

**Мисліборський В.В.,  
Костогриз С.Г.**

Хмельницький національний університет,  
м. Хмельницький, Україна  
E-mail: mvovka13@gmail.com

**СИСТЕМАТИЗАЦІЯ ТА АНАЛІЗ  
ФАКТОРІВ ВПЛИВУ НА ТАНГЕНЦІАЛЬНУ  
ЖОРСТКІСТЬ НОМІНАЛЬНО  
НЕРУХОМОГО ФРИКЦІЙНОГО КОНТАКТУ**

УДК УДК 621.891:620.194

Виявлені системно пов'язані фактори та параметри, що формують початкову тангенціальну жорсткість контакту. Це дозволило встановити компактну аналітичну залежність початкової тангенціальної жорсткості ННФК від основних факторів і параметрів, що впливають на її формування.

**Ключові слова:** номінально нерухомий фрикційний контакт(ННФК), коефіцієнт запасу зчеплення, пружно-пластичний контакт, в'язко - пружний контакт, тангенціальна жорсткість ННФК, параметр пластичності контакту, коефіцієнт розсіювання енергії в контактї, коефіцієнт в'язкості.

### Вступ

В роботі [1] В.І. Максак встановив аналітичні залежності для попереднього зміщення та податливості номінально нерухомого фрикційного контракту при зсуві його елементів, тобто при тангенціальному навантаженні та подав загальний якісний аналіз впливу деяких факторів на початкову податливість, а відтак, і на початкову жорсткість контакту. Зокрема, показано, що початкова тангенціальна жорсткість ННФК не залежить від коефіцієнта тертя, а залежить від геометричних, механічних характеристик контактних поверхонь і сили стискування елементів контакту. Однак, більш-менш детальний кількісний аналіз впливу різних факторів, що відносяться до фізико-механічних характеристик елементів контакту, характеристик навантаження нормальною і тангенціальною силами в роботі [1], на жаль, відсутній. Такий аналіз дуже потрібний для виявлення тих факторів, спрямований вплив на які дозволить також спрямовано впливати на жорсткість та інші реологічні характеристики ННФК. Саме цим обумовлена необхідність аналізу початкової тангенціальної жорсткості ННФК на основі залежностей, які одержані в роботі [1] та їх перетворень до зручного для аналізу вигляду, які зроблені нами.

### Мета і постановка задачі

Метою даної роботи є виявлення та дослідження системи головних чинників, які обумовлюють формування пружних властивостей номінально нерухомого фрикційного контакту (ННФК). Важливі задачі, які необхідно було вирішити в роботі:

1. Здійснити аналіз формування пружних властивостей ННФК при деформуванні зсувом на основі досліджень, виконаних раніше іншими авторами, та впливу системи різних факторів на його тангенціальну жорсткість.

2. Встановити аналітичну залежність для тангенціальної жорсткості ННФК, яка б розкривала вплив на неї різних факторів і була б зручною для інженерного використання.

### Виклад матеріалів досліджень

В роботі [1] початкова тангенціальна жорсткість ННФК представлена виразом:

$$C = \frac{(2\nu + 1)(1 - \mu)nn}{2\chi\epsilon h} q. \quad (1.1)$$

Безпосередньо аналізувати цю залежність недоцільно, оскільки в ній за величиною  $\epsilon$ , що є відносним зближенням контактуючих поверхонь під дією стискувальної сили, ховається ціла низка інших величин, що ілюструє формула (1.2).

$\epsilon^*$  – відносне зближення контактуючих поверхонь. Відповідно  $\epsilon^*$  за Максаком В.І.:

$$\epsilon^* = \left[ \frac{\pi n_\delta^{3/2} (1 - \mu) (r_{\text{ноз}} + r_{\text{нон}})^{1/2} N}{1,88 b K_2 h_{\text{max}}^{1/2} G A_c} \right]^{\frac{2}{2\nu+1}}, \quad (1.2)$$

де  $n_\delta$  – коефіцієнт, що характеризує контакт [2];

$N$  – зусилля стиску (нормальне зусилля);

$K_2$  – коефіцієнт, який залежить від  $\nu_1$  та  $\nu_2$  [3];

$A_c$  – контурна площа контакту;

$h_{\max}$  – максимальна висота нерівностей;

$G$  – модуль зсуву;

Враховуючи це, зведемо вираз початкової тангенціальної жорсткості до більш зручного для його аналізу вигляду з позиції виявлення впливу на неї основних факторів, відображених на рис. 1.1, що характеризують властивості і стан навантаження ННФК.

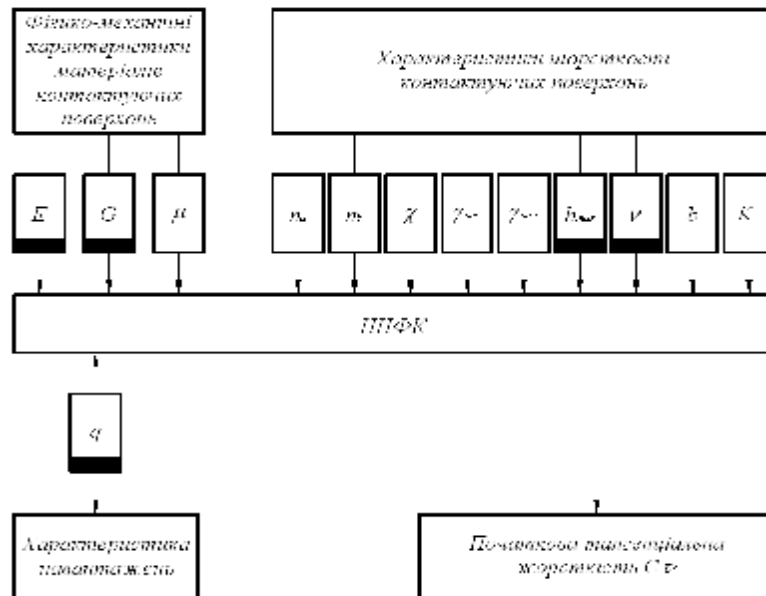


Рис. 1.1 – Зведена система факторів та параметрів, які визначають механізм і формування початкової тангенціальної жорсткості контакту на основі моделі В.І. Максака [1]

Для цього підставимо вираз (1.2) у формулу (1.1) і, здійснивши елементарні перетворення, отримаємо:

$$C_{\tau_0} = \frac{(2\nu + 1)n_a}{2\chi} \left[ \frac{1,67(r_{\text{повз}} + r_{\text{нон}})^{1/2} h_{\max}^{\nu}}{bK_2 G \eta_c} \right]^{\frac{-2}{2\nu+1}} \left[ (1 - \mu)n_8 q \right]^{\frac{2\nu-1}{2\nu+1}}, \quad (1.3)$$

де  $\eta_c = \frac{A_c}{A}$  – відносна контурна площа контакту.

