

УДК: 620.171.5 DOI 10.36910/6775.24153966.2019.67.19

О.В. Ратушний, Н.В. Семенова

Сумський державний університет

**МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ НАПРУЖЕНОГО СТАНУ ЗОЛОТНИКА
ГІДРОРОЗПОДІЛЬНИКА**

У статті обґрунтовано важливість дослідження на міцність одного з основних елементів гідроприводу – розподільника, а точніше – його золотникового елемента. Це є актуальною задачею для вирішення проблеми удосконалення регулювальних характеристик дроселюючого розподільника на основі оптимізації течії робочої рідини в його каналах. Розроблена методика дослідження напруженого стану золотника поляризаційно-оптичним методом.

Ключові слова: гідророзподільник, міцність золотника, поляризаційно-оптичний метод

А.В. Ратушный, Н.В. Семенова**МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ЗОЛОТНИКА
ГИДРОРАСПРЕДЕЛИТЕЛЯ**

В статье обоснована важность исследования на прочность одного из основных элементов гидропривода - распределителя, а точнее - его золотникового элемента. Это является актуальной задачей для решению проблемы совершенствования регулирующих характеристик дросельного распределителя на основе оптимизации течения рабочей жидкости в его каналах. Разработана методика исследования напряженного состояния золотника поляризационно-оптическим методом.

Ключевые слова: гидрораспределитель, прочность золотника, поляризационно-оптический метод

A. Ratushnyi, N. Semenova**METHOD OF STUDYING THE STRESS STATE OF THE PISTON VALVE**

The article substantiates the importance of testing the strength of one of the main elements of a hydraulic actuator - a piston valve. This is an urgent task to solve the problem of improving the regulating characteristics of the directional control valve based on the optimization of the flow of the working fluid in its channels. A technique for studying the stress state of the piston valve by the polarization-optical method is developed.

Keywords: directional control valve, strength of piston valve, polarization-optical method

Вступ. Гідравлічні розподільники, які є основною частиною гідроприводу, широко використовуються в різних галузях техніки для зміни напрямку потоку робочої рідини в двох або більше гідравлічних лініях залежно від зовнішнього керуючого впливу. Вони керують пуском, зупинкою та напрямком потоку робочої рідини шляхом повного відкриття чи закриття робочого прохідного отвору. [1]

Основною перевагою гідроприводів є можливість отримання великих зусиль та потужностей при обмежених розмірах силових виконавчих двигунів, що полегшує компонування гідроприводів в механізмах. Завдяки малій інерційності рухомих частин гідроприводи мають високу швидкодію – час їх розгону та гальмування не перевищують звичайно декількох сотих секунди. Гідроприводи за умови плавності руху забезпечують широкий діапазон безступінчастого регулювання швидкості виконавчих двигунів, надійно захищають систему від перевантаження. Важливою перевагою гідроприводів є можливість роботи в динамічних режимах при частих вмиканнях, зупинках, реверсах руху чи змінах швидкості.

Постановка проблеми. Звернемо увагу на те, що вищезазначені режими роботи призводять до виникнення знакозмінних напруг у керувальному органі – золотнику. Займаючись питанням удосконалення регулювальних характеристик розподільника, необхідно приділити увагу дослідженню його міцності при відмінних від розрахункових режимах роботи.

Перед фахівцями у галузі гідроприводів таким чином постає актуальна проблема дослідження напруженого стану золотника гідророзподільника при моделюванні тих чи інших змінних навантажень на нього. В якості шляху вирішення цієї проблеми можна запропонувати поляризаційно-оптичний метод дослідження напруги, який є простим та наглядним, а також добре зарекомендував себе при дослідженні різноманітних елементів та конструкцій на міцність [2].

Мета та задачі дослідження. Виходячи із вищезазначеної проблематики, мету дослідження можна сформулювати наступним чином: розробка методики дослідження напруженого стану моделі золотника поляризаційно-оптичним методом.

Для досягнення даної мети запропоновано наступні задачі дослідження:

– оцінити можливості проведення досліджень поляризаційно-оптичним методом у СумДУ;

- розробити просторовий ескіз моделі золотника та обрати матеріал для виготовлення дослідницького зразка;
- визначити етапи дослідження моделі золотника розподільника поляризаційно-оптичним методом.

Викладення основного матеріалу. Загальна характеристика поляризаційно-оптичного методу. В основі поляризаційно-оптичного методу (методу фотопружності) дослідження напружень лежить явище тимчасового подвійного променезаломлення, яке виникає в результаті поляризації діелектриків [3], викликаній зовнішніми впливами. Поляризаційно-оптичний метод дослідження напруги використовується для визначення напружень у задачах теорії пружності, пластичності, лінійної і нелінійної в'язкопружності та інших завданнях нелінійного і непружного деформування, в тому числі, і прикінцевих деформаціях. З точки зору вимірювання характеристик напружено-деформованого стану поляризаційно-оптичний метод дослідження напруги є одним з найбільш інформативних і точних експериментальних методів. Цінність методу фотопружності полягає також у тому, що він дозволяє моделювати у прозорих зразках напружені стани, що виникають в реальних елементах, виготовлених з оптично неактивних і взагалі непрозорих матеріалів, наприклад, металів [4,5]. Всі випробовувані у ході роботи зразки виготовлені з одного і того ж матеріалу (епоксидної смоли) і являють собою плоскі деталі різної форми.

