

Novikov F. V., Novikov G. V., Ditinenko S. O., Andilakhay O. O.

REGIME OPTIMIZE JUSTIFICATION OF CONDITIONS FOR IMPROVING THE ENVIRONMENTAL PRODUCTION BY APPLYING ENVIRONMENTALLY FRIENDLY DIAMOND GRINDING TECHNOLOGIES

The work shows that the most effective technology of diamond grinding to improve the ecology of production is grinding with diamond wheels on high-strength metal bonds with the use of their EDM to restore cutting properties and improve the quality and productivity of processing. This method of straightening can be carried out using normal industrial water, it does not have a harmful effect on the health of the worker and the equipment used. It is shown that, under certain conditions, the volume of the metal binder removed as a result of the action of electric discharges can be greater than the volume of the metal binder removed during its electrochemical dissolution. Therefore, under these conditions, there is no need for the electrochemical dissolution of the metal binder, since it can be removed due to the presence of electric discharges during the straightening process. Therefore, in the work, practical recommendations have been developed for the creation, based on the use of electro-erosive dressing, of environmentally friendly technologies of grinding with diamond-abrasive tools (diamond wheels) on metal bonds of products made from various metal and nonmetallic hard-to-machine materials, including grinding of products from hard alloys and with high-strength weld materials, cutting of highly hard rocks, cutting edges on the surfaces of crystal products, cutting natural diamonds into diamonds, processing products from hard-to-machine ceramics and ferrites, etc. It is shown that as a result of the practical application of these technologies, it becomes possible to carry out environmentally friendly mechanical processing by grinding at industrial enterprises Products from materials of high hardness with high quality and productivity.

Keywords: production ecology, worker health, grinding processing, metal bond diamond wheel, electro-erosive circle dressing, electrochemical dissolution

Стаття надійшла 07.02.2021 р.

УДК 620.171.5

doi.org/10.31498/2522-9990242021249926

Ширяєв О. В., Буцукін В. В., Головачова І. В., Ширяєв І. А., Грицюк А. О.

ДОСЛІДЖЕННЯ КОНТАКТНИХ НАПРУГ МЕТОДОМ ФОТОПРУЖНОСТІ

Виконано короткий порівняльний аналіз відомих теоретичних досліджень розподілу контактних напружень по поверхні двох тіл. На підставі проведеного аналізу зроблені висновки про відсутність експериментальних даних про розподіл контактних напружі. Одним з найбільш достовірних методів експериментального дослідження розподілу напружень в контакті пружних тіл є метод оптично-активних матеріалів. Метод фотопружності дозволяє отримати необхідні і достатні дані для визначення дотичних напружень. З картини смуг можна отримати значення максимальних дотичних напружень, а ізокліни дають напрямлення головних напружень. Методом різниці дотичних напружень визначаються вертикальні і горизонтальні нормальні напруги. Дослідження напружень в контакті тіла з скосами і тіла з прямолінійною твірною, що моделює площину, вироблялося методом фотопружності на установці поляризаційно-проекційної установки ППУ-5. В процесі експерименту випробувана методика поділу головних напружень методом різниці дотичних напружень і підтверджено достовірність отриманих

результатів. Виконано експериментальне дослідження розподілу напружень в контактній деталі з епоксидної смоли методом фотопружності. Зроблені попередні висновки про можливість застосування теоретичних законів розподілу контактних напружень: найбільш збігається з експериментальними даними є формула для контакту штамп з прямолінійною основою. Виявлено деяке неспівпадіння експериментальних даних з теоретичною залежністю, що може бути викликано наявністю сил тертя в реальному контакті зразків.

Ключові слова: *контактне напруження, фотопружність, оптично-активний матеріал, ізохром, ізокліни, поле ізоклін, поле ізохром, дотичні напруження, нормальні напруження, метод різниці дотичних напружень.*

Постановка проблеми. Завдання визначення напружень в контактній деталі має велике значення і її вирішення присвячено достатню кількість робіт. Аналітичні рішення контактних задач теорії пружності викладені в роботах Г. Герца, А. Н. Дінника, Н. М. Беляєва, І. Я. Штаєрмана, Н. І. Мухелишвілі та ін. [1-3]. Докладні результати розв'язання контактних задач, а також характеристика математичних методів використовуваних, при їх вирішенні, наведені в книзі під редакцією Л. А. Галіна [2, 3].

Докладні результати розв'язання контактних задач, а також характеристика математичних методів використовуваних, при їх вирішенні, наведені в книзі під редакцією Л. А. Галіна [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.