На рис. 1.2 зображені розраховані за формулою (1.3) залежності початкової тангенціальної жорсткості контакту від номінального тиску в контакті двох сталевих (сталь 45 покращена) поверхонь при різних характеристиках якості поверхонь.

Аналіз цих графіків дає підставу стверджувати, що початкова тангенціальна жорсткість  $C_{\tau_0}$  зростає зі збільшенням номінального тиску в контакті. Було б помилкою вважати, що ця залежність близька до прямо пропорційної залежності. Темп зростання жорсткості зі збільшенням номінального тиску для всіх поданих на рис. 1.2 випадків найвищий у діапазоні контактного тиску  $0 \leq g \leq 20$  МПа, після чого він поступово зменшується і наближається майже до постійного значення.

Гамма кривих початкової тангенціальної жорсткості контакту, зображена на рис. 1.2, побудована для набору фіксованих значень параметра опорної кривої профілю контактних поверхонь. Їх аналіз показує, що вплив параметра  $\nu$  опорної кривої поверхні на початкову тангенціальну жорсткість контакту досить виразний. Верхні значення початкової тангенціальної жорсткості відповідають найменшому із практично можливих для реалізації значень параметра опорної кривої нерівностей профілю  $\nu = 2,0$ , тобто тій ситуації, коли якість обробки поверхні підвищується шляхом електрохімічної та інших методів доводки контактних поверхонь.

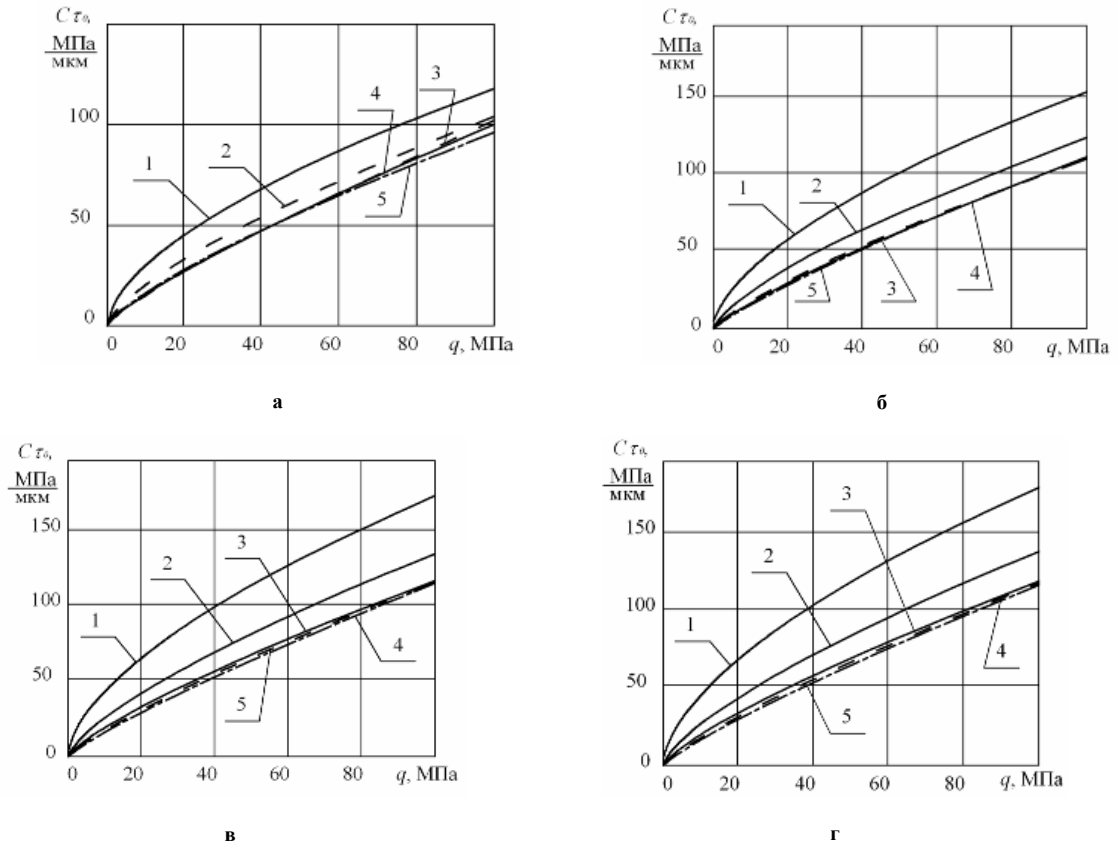


Рис. 1.2 – Залежність початкової тангенціальної жорсткості  $C_{\tau_0}$

від номінального тиску в контакті:

а –  $\eta_c = 0,25$ ; б –  $\eta_c = 0,5$ ; в –  $\eta_c = 0,7$ ; г –  $\eta_c = 0,8$ ;

1 –  $\nu = 2,0$ ; 2 –  $\nu = 3,0$ ; 3 –  $\nu = 4,0$ ; 4 –  $\nu = 5,0$ ; 5 –  $\nu = 6,0$ .

Матеріал елементів контакту – сталь 45 покращена.

