

УДК 621.17:539.422

Ширяєв О. В., Буцукін В. В., Ширяєв І. А., Грицюк А. О., Коршунов Є. Г.

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОФІЛЮ КОНТАКТНОЇ ПОВЕРХНІ ПРИ ВИПРОБУВАННЯХ НА ОПІР КОНТАКТНОЇ ВТОМИ

Виконано порівняльний аналіз відомих досліджень розподілу контактних напружень по поверхні двох тіл. Показано, що задача визначення контактних напружень для тіл, як з різними, так і з однаковими пружними характеристиками, в кінцевому підсумку зводиться до відшукування в похідних від функцій, що описують поверхні і вирішення інтегрального рівняння типу Коші. Наведено дані про розподіл напруг для контактування тіл конкретної форми. Дано рішення задачі для контакту штамп з прямолінійною основою і пружною півплощині. Також показано розподіл напружень в контакті штамп, форма якого описується поліномом другого і четвертого ступеня з напівплощиною. В реальних умовах форма утворюють тіл, що піддаються циклічному контакту, змінюється в результаті пластичної деформації, зносу і інших чинників. На підставі проведеного аналізу зроблені висновки про відсутність кількісних характеристик форми поверхонь реальних тіл, які виникають при різних видах контакту. Зокрема, невідомі закономірності зміни поверхні при контактнo-втомному навантаженні циліндричних тіл. Для проведення досліджень макропрофілю утворюючої поверхні циліндричних деталей, що піддаються циклічному навантаженню, розроблено спеціальне пристосування. Також розроблена методика виконання вимірів і обробки отриманих експериментальних даних. На основі виконаних досліджень запропоновані залежності зміни макропрофілю поперек доріжки контакту зразків з середньовуглецевої незагартованої і багатовуглецевої загартованої сталі.

Ключові слова: контактне напруження, форма контактує поверхні, макропрофіль утворюючої поверхні, максимальні контактні напруги, розподіл напружень, середньовуглецева сталь, багатовуглецева загартована сталь.

Постановка проблеми. Завдання визначення напружень в контакті двох деталей має велике значення і її вирішення присвячено достатню кількість робіт. Аналітичні рішення контактних задач теорії пружності викладені в роботах Г. Герца, А. Н. Динника, Н. М. Беляєва, І. Я. Штаєрмана, Н. І. Мусхелишвили та ін. [1-3].

Докладні результати розв'язання контактних задач, а також характеристика математичних методів використуваних, при їх вирішенні, наведені у книгах під редакцією Л. А. Галина [2, 3]. Контактні задачі для штамп і пружною півплощини, а також для двох пружних тіл, мають одне спільне рішення. Причому, для випадку контакту пружних тіл, одне з яких має суттєво більший модуль поздовжньої пружності, завдання зводиться до контакту штамп і пружною півплощині.

Рішення задачі визначення напружень в контакті двох тіл довільної форми має вигляд [2, 3]:

$$p(x) = -(\sigma_y)_{y=0} = -\frac{1}{\pi k} \cdot \frac{1}{\sqrt{a^2 - x^2}} \cdot \int_{-a}^a (f_1'(t) + f_2'(t)) \cdot \sqrt{(a^2 - t^2)} \cdot \frac{dt}{t - x} - \frac{c}{\pi \sqrt{a^2 - x^2}}, \quad (1)$$

Машинобудування і зварювальне виробництво

де

$$k = \frac{2(1-\nu_1^2)}{E_1} + \frac{2(1-\nu_2^2)}{E_2},$$

$\nu_{1,2}$ - коефіцієнти Пуассона першого і другого тіла;

$E_{1,2}$ - модулі поздовжньої пружності;

a – на півширина площадки контакту;

c - постійна інтегрування.