Однак відсутня достатня кількість відомостей про розподіл тисків в контактній реальних деталей з однаковими, або близькими механічними властивостями. Також відсутня експериментальна база для такого роду контакту.

Таким чином, для подальшого теоретичного розрахунку контактних напружень реальних тіл, актуально проведення експериментальних досліджень залежностей розподілу напружень. Одним з найбільш достовірних методів експериментального дослідження напруженого стану є метод фотопружності.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Огляди робіт в області контактних задач, а також математичних методів використовуваних, при їх вирішенні, наведені в книзі під редакцією Л. А. Галіна [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 штамп (абсолютно жорсткого тіла кінцевих розмірів) з пружною напівплощиною. Для штамп з плоским прямолінійним підставою шириною $2a$ тиск на майданчику контакту одно, при цьому P - сила, що діє в перерізі штамп:

$$p(x) = \frac{P}{\pi\sqrt{a^2 - x^2}} \quad (1)$$

Останнім часом підвищився інтерес до використання в експериментальних дослідженнях методу фотопружності [4, 5]. У зазначених роботах, позначена проблема поділу нормальних напружень. У методі фотопружності щодо просто визначаються дотичні напруження і різниця нормальних напружень. Однак при визначенні головних напружень і поділу їх на нормальні і дотичні виникають певні проблеми. Іноді нормальні значення напруг при

Машинобудування і зварювальне виробництво

класичному методі рішення знаходяться з невизначеною точністю [4, 5]. Тому для поділу нормальних напружень використовуються або припущення про напружений стан, або додаткові експериментальні дані, граничні умови або умови рівноваги.

Метою даної роботи є експериментальне дослідження компонентів напруженого стану методом фотопружності для подальшого зіставлення з теоретичними залежностями розподілу контактного тиску вздовж утворюючої.

Основний матеріал дослідження. Дослідження напружень в контакті тіла з скосами і тіла з прямолінійною твірною, що моделює площину, вироблялося методом фотопружності на установці ППУ-5.

Установка має три основні частини: поляризатор, навантажувальний пристрій і аналізатор і призначена для визначення різниці ходу методами смуг або зіставлення кольорів. Поляризатор змонтований на окремій оптичній лаві, на якій встановлені джерело світла, поляроїд з відкидною платівкою в чверть хвилі. Аналізатор містить поляроїд з пластиною в чверть хвилі, робочу лінзу, проєкційний об'єктив, екран. Для створення навантажень на зразок в комплект входить прес УП-7.

Пристаосування для навантаження зразків представлено на рис. 1.

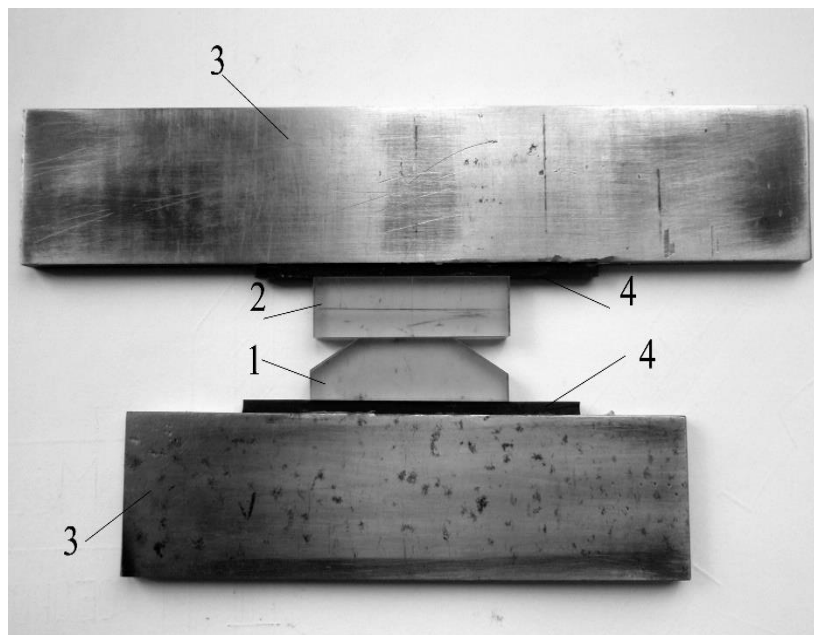


Рисунок 1 – Зразки та пристосування для досліджень контактних напружень

Контакт сталевих загартованих платівок 3 з прямолінійними гранями і деталей з епоксидної смоли 1,2 товщиною 5,9 мм здійснювався через гумові прокладки 4. А навантаження пластин 3 в реверсорі проводився через смужки картону для рівномірного розподілу на них тиску. Навантаження на зразок створювалася важільним пресом і складала 100,4 кгс. Попередньо був виміри макропрофіль доріжки зразка 1, який представлений на рис. 2.