Обладнання для дослідження та матеріал моделей. Дослідження проходження світла через навантажену пластину проводять у полярископії. В якості експериментальної бази планується використання полярископу БПУ (ІМАШ-2) дослідницької лабораторії кафедри секції опору матеріалів та машинознавства кафедри Загальної механіки та динаміки машин СумДУ [6]. На малюнку 1 наведена оптична схема полярископа БПУ (ІМАШ-2), який призначений для спостереження, замальовки і фотографування поля ізоклін і картини смуг або ізохром досліджуваної моделі. Полярископ БПУ конструктивно складається з трьох частин: поляризаторної, аналізаторної і навантажувального пристрою.

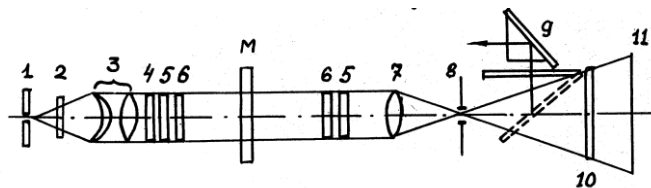


Рис. 1 Оптична схема полярископа БПУ (ІМАШ-2)

Поляризаторна частина включає в себе джерело світла 1, в якості якого використовується ртутно-кварцова лампа ДРШ-250, Теплофільтр 2, двохлінзовий конденсор 3, що створює паралельний пучок світла, світлофільтр 4 (довжина хвилі $\lambda = 546$ нм), поляроїд – поляризатор 5, який може повертатися в межах 1000 в оправі, забезпеченою лімбаом для відліку кута повороту, чвертьхвильової пластинки 6, змонтованої у відкидній оправі, яка також має лімба.

Аналізаторна частина включає чвертьхвильову пластинку 6 і поляроїд – аналізатор 5 в поворотних оправі з лімбами (чвертьхвильові пластинки можуть відкидатися з оптичної осі), об'єктив 7, діафрагму з фотографічним затвором 8, перископічних пристрій 9 з відкидним дзеркалом, матове скло 10 (при фотографуванні воно замінюється касетою з фотоплівкою або фотоплівкою) і відкидний прозорий екран 11. Робоче поле полярископа становить 130 мм, збільшення зображення 1:5.

Навантажувальний пристосування складається з підйомного столу і навантажувальної рами, в якій розміщується досліджувана модель М. Підйомний стіл може переміщатися в горизонтальному і вертикальному напрямках у межах 300 мм, а рама забезпечує навантаження моделі через систему важеля зусиллям до 10 кН в співвідношенні 1:10.

Для виготовлення моделей використовуються оптично чутливі матеріали на основі епоксидних смол, наприклад, матеріал ЕД-6М. При кімнатній температурі він має наступні характеристики: модуль Юнга $E = 3,5 \cdot 10^3$ МПа, коефіцієнт Пуассона $\nu = 0,36$, межа міцності при розтягуванні 60 МПа, межа пропорційності 50 МПа, ціна смуги $\sigma_0^{(1,0)} = 1,1$ МПа·см / смуги.

В якості досліджуваного зразка обрано золотник розподільника з гідравлічним центруванням (рис 2) для якого виконано плоску модель із оптично чутливого матеріалу (рис 3). З

урахуванням аналізу силової взаємодії потоку рідини і елементів керування у реально працюючому розподільнику [7] представлено систему зовнішніх силових факторів (рис 4). За такою схемою модель буде навантажена під час дослідження її напруженого стану поляризаційно-оптичним методом.