Для контакту тіла з площиною, одна з похідних під інтегралом наближається до нуля і рівняння (1) набуває вигляду:

$$p(x) = -(\sigma_y)_{y=0} = -\frac{1}{\pi k} \cdot \frac{1}{\sqrt{a^2 - x^2}} \cdot \int_{-a}^a f'(t) \cdot \sqrt{(a^2 - t^2)} \cdot \frac{dt}{t - x} - \frac{c}{\pi \sqrt{a^2 - x^2}} \quad (2)$$

У разі контакту тіл зі значно відрізняються пружними властивостями (штамп з пружним тілом), коли $E_2 \gg E_1 = E$, коефіцієнт k приймає вид:

$$k = \frac{2(1-\nu^2)}{E}. \quad (3)$$

А в разі контакту двох тіл з однаковими, або близькими пружними характеристиками $E_2 = E_1 = E$ і $\nu_1 = \nu_2 = \nu$:

$$k = \frac{4(1-\nu^2)}{E}. \quad (4)$$

Таким чином, завдання визначення контактних напружень для тіл, як з різними, так і з однаковими пружними характеристиками, в кінцевому підсумку зводиться до відшукування в похідних від функцій, що описують поверхні і вирішення інтегрального рівняння типу Коші (1). А, отже, для розрахунку контактних напружень реальних тіл, необхідно визначити залежності, що описують утворюють поверхні тел.

Подібні завдання дуже актуальні при контактній взаємодії деталей металургійних машин, особливо, в разі циклічного навантаження (зуби зубчастих коліс, підшипники кочення, валки станів кварто і т.д.). З цією метою слід виконати експериментальні виміри макропрофілю реальних деталей, які зазнали контактного навантаження.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Докладні огляди робіт в області контактних задач, а також характеристика математичних методів використовуваних, при їх вирішенні, наведені в книзі під редакцією Л. А. Галина [3]. Незважаючи на достатню кількість робіт, присвячених контакту тіл різної форми, в результаті літературного огляду не знайдено досить просте рішення для контакту двох реальних тіл складної форми.

Разом з тим в [3] наведені досить докладні рішення для визначення контактних напружень штампа (абсолютно жорсткого тіла кінцевих розмірів) з пружною напівплощиною. Для штампа з плоским прямолінійним підставою шириною $2a$ тиск на майданчику контакту одно, при цьому P - сила, що діє в перерізі штампа:

$$p(x) = \frac{P}{\pi \sqrt{a^2 - x^2}} \quad (5)$$

При тиску кругового циліндра на пружну площину в разі, якщо радіус циліндра великий у порівнянні з розмірами майданчика контакту, то рівняння поверхні, що обмежує підставу штампа, буде наближено виражатися формулою

Машинобудування і зварювальне виробництво

$$f(x) = \frac{x^2}{2R}, \quad (6)$$

а тиск, що виникає під штампом:

$$p(x) = \frac{E(a^2 - 2x^2)}{4(1 - \nu^2)R\sqrt{a^2 - x^2}} + \frac{P_0}{\pi\sqrt{a^2 - x^2}} \quad (7)$$

Для штампа із закругленими краями, контуром якого є парабола четвертого ступеня тиск, що діє під штампом, описується рівнянням:

$$p(x) = -\frac{P}{3\pi a^2} [(a^2 + 2x^2)\sqrt{a^2 - x^2}]. \quad (8)$$

В роботі [4] наведено рішення рівняння (2) для штампа, що має поверхню у вигляді полінома 8-го ступеня:

$$p(x) = -\frac{E}{256\pi b(1 - \nu^2)\sqrt{a^2 - x^2}} \left(5a + 8\frac{x^2}{a} + 16\frac{x^4}{a^3} + 64\frac{x^6}{a^5} - 128\frac{x^8}{a^7} \right) - \frac{P}{\pi\sqrt{a^2 - x^2}}. \quad (9)$$

Для гладкого тіла розподіл контактної тиску має вигляд:

$$p(x) = \frac{8}{35} \frac{P}{\pi\sqrt{a^2 - x^2}} \left(5 + \frac{x^2}{a^2} + 2\frac{x^4}{a^4} + 8\frac{x^6}{a^6} - 16\frac{x^8}{a^8} \right). \quad (10)$$

В реальних умовах профілі утворюють тіл в процесі циклічного контакту довільно змінюються в результаті зносу, пластичної деформації і інших процесів.

Тому виникла необхідність більш детального вивчення зміни профілю поверхні контакту циліндричних тіл, його апроксимації будь-якими простими математичними залежностями.

Метою даної роботи є дослідження профілю утворюючої циліндричних зразків з середньовуглецевої незагартованої і високовуглецевої загартованої сталі, його апроксимація за допомогою математичних залежностей для подальшого отримання розподілу контактної тиску вздовж уздовж утворюючої.