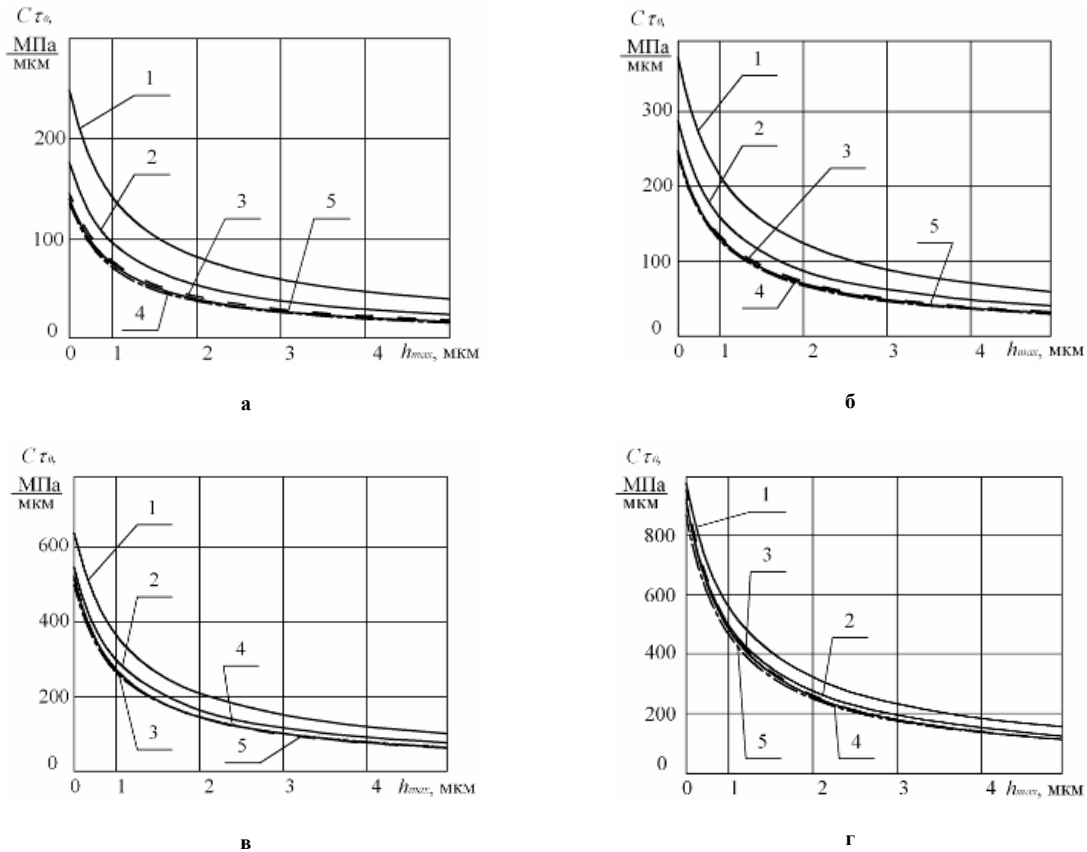
Характеристика нерівностей поверхні:

$n_a = 1,013$ ;  $n_b = 0,987$ ;  $\chi = 1,0$ ;  $\mu = 0,3$ ;  $r_{повз} = 10$ ;  $r_{пол} = 100$ ;  $h_{max} = 5$  мкм

На рис. 1.3 зображені залежності початкової тангенціальної жорсткості контакту від максимальної висоти нерівностей  $h_{max}$  площин контакту. Вона виявляє виражене зменшення початкової тангенціальної жорсткості контакту зі збільшенням максимальної висоти нерівностей. Особливо помітно жорсткість зменшується із зростанням  $h_{max}$  у діапазоні від 0,5 мкм до 1,5 мкм. Подальше збільшення максимального значення висоти мікронерівностей має помітно менший вплив, ніж у попередньому діапазоні і він монотонно зменшується. В цілому можна дійти висновку, що збільшення максимальної висоти нерівностей призводить до зменшення тангенціальної жорсткості ННФК. Вплив  $h_{max}$  на тангенціальну жорсткість контакту посилюється із збільшенням відносної контурної площі контакту  $A_c$ , яка характеризується параметром  $\eta_c$ .

Вплив зміни модуля пружності другого роду  $G$  матеріалів контактних елементів на пружні властивості контакту ілюструє рис. 1.4. Зростання модуля пружності другого роду однозначно призводить до збільшення майже за прямою пропорційністю початкової тангенціальної жорсткості контакту. Це одна із основних фізико-механічних характеристик контактних поверхонь, зміна якої суттєво впливає на зміну тангенціальної жорсткості контакту при всіх можливих значеннях номінального тиску та параметра опорної кривої профілю.

Найвищий темп зростання тангенціальної жорсткості при зміні модуля пружності другого роду виявляється у контактних парах із найменшим значенням параметра опорної кривої профілю. Якщо прослідкувати це зростання при тих же умовах, але приймаючи  $\nu = 6,0$ , то тангенціальна жорсткість зростає з 56 МПа/мкм до 64 МПа/мкм, або тільки на 14%. Тобто, із збільшенням параметра  $\nu$  темп зростання жорсткості при зміні модуля пружності зменшується.



**Рис. 1.3 – Залежність початкової тангенціальної жорсткості  $C_{\tau_0}$  від максимальної висоти мікронерівностей  $h_{\max}$  контактуючих профілів елементів контакту:**  
**а –  $q = 10$  МПа; б –  $q = 20$  МПа; в –  $q = 50$  МПа; г –  $q = 100$  МПа;**  
**1 –  $\nu = 2,0$ ; 2 –  $\nu = 3,0$ ; 3 –  $\nu = 4,0$ ; 4 –  $\nu = 5,0$ ; 5 –  $\nu = 6,0$ .**  
**Матеріал елементів контакту – сталь 45 покращена.**  
**Характеристика нерівностей поверхні:**  
 **$n_a = 1,013$ ;  $n_\delta = 0,987$ ;  $\chi = 1,0$ ;  $\mu = 0,3$ ;  $r_{\text{нов}} = 10$ ;  $r_{\text{пол}} = 100$ ;  $h_{\max} = 5$  мкм**

Так, при зростанні модуля пружності другого роду з  $1,17 \cdot 10^4$  до  $2,34 \cdot 10^4$  МПа або майже у двічі, тангенціальна жорсткість контакту зростає з 79 МПа/мкм до 104 МПа/мкм або на 31,6 % при  $\nu = 2,0$  (рис. 1.4, в).

Збільшення відносної контурної площі контакту (рис. 1.5) призводить до монотонного зростання тангенціальної жорсткості зі змінним темпом, який при всіх фіксованих значеннях номінального тиску в контакті та параметра опорної кривої профілю поступово спадає зі збільшенням контурної площі контакту. Так, із збільшенням  $\eta_c$  в межах  $0,2 \leq \eta_c \leq 0,8$  (рис. 1.5, в) тангенціальна жорсткість підвищується з 72 МПа/мкм до 125 МПа/мкм або у 1,74 рази. При значеннях параметра опорної кривої мікропрофілю нерівностей  $\nu > 3$  його вплив на жорсткість при різних значеннях відносної контурної площі контакту відносно слабкий.