Машинобудування і зварювальне виробництво



Рисунок 2 – Змінення профілю зразка в відносних координатах, де a – полуширина площадки контакту

Поле ізохром було побудовано по картині, одержуваній при просвічуванні навантаженої моделі на круговому поляріскопа (рис. 3) за рекомендаціями [7, 8].

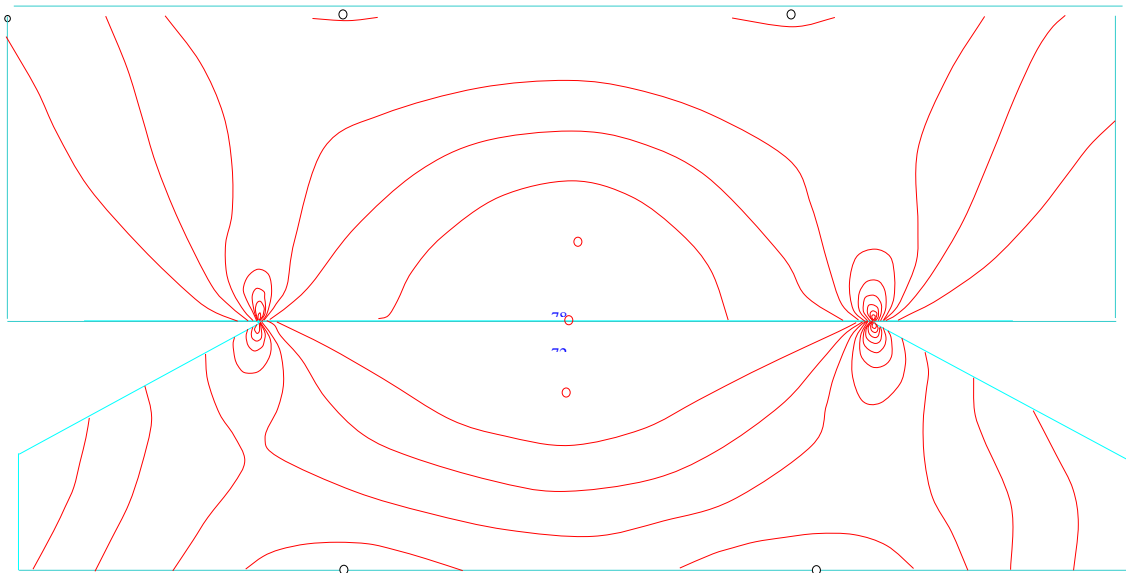


Рисунок 3 – Поле ізохром

Для правильного визначення величини $(\sigma_1 - \sigma_2)$ за методом смуг необхідно було знати початок відліку порядку смуг, який визначається тільки при круговій поляризації, тобто коли ізокліни відсутні. Для цього виконувалося спостереження за освітою картини кольорових і монохромних смуг в процесі поступового навантаження моделі. На отриманій в результаті

Машинобудування і зварювальне виробництво

експерименту картині смуг визначені джерела зародження смуг (рис. 3), які розташовуються в контакті зразка і пластини і в місцях їх контакту зі сталевими пластинами.

Точки, в яких різниця головних напружень дорівнює нулю, і вільні кути, де самі головні напруження нульові, позначені «0».

Надалі, поле ізохром коректувалося відповідно до відомими закономірностями розподілами ізоклін.

Для точного визначення ціни смуги при відомому напрямку головних напружень застосований найбільш простий спосіб компенсації - спосіб Тарді. Компенсація способом Тарді здійснювалася в монохроматичному світлі із застосуванням кругового полярископа. Аналізатор полярископа використовувався в якості компенсатора. Ось поляризатора встановлювалася вертикально по напрямленню головної напруги в центрі контакту і поворотом аналізатора отримали повне гасіння світла в точці моделі. Підрахунком порядків смуг навколо даної точки і кута, одержуваного при повороті аналізатора, визначено точне значення порядку смуги в центрі площадки контакту. У верхній пластині він склав 0,78, а в нижній 0,72 (рис. 3). Деякий розбіжність значень пояснюється суб'єктивною неточністю вимірів у верхній і нижній частині.