Основний матеріал дослідження. На кафедрі МОЗЧМ були проведені дослідження опору контактної втоми (С. К.у.) на установці тертя МІ-1-М, адаптованої для даного виду випробувань. Зразки мали вигляд короткого циліндра з робочою доріжкою (рис. 1). Виготовлялися вони зі сталі 15Х нормалізованою, твердістю 17-21HRC, а також - з валкової сталі 90ХФ. Останні були піддані термообробці до твердості 40-45HRC. Утворююча уздовж осі контактної доріжки досліджувалася після проведення випробувань на С. К.у., тому контактна доріжка в більшості випадків мала пластичну деформацію країв (рис. 2).

Машинобудування і зварювальне виробництво

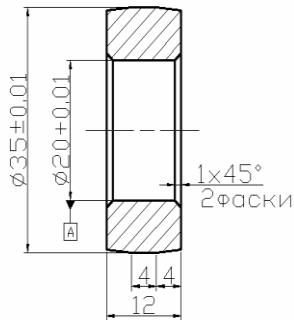


Рисунок 1 – Зразок для випробувань на опір контактної втоми



Рисунок 2 – Схематичне зображення формування профілю поперечної утворюючої зразка при контактному навантаженні

Для проведення досліджень форми контактної поверхні вздовж осі зразка був спроектовано та виготовлено спеціальний пристрій. Він базувався на координатнику поляризаційного компаратора ПК-6, а, точніше, на його механізмі горизонтального переміщення компенсаторною труби (рис. 3).

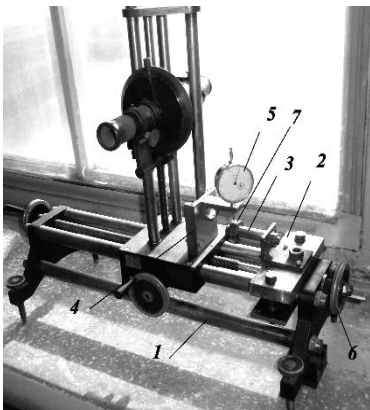


Рисунок 3 – Пристрій виміру макропрофілю, з пристосуванням для циліндричних деталей

Пристрій може застосовуватися для виміру циліндричних зразків працює наступним чином. На рамі 1 координатника жорстко закріплено підставу 2 з встановленим на неї загартованим циліндром 3. На циліндр з невеликим проміжком надаватися зразок 7, причому в нижню частину отвору поміщається шматок тонкої ущільнюючої паперу, щоб зразок надягав з невеликим натягом. На каретці, що переміщується мікрометричним гвинтом 6 з точністю відліку 0,1 мм, закріплений кронштейн 4 з затиснутим індикатором годинникового типу 5 з точністю вимірювання 0,001 мм. Для виміру профілю був виготовлений спеціальний загартований наконечник із загостреним кінцем. Циліндр 3 виставлений по горизонталі таким чином, що на ближніх від торця 30 мм похибка складала менше 0,0005 мм.

Методика виміру і обробки отриманих даних складається з наступних етапів:

- зразок надаватися на передню частину циліндра з ущільненням;
- індикатор з піднятим наконечником підводиться на відстань 0,5 - 1 мм до краю доріжки зразка і опускається на неробочу, кінцеву частину;
- виміри проводяться з кроком 0,1-0,2 мм до виходу наконечника на робочу доріжку переміщенням каретки за допомогою мікрометричного гвинта;
- в залежності від довжини контактної поверхні, виміри проводяться з кроком 0,5 - 1,5мм;
- при досягненні протилежного краю доріжки, крок вимірів зменшується;

- дані вимірів обробляються за спеціальною методикою в середовищі MathCad.

Досліджувалися профілі 9-ти зразків зі сталі 15Х і 19-ть зразків зі сталі 90ХФ. Були отримані профілі утворюють, частина яких мали досить значне відхилення від середніх значень порядку 0,02-0,03мм. Це пояснюється значним ушкодженням контактної поверхні в процесі випробувань на С.К.у. Ряд профілів вийшли досить «гладкими» і відхилення практично не перевищували похибки інструменту, тому що на доріжці кочення були ділянки з меншими ушкодженнями. Всі наявні експериментальні дані були оброблені за вищенаведеною методикою і побудовані профілі утворюють в відносних координатах. На рис. 4 - 5 наведені точки декількох профілів зразків зі сталі 15Х і 90ХФ, а також графіки поверхні, описуваної поліномом $y = (x/a)^8$. Слід зазначити, що пружна деформація зразків за відомими формулами Герца становить 0,00025 мм і вона обмежена ділянкою профілю $\pm 0,7 x/a$.