У роботі [1] отримана залежність для визначення попереднього зміщення  $\Delta$  у функції номінального дотичного напруження  $\tau$  в контакті:

$$\Delta = \frac{\chi f \varepsilon^* h_{\max}}{(1-\mu)n_a n_\delta} \left\{ 1 - \left[ 1 - \frac{\tau}{gf} \right]^{2\nu+1} \right\}. \quad (1.4)$$

Слід звернути увагу, що В.І. Максак не ставив собі за мету визначити характеристики, що відносяться до пластичних властивостей ННФК, однак на основі виразу (1.4) можна знайти аналітичні залежності для пружної та пластичної частини повного попереднього зміщення і, таким чином, підійти до визначення параметра пластичності. Пружна частина повного попереднього зміщення розраховується за формулою:

$$\Delta_{np} = \frac{qf}{C_{\tau_0}}. \quad (1.5)$$

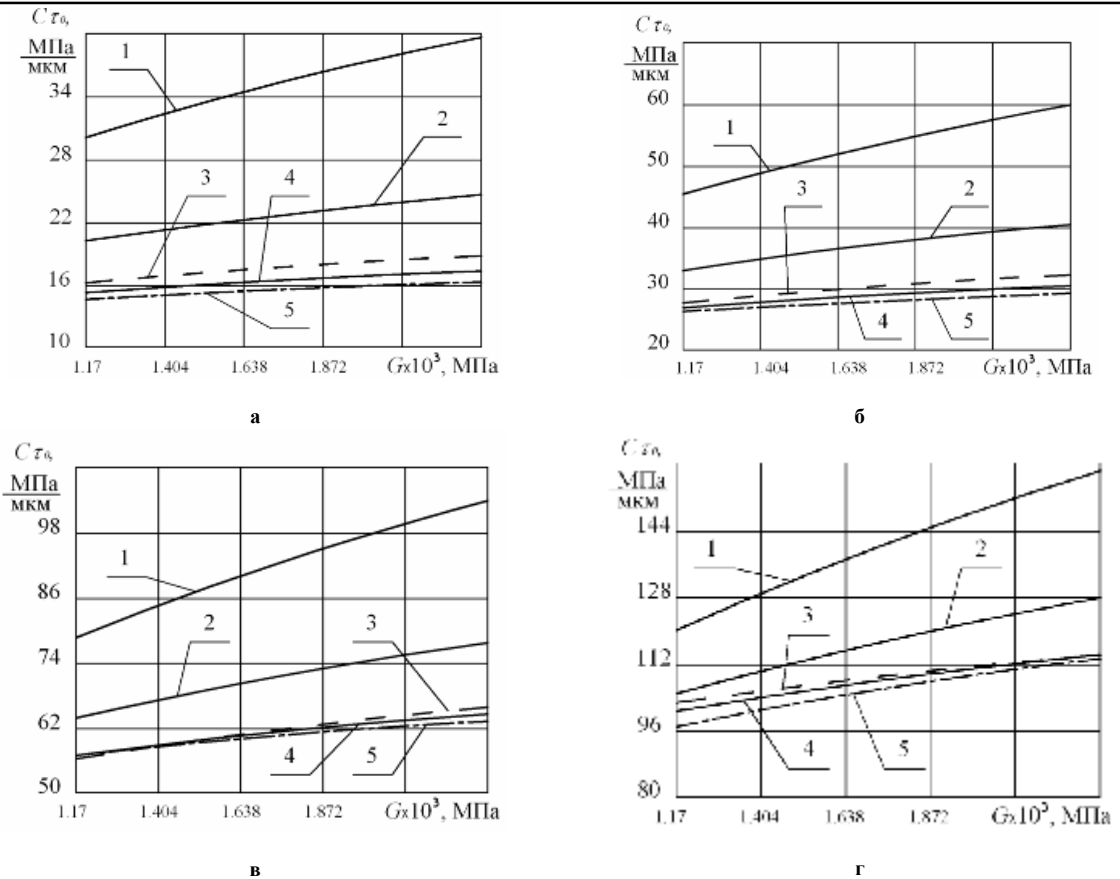


Рис. 1.4 – Залежність початкової тангенціальної жорсткості  $C_{\tau_0}$  від модуля пружності другого роду  $G$ :  
 а –  $q = 10$  МПа; б –  $q = 20$  МПа; в –  $q = 50$  МПа; г –  $q = 100$  МПа;  
 1 –  $\nu = 2,0$ ; 2 –  $\nu = 3,0$ ; 3 –  $\nu = 4,0$ ; 4 –  $\nu = 5,0$ ; 5 –  $\nu = 6,0$ .  
 Матеріал елементів контакту сталь – 45 покращена. Характеристика нерівностей поверхні:  
 $n_a = 1,013$ ;  $n_\delta = 0,987$ ;  $\chi = 1,0$ ;  $\mu = 0,3$ ;  $r_{новз} = 10$ ;  $r_{ном} = 100$ ;  $h_{max} = 5$  мкм

Підставляючи в неї вираз (1.1) для початкової тангенціальної жорсткості, отримаємо:

$$\Delta_{np} = \frac{2\chi\varepsilon^* h_{max} f}{(2\nu + 1)(1 - \mu)n_a n_\delta}. \quad (1.6)$$

Якщо підставити у вираз (1.4) залежність  $\tau = qf$ , що відповідає моменту вибору попереднього зміщення, коли починається фрикційне ковзання по всій номінальній площі контакту, одержимо вираз для повного попереднього зміщення  $\Delta = \Delta_{max}$ :

$$\Delta_{max} = \frac{\chi\varepsilon^* h_{max} f}{(1 - \mu)n_a n_\delta}. \quad (1.7)$$

Незворотна (пластична) частина повного попереднього зміщення дорівнює різниці між повним попереднім зміщенням і його пружною частиною:

$$\Delta_{nl} = \Delta_{max} - \Delta_{np}. \quad (1.8)$$

Підставляючи у формулу (1.8) вираз (1.6) та (1.7), одержимо:

$$\Delta_{nl} = \left( \frac{2\nu - 1}{2\nu + 1} \right) \frac{\chi\varepsilon^* h_{max} f}{(1 - \mu)n_a n_\delta}. \quad (1.9)$$

Використовуючи співвідношення [5]  $n = \Delta_{nl} / \Delta_{np}$  і підставляючи у нього вирази (1.6) і (1.9), отримаємо формулу для визначення параметра пластичності ННФК:

$$n = \frac{2\nu - 1}{2}, \quad (1.10)$$

де  $\nu = \nu_1 + \nu_2$ , а  $\nu_1$  та  $\nu_2$  відповідно параметри опорних кривих нерівномірностей поверхні першого та другого елементів контакту.