Для отримання ізоклін був використаний джерело білого світла в плоскому полярископу і ізокліни виходили у вигляді темної смуги на фоні кольорової картини. Схрещені поляризатор і аналізатор встановлюють на нулі лімба полярископа і потім синхронно повертали їх на певний кут, кожен раз окреслюючи ізокліни на фотографії. Ізокліни нанесені від 0 до 90⁰ через рівні інтервали 10⁰, в результаті отримано поле ізоклін (рис. 4). Отримані фотографуванням ізокліни згладжені і підправлений відповідно до нижчевикладених правил [7, 8]. Через кожен точку напруженою моделі проходить тільки одна ізокліни певного параметра, виняток становлять ізотропні точки. Через ізотропні точки, в тому числі і прості, проходять ізокліни всіх параметрів, так як в цих точках всі напрямки є головними.

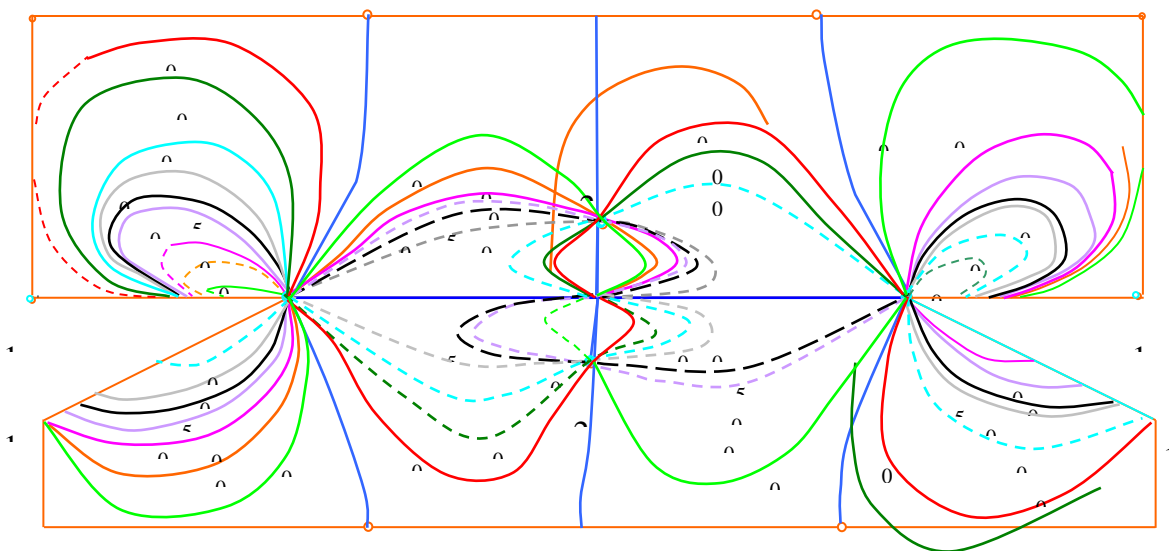


Рисунок 4 – Поле ізоклін

Машинобудування і зварювальне виробництво

На рис. 4 прості ізотропні точки позначені «01», а ізотропні - «02». Через нижні точки 01 проведена лише частина ізоклін, тому що інші, ймовірно, проходять близько до краю і їх не видно. У верхніх простих точках (вільні кути пластини) ізокліни зовсім не показані, з огляду на їх непомітності. Оскільки вказані неточності істотно не впливають на виконувани розрахунки, ними цілком можна знехтувати. Так як зразки мають взаємно перпендикулярні осі симетрії і зовнішні навантаження розподілені симетрично щодо цих осей, то осі симетрії є ізокліни одного і того ж параметра. Дійсно, осями симетрії є вертикальна і горизонтальна вісь, хоча в вертикальній площині ізокліни порядку 0 градусів кілька відхилені від вертикалі. Вертикальні вільні грані зразка і пластини (рис. 4) мають порядок 90^0 .

Ізокліни всіх параметрів сходяться в точці прикладання зосереджених сил, такими точками можна вважати точки «О» на верхньої і нижньої площині (рис. 4) і точки по краях контакту.

Якщо параметр ψ збільшується при обході проти годинникової стрілки від позитивного напрямку осі x , то ізотропна точка - позитивна, якщо напроти - негативна. На рис. 4 дві точки «02» - негативні. Але, згідно з [7, 8], дві сусідні точки можуть бути тільки різних знаків. Згідно з цим правилом була визначена ще одна позитивна ізотропна точка, позначена на рис. 4 буквою «А».