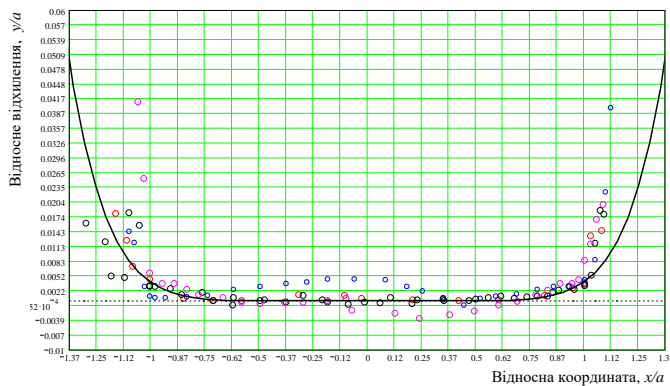


Рисунок 4 – Крапки утворюючих поверхні п'яти зразків у відносних координатах зі сталі 15Х і крива $y=(x/a)^8$

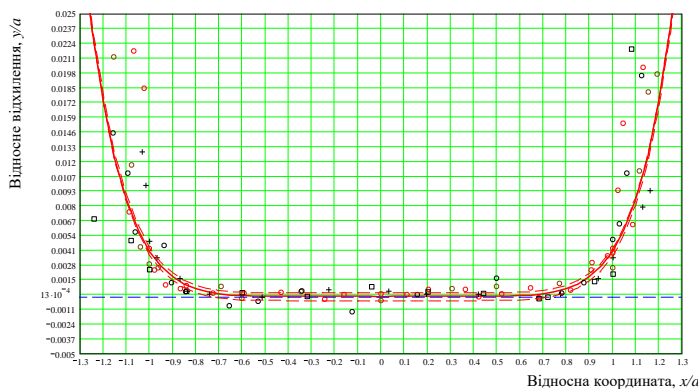


Рисунок 5 – Крапки утворюючих поверхні п'яти зразків, крива $y=(x/a)^8$ (суцільна лінія), криві погрешності інструменту (пунктирні) семи зразків із сталі 90ХФ

Утворюючи зразків зі сталі 15Х більш деформовані, внаслідок чого відхилення макропрофілю від середніх значень вельми істотні (рис. 4). Профіль ж зразків зі сталі 90ХФ має плавні обриси, і відхилення більшості експериментальних точок лежить, або в межах похибки індикатора, або близько до них (рис. 5). Така відмінність макропрофілів пояснюється більшою пластичністю незагартованої сталі 15Х в порівнянні з більш твердої сталлю 90ХФ. Відповідно, область чисто пружної деформації, у зразків із зазначених сталей різниться. Слід очікувати, що контактно-втомні викришування на поверхні більш пластичних зразків будуть групуватися ближче до центру, тому що пластичної деформації будуть піддаватися ділянки значних розмірів поруч з краєм профілю. Пластична деформація перешкоджає появі та розвитку контактно-втомних пошкоджень. Розташування викришувань на зразках з досить твердою загартованої сталі 90ХФ відповідно буде на великих ділянках, тому що пластична деформація країв буде не такою значною. Експериментальні крапки профілю і сталі 15Х, і сталі 90ХФ

досить добре вкладаються на поліном 8-го ступеня (рис. 4, 5).

ВИСНОВКИ

1. Для експериментального дослідження профілю поверхні деталей циліндричної форми спроектовано та виготовлено спеціальний пристрій на базі на механізми горизонтального переміщення компенсаторною труби поляризаційного компаратора ПК-6.

2. Для проведення експериментальних досліджень розроблена методика виміру профілю і методика обробки отриманих результатів.

3. Виконано експериментальні виміри макропрофілю значного числа зразків із сталей 15Х і 90ХФ.

В результаті аналізу експериментальних точок поверхні утворюють зразків, які підлягають випробуванням на опір контактної втоми з незагартованої сталі 15Х і загартованої валкової сталі 90ХФ можна зробити наступні висновки:

- в інтервалі від $-1,1x/a$ до $+1,1x/a$ утворює поверхні добре апроксимується поліномом $y = (x/a)^8$;

- для теоретичних розрахунків контактних напружень тіл, утворюючі яких представляє собою пряму і ламану лінію з сходами, можна використовувати поліном $y = (x/a)^8$.