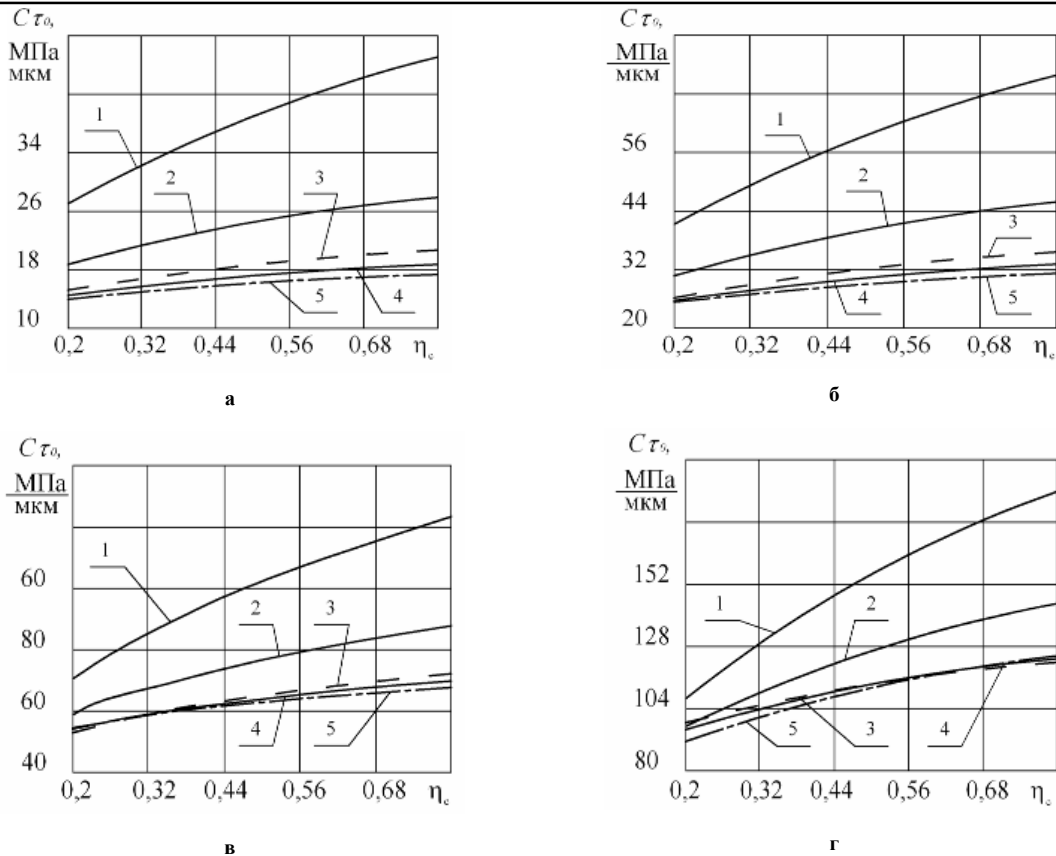


Рис. 1.5 – Залежність початкової тангенціальної жорсткості  $C\tau_0$  від відносної контурної площі контакту  $\eta_c$ :

а –  $q = 10$  МПа; б –  $q = 20$  МПа; в –  $q = 50$  МПа; г –  $q = 100$  МПа;

1 –  $\nu = 2,0$ ; 2 –  $\nu = 3,0$ ; 3 –  $\nu = 4,0$ ; 4 –  $\nu = 5,0$ ; 5 –  $\nu = 6,0$ .

Матеріал елементів контакту – сталь 45 покращена.

Характеристика нерівностей поверхні:

$n_a = 1,013$ ;  $n_b = 0,987$ ;  $\chi = 1,0$ ;  $\mu = 0,3$ ;  $r_{повз} = 10$ ;  $r_{пот} = 100$ ;  $h_{max} = 5$  мкм

На рис. 1.6 наведений графік залежності для визначення параметра пластичності ННФК, розрахованої за формулою (1.10), згідно з якою контакт матиме абсолютно пружні властивості ( $n = 0$ ) тільки при  $\nu = 0,5$ .

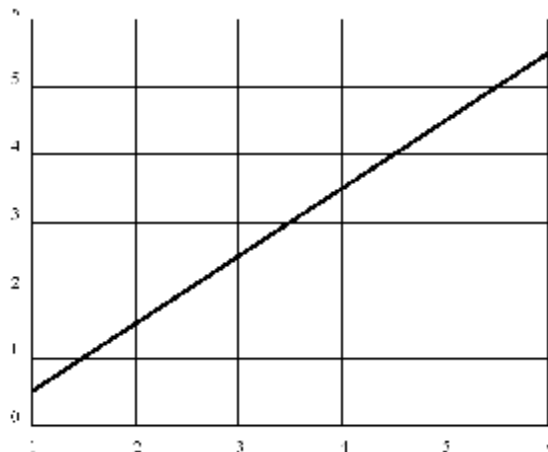


Рис. 1.6 – Залежність параметра пластичності  $n$  від параметра опорної кривої  $\nu$

Відомо, що досягнути якості контактних поверхонь з таким значенням параметра  $\nu$  опорної кривої мікропрофілю нерівностей практично неможливо. Використовуючи дані [4] про параметри опорних кривих мікронерівностей сталевих поверхонь для різних видів механічної розробки розраховуємо за формулою (1.10) і подамо у табл. 1.1 числові значення параметра пластичності  $n$  для контакту, утвореного двома такими поверхнями, враховуючи що  $\nu = 2\nu_1$ , де  $\nu_1$  – параметр опорної кривої однієї поверхні.

