текст] / Н.Г. Калинин, Ю.А. Лебедев, В.И. Лебедева и др. – Рига: Изд-во АН Латв. ССР, 1960. – 170 с.
11. Пановко, Я.Г. Механика деформируемого твердого тела: современные концепции, ошибки и парадоксы [Текст] / Я.Г. Пановко. – М.: Наука, 1985. – 288 с.
12. Попадюк, І.Й. Механіка фрикційного контакту оболонок з деформівним заповнювачем [Текст] / І.Й. Попадюк, І.П. Шацький, В.М. Шопа. – Івано-Франківськ: Факел, 2003. – 180 с.
13. Матвеев, В.В. Демпфирование колебаний деформируемых тел [Текст] / В.В. Матвеев. – К.: Наук. думка, 1985. – 264 с.

Отримано 17.04.2012