Список використаних джерел:

1. Моссаковский, В. И. Контактные задачи математической теории упругости / В. И. Моссаковский, Н. Е. Качаловская, С. С. Голикова. – К. : Наук. думка, 1985. – 175 с.

2. Галин, Л. А. Контактные задачи теории упругости / Л. А. Галин. – М. : Гостехиздат, 1953. – 264 с.

3. Галин, Л. А. Развитие теории контактных задач в СССР / Л. А. Галин. – М. : Наука, 1976. – 492 с.

4. Ширяев, А. В. Исследование контактных напряжений деталей с образующими сложной формы / А. В. Ширяев // Механіка машин - основна складова прикладної механіки : матеріали Всеукр. науково-техн. конф., присвяч. 110-річчю з дня народження Кожевнікова С. М. (Дніпро, 11–13 квітня 2017 р.). – Дніпро, 2017. – С. 170–173.

Ширяев А. В., Буцукин В. В., Ширяев И. А., Грицюк А. А., Коршунов Э. Г.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОФИЛЯ КОНТАКТНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ИСПЫТАНИЯХ НА СОПРОТИВЛЕНИЕ КОНТАКТНОЙ УСТАЛОСТИ

Выполнен сравнительный анализ известных исследований распределения контактных напряжений по поверхности двух тел. Показано, что задача определения контактных напряжений для тел, как с различными, так и с одинаковыми упругими характеристиками, в конечном итоге сводится к отысканию в производных от функций, описывающих поверхности и решению интегрального уравнения типа Коши. Приведены данные о распределении напряжений для контактирования тел конкретной формы. На основании проведенного анализа сделаны выводы об отсутствии количественных характеристик формы поверхностей реальных тел, которые возникают при различных видах контакта. В частности, неизвестны закономерности изменения поверхности при контактно-усталостном нагружении. Для проведения исследований макропрофиля образующей

цилиндрических деталей разработано специальное устройство. А также разработана методика выполнения замеров и обработки полученных экспериментальных данных. На основе выполненных исследований предложены зависимости изменения макропрофиля поперек дорожки контакта образцов из среднеуглеродистой незакаленной и высокоуглеродистой закаленной стали.

Ключевые слова: контактное напряжение, форма контактирующей поверхности, макропрофиль образующей, максимальные контактные напряжения, распределение напряжений, среднеуглеродистая сталь, высокоуглеродистая закаленная сталь.

Shiryayev A. V., Butsukin V. V., Shiryayev I. A., Gritsyuk A. A., Korshunov E. G.

MODELING AND RE-ENGINEERING OF INFORMATION PROTECTION PROCESSES BASED ON GRAPHIC THEORY AND IDEF METHODOLOGY

A comparative analysis of known studies of the distribution of contact stresses over the surface of two bodies is carried out. It is shown that the problem of determining contact stresses for bodies, both with different and with the same elastic characteristics, ultimately comes down to finding in the derivatives of functions describing surfaces and solving an integral equation of the Cauchy type. Data on the distribution of stresses for contacting bodies of a specific shape are given. The solution of the problem for the contact of a stamp with a rectilinear base and an elastic half-plane is given. Also shown is the stress distribution in the contact of the punch, the shape of which is described by a polynomial of the second and fourth degrees with a half-plane. Under real conditions, the shape of the forming bodies subjected to cyclic contact changes as a result of plastic deformation, wear, and other factors. On the basis of the analysis, it was concluded that there are no quantitative characteristics of the shape of the surfaces of real bodies, which arise in various types of contact. In particular, the regularities of surface changes under contact-fatigue loading of cylindrical bodies are unknown. A special device has been developed to carry out studies of the macro-profile of the generatrix of cylindrical parts subjected to cyclic loading. Also, a technique has been developed for performing measurements and processing the obtained experimental data. On the basis of the performed studies, the dependences of the change in the macro-profile across the contact path of the samples from medium-carbon unhardened and high-carbon hardened steel are proposed.

Keywords: *contact stress, shape of the contacting surface, macro-profile of the forming surface, maximum contact stresses, stress distribution, medium-carbon steel, high-carbon hardened steel.*

*Рекомендовано до публікації: д-р техн. наук, проф. ДВНЗ «ПДТУ» Іщенко А.О.
Стаття надійшла 09.10.2020 р.*