Числові значення параметра пластичності  $n$  для контакту

Вид механічної обробки	Клас шорсткості	$h_{\max}$ , мкм	$b$	$\nu_1$	$n$
Точіння	5	37	1,0	2,1	3,7
	8	4,7	2,0	1,6	2,7
Торцеве фрезерування	5	37	0,4	2,2	3,9
	7	8	0,6	1,4	2,3
Кругле шліфування	7	9,4	0,6	2,0	3,5
	10	1,2	2,0	1,9	3,3
Полірування	8	4,7	2,0	1,7	2,9
	10	1,2	3,5	1,5	2,5
Плоске шліфування	5	35	0,6	2,2	3,9
	9	2,4	2,3	1,6	2,7
Хонінгування	8	4,7	0,7	1,8	3,1
	11	0,6	2,5	1,6	2,7
Доводка площин	10	1,2	2,4	1,6	2,7
	13	0,15	4,5	1,1	1,7

Слід зазначити, що ці табличні дані стосовно параметра пластичності  $n$  цілком задовільно узгоджуються з результатами експериментальних даних, отриманих Костогризом С.Г. [5] для контактних пар, виготовлених із сталі 45 з обробкою шліфуванням до  $Ra = 0,25 \dots 1,6$ , в яких параметр пластичності перебував у межах від 1,82 до 3,85.

Те, що параметр пластичності виражений досить простою залежністю, яка враховує лише один, причому геометричний параметр якості поверхні  $V$  і зовсім не відображає вплив на нього фізико-механічних характеристик контактних поверхонь та умов навантаження, є досить несподіваним результатом. Але так само несподіваним є те, що реальні значення параметра пластичності, одержані експериментально [5], задовільно вкладаються у розрахункові за формулою (1.10) результати.

Обидва ці моменти є досить цікавими, оскільки спонукають до важливих роздумів. Перший з них може породжувати певний сумнів щодо визначення параметра пластичності тільки через параметр опорної кривої мікронерівностей контактних поверхонь при відсутності впливу на нього інших факторів. Однак останнє обумовлене особливостями моделі шорстких контактних поверхонь, яку запропонував і використав В.І. Максак, зокрема моделі шорсткої поверхні у вигляді набору однакових еліпсоїдних сегментів, розподілених по висоті за кривою опорної поверхні. Крім того, при розгляді механізму попереднього зміщення він зробив припущення, що коефіцієнт тертя на всіх виступах однаковий, а також, що ковзання по всій номінальній площі контакту не почнеться до того моменту, поки не вступить в ковзання найбільш стиснутий виступ. Якби в моделі був передбачений випадковий розподіл числових значень коефіцієнта тертя за виступами, то неминуче в такій моделі з певною вірогідністю були б випадки, коли найбільш стиснуті виступи в числі перших, а не останніх, проковзували в контакті. У такій моделі не можна було б не враховувати вплив на параметр пластичності співвідношення між питомою силою тертя та питомою зсувною силою, так званого запасу сили тертя.

Другий важливий момент відноситься до того, що в певному, порівняно широкому діапазоні зміни параметра опорної кривої мікронерівностей поверхонь, розрахункові значення параметра пластичності контакту задовільно узгоджуються з експериментальними даними.

Викладене дає підстави стверджувати про доцільність використання одержаної нами формули (2.15) для визначення параметра пластичності в діапазоні зміни параметра опорної кривої мікронерівностей  $\nu$  від 1,5 до 2,2 і за цим параметром на основі матеріалів досліджень Крагельського [6 - 11], М.Б. Дьомкіна [12 - 16], Рижова [17, 18] вибрати та застосувати методи механічної обробки контактних поверхонь, що фрагментарно представлені у таблиці 1.1.

Не дивлячись на те, що виявлена В.І. Максаком аналітична залежність для початкової жорсткості ННФК, яка в кінцевому вигляді перетворена нами і виражається формулою (1.3), дає цілком задовільні результати і в явному вигляді розкриває вплив різних факторів на жорсткість, що досить важливо для вирішення багатьох практичних задач, слід звернути увагу на те, що її використання в інженерній практиці пов'язане з певними труднощами. Це, в першу чергу, відноситься до використання у формулі (1.3) нестандартизованих параметрів  $b$ ,  $\nu$ ,  $h_{\max}$  шорсткості поверхні та до певних труднощів із встановленням коефіцієнта  $K_2$  за М.Б. Дьомкіним [13], а також із деякою невизначеністю з вибором параметра  $\eta_s$  – відносною контурної площі контакту.

В роботі [20] нами встановлена аналітична залежність для початкової тангенціальної жорсткості контакту:

$$c_{\tau_0} = \frac{Gq \left[ 5,25 - \ln \frac{2,22q}{Ey} \right]}{1,238ERa} \quad (1.13)$$

Якісний аналіз формули (1.13) показує, що початкова тангенціальна жорсткість прямо пропорційна відношенню  $G/E$ , та обернено пропорційна середньоарифметичному відхиленню профілю поверхонь  $Ra$ , а також перебуває у близькій до прямо пропорційної залежності від номінального тиску в контакті  $q$ . Більш детальний аналіз впливу кожного з цих параметрів на тангенціальну жорсткість контакту виявляє наступне.

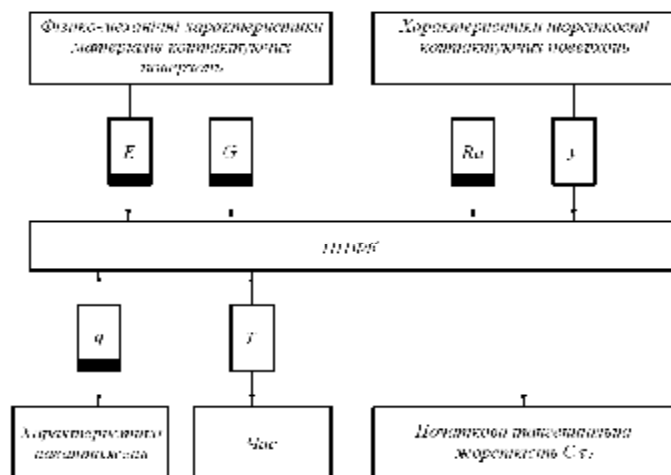


Рис. 1.7 – Зведена система факторів та параметрів, що визначають механізм формування початкової тангенціальної жорсткості контакту

Одержана формула (1.13) в явному вигляді розкриває механізм впливу на початкову тангенціальну жорсткість контакту трьох основних чинників: номінального тиску в контакті  $q$ , відношення модуля пружності другого роду  $G$  матеріалу контактних поверхонь до модуля пружності першого роду  $E$ ; середнього арифметичного відхилення профілю поверхонь  $Ra$ .