При аналізі експериментально отриманих ізоклін (рис. 4) слід зазначити, що вони розпливаються і стають невидимими поблизу країв. Тому, виходячи з правил їх побудови, пунктиром нанесені передбачувані траєкторії.

Поле ізоклін використано також для побудови траєкторій головних напружень (ізостат) - ліній, дотичні до яких в кожній точці збігаються з напрямом одного з головних нормальних напружень [1, 2]. Так як σ_1 і σ_2 в кожній точці взаємно перпендикулярні, то ізостати утворюють систему ортогональних кривих (рис. 5).

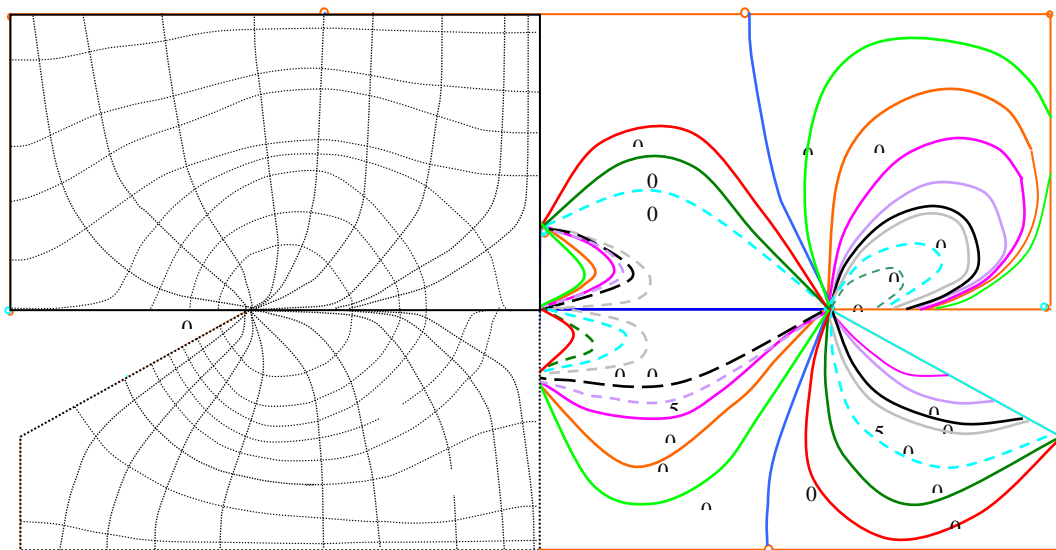


Рисунок 5 – Поле ізостат (зліва) і поле ізоклін в контакті зразків

Машинобудування і зварювальне виробництво

Поле ізоклін необхідно для визначення напрямку головного напруги σ_1 , використовуваного в методі різниці дотичних напружень.

Побудова поля ізостат виконано найбільш простим способом: на кожній ізокліні наноситься ряд штрихів, нахилених до горизонталі під кутом, рівним параметру ізокліни. Траекторія ізостати через дану на ізокліні точку проводиться на око. Цей спосіб дає задовільні результати і є відносно швидким. При побудові поля ізостат керувалися правилами, викладеними в роботі [7].

Отримані експериментальні дані, представлені на рис. 5, дозволили встановити напрям головних напружень і визначити розрахунковий кут в методі різниці дотичних напружень. Визначення напрямку головних напруг виконано по відомим площинам: σ_1 (максимальне) перпендикулярно верхньому і нижньому контакту. А σ_2 (мінімальне) визначається дотичними напруженнями тертя на цих поверхнях і воно перпендикулярно σ_1 .

Метод фотопружності дозволяє отримати необхідні і достатні дані для визначення τ_{xy} . З картини смуг можна отримати значення $(\sigma_1 - \sigma_2)$, а ізокліни дають напрямлення головних напружень.