Виходячи з цього, спрямований вплив на початкову тангенціальну жорсткість  $C_{\tau_0}$  контакту можна здійснювати як окремо за кожним з цих факторів, наприклад за номінальним тиском, так і комплексно, за всією групою факторів, що показано на рис. 1.7.

Розглянемо, наскільки отримана нами формула (1.13) для початкової тангенціальної жорсткості реально відображає вплив на неї виявлених факторів. Для цього порівнюємо результати розрахунку початкової тангенціальної жорсткості контакту за формулою (1.3), експериментальними даними та розрахунку за формулою (1.13), і зокрема, залежності початкової тангенціальної жорсткості контакту  $C_{\tau_0}$  від номінального тиску в контакті  $q$ . Результати порівняльних розрахунків ілюструє рис. 1.8.

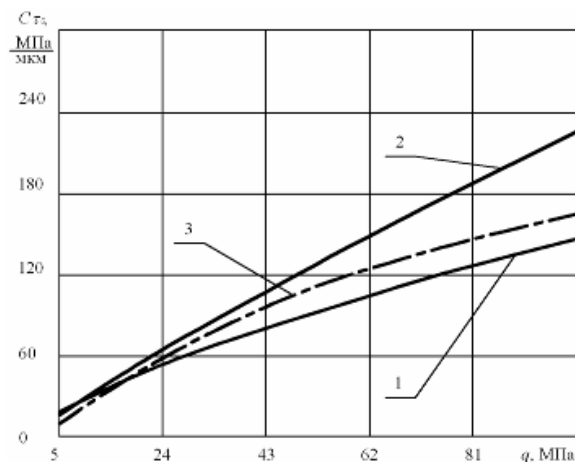


Рис. 1.8 – Залежність початкової тангенціальної жорсткості контакту  $C_{\tau_0}$ , розраховані за формулами: 1 – (1.3); 2 – (1.13); 3 – експериментальна крива. Розрахунки здійснено для ННФК сталевих поверхонь  $Ra = 0,63$  мкм;  $\nu = 3,0$ ;  $\eta_c = 0,7$ ;  $b = 4$ ;  $n_a = 1,013$ ;  $n_b = 0,987$

Як видно з рисунка (1.8), у трьох випадках залежність початкової тангенціальної жорсткості контакту від номінального тиску в контакті мають монотонно зростаючий характер, близький до прямо пропорційної залежності. Розбіжності між результатами, розрахованими за формулами (1.3) та (1.13) та експериментальною кривою, перебувають у межах від 12 % до 18 %, причому із збільшенням номінально-



го тиску в контактi відбувається монотонне збільшення розбіжностей у результатах розрахунку. Вищі числові значення початкової тангенціальної жорсткості контакту дають розрахунки за формулою (1.13) порівняно з результатами, отриманими за формулою (1.3). Таким чином, це порівняння дає підстави вважати, що формула (1.13) для розрахунку початкової тангенціальної жорсткості ННФК дає близькі до реальних числові значення, які задовільно співставляються (корелюють) з результатами, як раніше виконаних наукових досліджень іншими авторами [1], так і експериментальними результатами, які отримані нами. Разом з тим, формула (1.13) набагато компактніша за формулу (1.3) і тому є зручною для використання в інженерних розрахунках.

### Висновки

Виявлена система факторів та параметрів, що визначають формування початкової тангенціальної жорсткості контакту. Встановлена компактна аналітична залежність початкової тангенціальної жорсткості ННФК від основних факторів і параметрів, що впливають на її формування.

### Література

1. Максак В. И. Предварительное смещение и жесткость механического контакта / В. И. Максак. – М. : Наука, 1975. – 60 с.
2. Расчеты на прочность в машиностроении / С. Д. Пономарев, В. Л. Бидерман, К. К. Лихарев [и др.]. – М. : Машгиз, 1958. – Т 2.
3. Демкин Н. Б. Контактное шероховатых поверхностей / Н. Б. Демкин. – М. : Наука, 1970. – 227 с.
4. Демкин Н. Б. Экспериментальное и теоретическое исследование контактирования шероховатых поверхностей применительно к проблемам внешнего трения : автореф. дис... канд. техн. наук / Н. Б. Демкин. – М., 1968.
5. Костогрыз С. Г. Механика вибрационного трения в номинально неподвижном фрикционном контакте : дис... д-ра техн. наук : 05.02.04 “Трение и износ” / Костогрыз Сергей Григорьевич. – Хмельницкий, 1995. – 367 с.
6. Крагельский И. В. Анализ сухого трения скольжения на основе рассмотрения малых движений в зоне контакта / И. В. Крагельский, В. С. Щедров // Журнал технической физики. – 1948. – Т. XVII, № 6. – С. 48–61.
7. Крагельский И. В. О природе контактного предварительного смещения твердых тел / И. В. Крагельский, Н. М. Михин // Доклады Академии наук СССР. – 1963. – Т. 153, № 1. – С. 78–81.
8. Крагельский И. В. О скачках при трении / И. В. Крагельский, А. Ю. Ишлинский // Журнал технической физики. – 1944. – Т. XIV, Вып. 4–5. – С. 276–283.
9. Крагельский И. В. Основы расчетов на трение и износ / И. В. Крагельский, М. Н. Добычин, В. С. Комбалов. – М. : Машиностроение, 1977. – 526 с.
10. Крагельский И. В. Трение волокнистых веществ / И. В. Крагельский. – М. – Л. : Гизлегпром, 1941. – 126 с.
11. Крагельский И. В. Трение и износ / И. В. Крагельский. – М. : Машиностроение, 1968. – 480 с.
12. Демкин Н. Б. Исследование реологических свойств контакта шероховатых поверхностей / Н. Б. Демкин, П. Д. Нетягов // Изв. вузов. Машиностроение. – 1978. – № 3. – С. 18–24.
13. Демкин Н. Б. Контактное шероховатых поверхностей / Н. Б. Демкин. – М. : Наука, 1970. – 227 с.
14. Демкин Н. Б. Предварительное смещение при упругом контакте твердых тел / Н. Б. Демкин, И. В. Крагельский // ДАН СССР. – 1969. – Т. 186, № 4. – С. 812–814.
15. Демкин Н. Б. Развитие теории фрикционного контакта / Н. Б. Демкин // Трение и износ. – 1992. – Т. 13. – С. 67–71.
16. Демкин Н. Б. Экспериментальное и теоретическое исследование контактирования шероховатых поверхностей применительно к проблемам внешнего трения : автореф. дис... канд. техн. наук / Н. Б. Демкин. – М., 1968.
17. Рыжов Э. В. Контактная жесткость деталей машин / Э. В. Рыжов. – М. : Машиностроение, 1966.
18. Рыжов Э. В. Основы расчета стыковых поверхностей деталей машин на контактную жесткость / Э. В. Рыжов. – М. : Машгиз, 1962.
19. Костогрыз С. Г. Тангенціальна жорсткість та пластичність номінально нерухомого фрикційного контакту / С. Г. Костогрыз, О. В. Романішина, В. В. Мисліборський // Проблеми трибології. – 2001. – № 1. – С. 130–133.
20. Мисліборський В. В. Формування пружно-пластичних та в'язко-пружних властивостей номінально нерухомого фрикційного контакту : дис.. канд. техн. наук / В. В. Мисліборський. – Хмельницький, 2012.

Поступила в редакцію 30.09.2014

Misliborski V.V., Kostogriz S.G. **Systematization and analysis of factors effecting tangential hardness of nominal stationary friction contact.**

Tangential hardness of nominal stationary friction contact (NSFC), which characterizes its elastic properties under shifting has been analytically defined on the base of analysis of the research conducted on previous shifting in NSFC. It clearly identifies dependence of the initial tangential hardness on the three basic factors: nominal pressure in contact  $q$ , the ratio of the shear modulus  $G$  of contacting surfaces material to the Young's modulus  $E$ ; arithmetic mean deviation of surface profile  $Ra$ . Assuming all given above the conclusion can be made that direct effect on the initial hardness of the contact  $c_{\tau 0}$  can be performed by each of those factors separately, for an instance by nominal pressure, and by complex group of factors as well.

**Keywords:** nominal stationary friction contact (NSFC), friction force safety factor, elastoplastic contact, viscoelastic contact, tangential hardness of NSFC, contact plasticity parameter, energy dissipation factor in the contact, viscosity factor.

### References

1. Maksak V. I. Predvaritel'noe smeshhenie i zhestkost' mehanicheskogo. M. : Nauka, 1975. 60 s.
2. Raschety na prochnost' v mashinostroenii. S. D. Ponomarev, V. L. Biderman, K. K. Liharev [i dr.]. M. : Mashgiz, 1958. T 2.
3. Demkin N. B. Kontaktirovanie sherohovatykh poverhnostej. M. : Nauka, 1970. 227 s.
4. Demkin N. B. Jeksperimental'noe i teoreticheskoe issledovanie kontaktirovanija sherohova-tykh poverhnostej primenitel'no k problemam vneshnego trenija : avtoref. dis... kand. tehn. nauk.– M., 1968.
5. Kostogriz S. G. Mehanika vibracionnogo trenija v nominal'no nepodvizhnom frikcionnom kontakte : dis... d-ra tehn. nauk : 05.02.04 "Trenie i iznos". Hmel'nickij, 1995. 367 s.
6. Kragel'skij I. V. Analiz suhogo trenija skol'zhenija na osnove rassmotrenija malyh dvizhenij v zone kontakta. I. V. Kragel'skij, V. S. Shhedrov. Zhurnal tehnicheckoj fiziki. 1948. T. XVII, № 6. C. 48–61.
7. Kragel'skij I. V. O prirode kontaktного predvaritel'nogo smeshhenija tverdyh tel. I. V. Kragel'skij, N. M. Mihin. Doklady Akademii nauk SSSR. 1963. T. 153, № 1. S. 78–81.
8. Kragel'skij I. V. O skachkah pri trenii. I. V. Kragel'skij, A. Ju. Ishlinskij. Zhurnal tehnicheckoj fiziki. 1944. T. XIV, Vyp. 4–5. S. 276–283.
9. Kragel'skij I. V. Osnovy raschetov na trenie i iznos / I. V. Kragel'skij, M. N. Dobychin, V. S. Komalov. – M. : Mashinostroenie, 1977. – 526 s.
10. Kragel'skij I. V. Trenie voloknistykh veshhestv. M. – L. : Gizlegprom, 1941. 126 s.
11. Kragel'skij I. V. Trenie i iznos. M. : Mashinostroenie, 1968. 480 s.
12. Demkin N. B. Issledovanie reologicheskikh svojstv kontakta sherohovatykh poverhnostej. N. B. Demkin, P. D. Netjagov. Izv. vuzov. Mashinostroenie. 1978. № 3. S. 18–24.
13. Demkin N. B. Kontaktirovanie sherohovatykh poverhnostej. M. : Nauka, 1970. 227 s.
14. Demkin N. B. Predvaritel'noe smeshhenie pri uprugom kontakte tverdyh tel. N. B. Demkin, I. V. Kragel'skij. DAN SSSR. 1969. T. 186, № 4. S. 812–814.
15. Demkin N. B. Razvitie teorii frikcionnogo kontakta. Trenie i iznos. 1992. T. 13. S. 67–71.
16. Demkin N. B. Jeksperimental'noe i teoreticheskoe issledovanie kontaktirovanija sherohova-tykh poverhnostej primenitel'no k problemam vneshnego trenija : avtoref. dis... kand. tehn. nauk. M., 1968.
17. Ryzhov Je. V. Kontaktnaja zhestkost' detalej mashin. M. : Mashinostroenie, 1966.
18. Ryzhov Je. V. Osnovy rascheta stykovykh poverhnostej detalej mashin na kontaktuju zhest-kost'. M. : Mashgiz, 1962.
19. Kostogriz S. G. Tangencial'na zhorstkist' ta plastichnist' nominal'no neruhomogo frik-cijnogo kontaktu. S. G. Kostogriz, O. V. Romanishina, V. V. Mislibors'kij. Problemi tribologii. 2001. № 1. S. 130–133.
20. Mislibors'kij V. V. Formuvannja pruzhno-plastichnih ta v'jazko-pruzhnih vlastivostej nomi-nal'no neruhomogo frikciijnogo kontaktu : dis.. kand. tehn. nauk. Hmel'nic'kij, 2012.