При поділі напружень з використанням способу різниці дотичних напружень дотримувалися такої послідовності:

- 1) поєднання поля ізохром і ізоклін;
- 2) проведення основне і два допоміжних перетину на відстані $\Delta y = \Delta x$, які розбиваються на певне число ділянок (в нашому випадку на 36 з рівним кроком) (рис. 6);
- 3) визначення в обраних точках перетинів параметри ізохром і ізоклін (в методі смуг зазвичай попередньо будують графіки змінення цих параметрів уздовж перетинів);

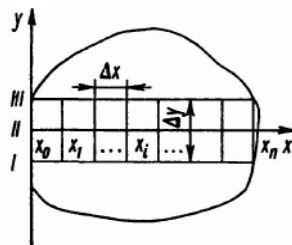


Рисунок 6 – Схема поділу напруг способом різниці дотичних напружень

- 4) обчислення дотичної напруги по формулі:

$$\tau_{xy} = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \sin 2\theta = \frac{n\sigma_0}{2d} \sin 2\theta \quad (2)$$

де θ - гострий кут, який відраховується між нормаллю і напрямом алгебраїчно більшої головної напруги σ_1 [8];

- 5) визначення $\Delta\tau_{xy} / \Delta y$ за формулою

Машинобудування і зварювальне виробництво

$$\frac{\Delta \tau_{xy}}{\Delta y} = \frac{(\tau_{xy})_{III} - (\tau_{xy})_I}{\Delta y}, \quad (3)$$

де $(\tau_{xy})_i$ - дотичні напруження в відповідному перерізі;

б) обчислення значення σ_x

$$(\sigma_x)_n = (\sigma_x)_0 - \sum_{i=1}^n \left(\frac{\Delta \tau_{xy}}{\Delta y} \Delta x \right)_i, \quad (4)$$

де $(\sigma_x)_0 = 0$ – напруження в початковій точці;

7) знаходження значення σ_y :

$$\sigma_y = \sigma_x - (\sigma_1 - \sigma_2) \cos 2\theta = \sigma_x - \frac{n\sigma_0^{1,0}}{2d} \cos 2\theta, \quad (5).$$

8) перевірка отриманих результатів шляхом зіставлення зовнішньої сили з рівнодіюча відповідних внутрішніх сил. Для перевірки достовірності отриманих експериментальних результатів, використовувалася умова, що отримана сила $P_{експ}$ приблизно дорівнює силі, що прикладається на установці ППУ-5 ($P_{ППУ-5}$):

$$P_{ЭКСП} = \left(\sum_{i=1}^n \sigma_y \right) \cdot \Delta l \cdot \delta \approx P_{ППУ-5}, \quad (6)$$

де n - кількість інтервалів, σ_y - вертикальне напруження в даному інтервалі, розраховане методом різниці дотичних напружень, Δl - натуральна довжина інтервалу, δ - товщина пластинок.

Результати розрахунку за даними експериментальних досліджень і теоретичні залежності зміни тиску представлені на рис. 7, 8.

Теоретичні закони розподіл тиску вздовж доріжки контакту будувалися за відомими формулами. Для штампа з плоскою прямолінійною підставою шириною $2a$ тиск на майданчику контакту дорівнює, при цьому P - сила, що діє в перерізі штампа:

$$\sigma_y(x) = \frac{P}{\pi \sqrt{a^2 - x^2}} \quad (7)$$

При зіставленні розподілу тиску по майданчику контакту (рис. 8) зразка і пластинки слід зазначити, що якісно експериментальний розподіл досить близько до розподілу напружень, що виникають в контакті гостровугільного штампа, при якому на краях виникають нескінченно великі напруги.

В результаті розрахунків по формулі 6, відхилення розрахункової і реальної сил в контактні зразків склав: + 11,35 %. Тобто, отримані результати є цілком достовірними з урахуванням наявності похибок, викликаних складністю в побудові ізоклін. Можна припустити, що деяке неспівпадіння експериментальних даних з теоретичною залежністю викликано наявністю сил тертя в реальному контактні зразків (рис. 7).

Машинобудування і зварювальне виробництво

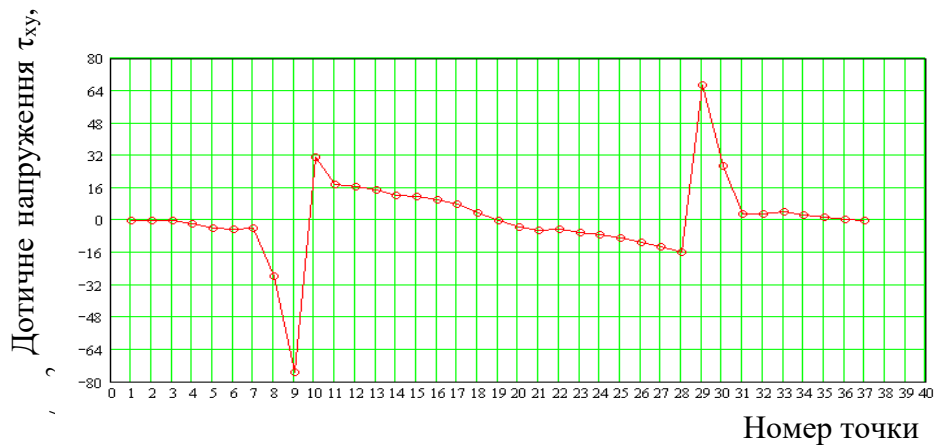


Рисунок 7 – Зміна дотичних напружень в контактї зразків по точкам

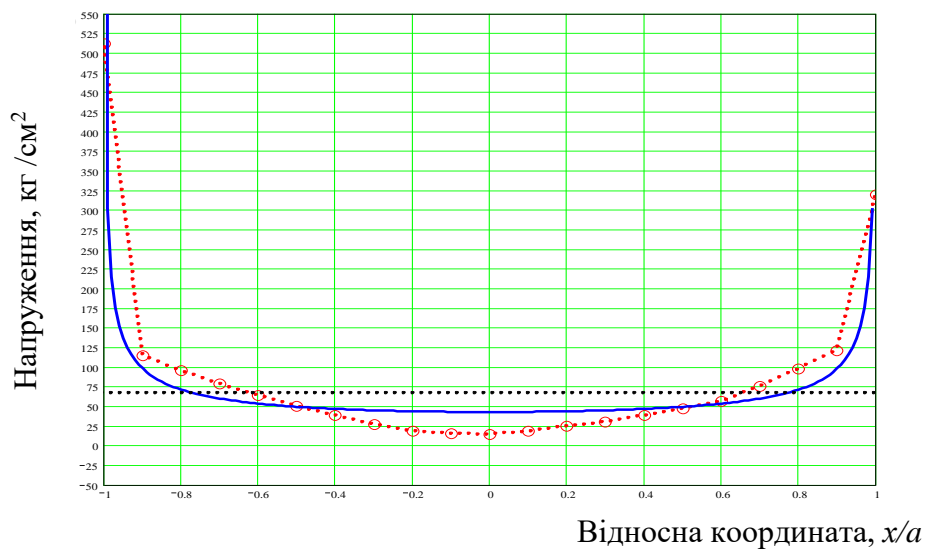


Рисунок 8 – Експериментальні криві σ_y (1), середнього тиску (2) і теоретичного тиску штампа (3) в контактї

ВИСНОВКИ

1. Виконано експериментальне дослідження розподілу напружень в контактї деталей з епоксидної смоли методом фотопружності.
2. Випробувана методика розділення головних напружень методом різниці дотичних напружень і підтверджено достовірність отриманих результатів.
3. Зроблено попередні висновки про можливість застосування теоретичних законів розподілу контактних напружень: найбільш збігається з експериментальними даними формула для контакту штампа з прямолінійною основою.
4. Розбіжність експериментальних даних з теоретичною залежністю викликано наявністю сил тертя в реальному контактї зразків.

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. Тесленко, А. А. Методы конечных элементов и фотоупругости // Вестник Нац. техн. ун-та «ХПИ» : сб. науч. тр. Темат. вып. : Технологии в машиностроении. – Харьков, 2005. – № 22. – С. 143–148.
5. Тесленко, А. А. Некоторые подробности применения метода конечных элементов в фотоупругости // Вестник Нац. техн. ун-та «ХПИ» : сб. науч. тр. Темат. вып. : Технологии в машиностроении. – Харьков, 2006. – № 21. – С. 183–186.
6. Тесленко, А. А. Определение точности метода фотоупругости // Вестник Нац. техн. ун-та «ХПИ» : сб. науч. тр. Темат. вып. : Технологии в машиностроении. – Харьков, 2008. – № 36. – С. 167–170.
7. Фрохт, М. М. Фотоупругость. Поляризационно-оптический метод исследования напряжений. В 2 т. Т. 1 / М. М. Фрохт. – М. ; Л. : ОГИЗ, 1948. – 432 с.
8. Хаимова-Малькова, Р. И. Методика исследования напряжений поляризационно-оптическим методом / Р. И. Хаимова-Малькова. – М. : Наука, 1970. – 116 с.

Ширяев А. В., Буцукин В. В., Головачева И. В., Ширяев И. А., Грицюк А. А.

ИССЛЕДОВАНИЕ КОНТАКТНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ МЕТОДОМ ФОТОУПРУГОСТИ

Выполнен краткий сравнительный анализ известных теоретических исследований распределения контактных напряжений по поверхности двух тел. На основании проведенного анализа сделаны выводы об отсутствии экспериментальных данных о распределении контактных напряжении. Одним из самых достоверных методов экспериментального исследования распределения напряжений в контакте упругих тел является метод оптически-активных материалов. Метод фотоупругости позволяет получить необходимые и достаточные данные для определения касательных напряжений. Из картины полос можно получить значения максимальных касательных напряжений, а изоклины дают направления главных напряжений. Методом разности касательных напряжений определяются вертикальные и горизонтальные нормальные напряжения. Исследование напряжений в контакте тела со скосами и тела с прямолинейной образующей, моделирующей плоскость, производилось методом фотоупругости на установке поляризационно-проекционной установке ППУ-5. В процессе эксперимента опробована методика разделения главных напряжений методом разности касательных напряжений и подтверждена достоверность полученных результатов. Выполнено экспериментальное исследование распределения напряжений в контакте деталей из эпоксидной смолы методом фотоупругости. Сделаны предварительные выводы о возможности применения теоретических законов распределения контактных напряжений: наиболее совпадающим с экспериментальными данными является формула для контакта штампа с прямолинейным основанием. Выявлено некоторое несовпадение экспериментальных данных с теоретической зависимостью, что может быть вызвано наличием сил трения в реальном контакте образцов.

Машинобудування і зварювальне виробництво

Ключевые слова: *контактное напряжение, фотоупругость, оптически-активный материал, изохром, изоклин, поле изоклин, поле изохром, касательные напряжения, нормальные напряжения, метод разности касательных напряжений.*

Shiryayev A. V., Butsukin V. V., Shiryayev I. A., Golovacheva I. V., Gritsyuk A. A.

RESEARCH OF CONTACT VOLTAGES BY THE METHOD OF PHOTOELASTICITY

A brief comparative analysis of the known theoretical studies of the distribution of contact stresses over the surface of two bodies is carried out. On the basis of the analysis carried out, conclusions were drawn about the absence of experimental data on the distribution of contact stresses. One of the most reliable methods for the experimental study of the stress distribution in the contact of elastic bodies is the method of optically active materials. The photoelasticity method allows obtaining the necessary and sufficient data for determining the shear stresses. The maximum shear stress values can be obtained from the strip pattern, and the isoclines give the directions of the principal stresses. The shear stress difference method is used to determine the vertical and horizontal normal stresses. The study of stresses in the contact of a body with bevels and a body with a rectilinear generatrix simulating a plane was carried out by the photoelasticity method on a polarization-projection device PPU-5. In the course of the experiment, the method of separation of principal stresses by the method of difference in shear stresses was tested and the reliability of the results obtained was confirmed. An experimental study of the distribution of stresses in the contact of parts made of epoxy resin by the method of photoelasticity has been carried out. Preliminary conclusions are made about the possibility of applying the theoretical laws of the distribution of contact stresses: the formula for the contact of the punch with a rectilinear base is the most consistent with the experimental data. Some discrepancy between the experimental data and the theoretical dependence was revealed, which can be caused by the presence of friction forces in the real contact of the samples.

Keywords: *contact stress, photoelasticity, optically active material, isochrome, isocline, isocline field, isochromic field, shear stresses, normal stresses, shear stress difference method.*

Стаття надійшла 08.02.2021 р.

УДК 621.791.753.042

doi.org/10.31498/2522-9990242021267035

Щетинін С. В., Щетиніна В. І., Никитенко П. В., Елсаєд Халед, Коваль О. В.

СТАБІЛЬНІСТЬ ПРОЦЕСУ ПРИ ОДНОСТОРОННЬОМУ ВИСОКОШВИДКІСНОМУ ЗВАРЮВАННІ ТРУБ ДЛЯ ГАЗО- І НАФТОПРОВІДНИХ МАГІСТРАЛЕЙ

При односторонньому високошвидкісному зварюванні труб для газо- і нафтопровідних магістралей внаслідок концентрації силових ліній магнітного поля в феромагнітній трубі значно зростає електромагнітне поле зварювального струму, виникає магнітне дуття, знижується стабільність процесу і ударна в'язкість зварних з'єднань, утворюються подрізи та порушується формування зворотного валику на флюсовій подушці. Для підвищення стабільності, якості та ударної в'язкості зварних з'єднань розроблено процес одностороннього високошвидкісного зварювання труб з двостороннім струмопідводом, при якому струм підводиться в начало і кінець труби, що забезпечує регулювання струму, який тече ззаду і попереду дуги в зварювальній ванні. Механізм підвищення стабільності процесу з двостороннім струмопідводом полягає в