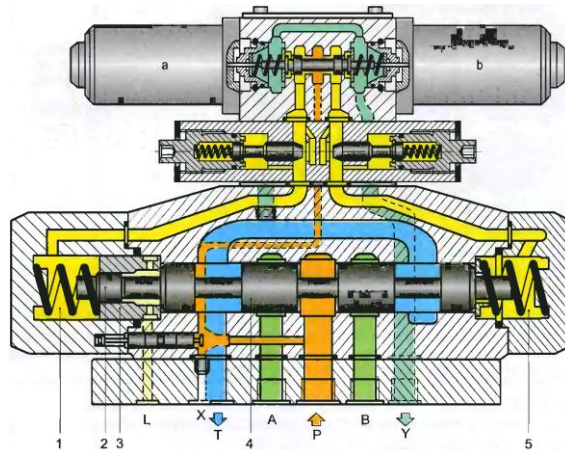


Рис. 2 Гідророзподільник з гідравлічним центруванням

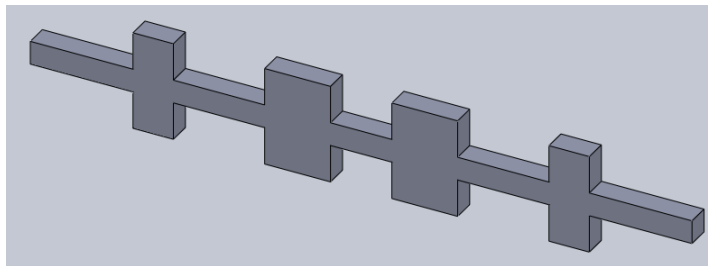


Рис. 3 Загальний вид досліджуваної моделі золотника

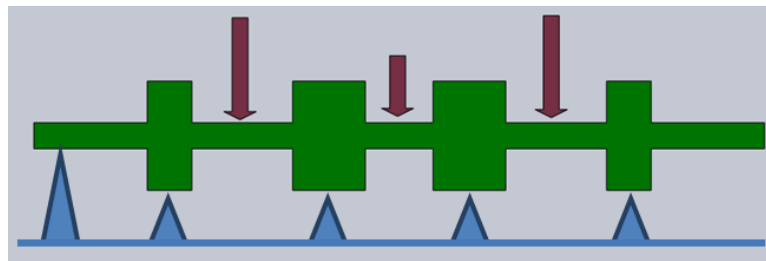


Рис. 4 Система зовнішніх силових факторів, прикладена до моделі золотника

Аналіз розповсюдження світла в полярископах. Загальна схема кругового полярископа з досліджуваної плоскою моделлю наведена на рис.5. Так, в круговому полярископі додатково використовуються дві чвертьхвильові пластинки, що мають наперед задані властивості оптичної анізотропії. Основне призначення цих пластинок – утворення двох хвиль з різницею ходу у чверть довжини хвилі, звідки й походить їхня назва.

Нехай промінь вертикально поляризованого монохроматичного світла, описується виразом $A_1 = a \sin \omega t$. Перша чверть хвильова пластинка встановлюється так, що її головні осі розташовані під кутом $\pi/4$ до площини пропускання поляризатора. Потрапляючи в цю пластинку, промінь світла розкладається на дві складові:

$$A_2 = a \sin \omega t \cdot \cos \pi/4 = \frac{a}{\sqrt{2}} \sin \omega t, \quad A_3 = a \sin \omega t \cdot \sin \pi/4 = \frac{a}{\sqrt{2}} \sin \omega t.$$

Після проходження першої чвертьхвильової пластинки промені світла описуються виразами:

$$A_4 = \frac{a}{\sqrt{2}} \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right) = \frac{a}{\sqrt{2}} \cos \omega t, \quad A_5 = \frac{a}{\sqrt{2}} \sin \omega t.$$

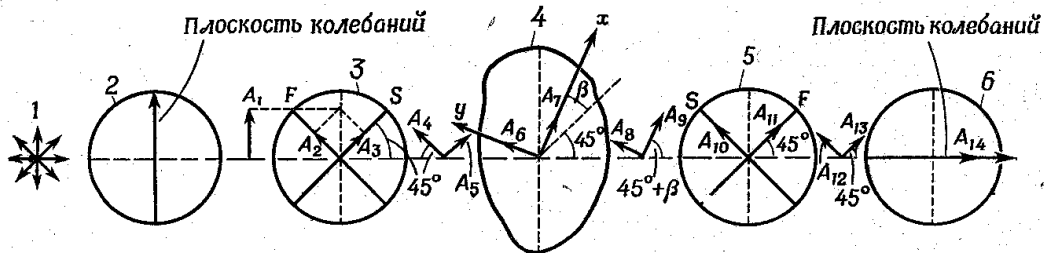


Рис. 5 Коловий полярископ

1 – джерело світла, 2 – поляризатор, 3 і 5 – перша і друга чвертьхвильові пластинки (F і S – головні осі), 4 – навантажена пластинка (σ_1 і σ_2 – головні осі), 6 – аналізатор.

Ці рівняння є параметричними рівняннями кола, звідки і назва – коловий полярископ. Промені, що потрапляють в модель, розкладаються на складові:

$$A_6 = A_4 \cos \beta - A_5 \sin \beta = \frac{a}{\sqrt{2}} (\cos \beta \cos \omega t - \sin \beta \sin \omega t) = \frac{a}{\sqrt{2}} \cos(\omega t + \beta),$$

$$A_7 = A_4 \sin \beta + A_5 \cos \beta = \frac{a}{\sqrt{2}} (\sin \beta \cos \omega t + \cos \beta \sin \omega t) = \frac{a}{\sqrt{2}} \sin(\omega t + \beta).$$

При проходженні через навантажену пластинку дві складові набувають додаткову різницю фаз, так що на виході з пластинки отримаємо:

$$A_8 = \frac{a}{\sqrt{2}} \cos(\omega t + \beta - \Delta), \quad A_9 = \frac{a}{\sqrt{2}} \sin(\omega t + \beta).$$

Друга чверть хвильова пластинка орієнтована так, щоб її вісі F та S були перпендикулярні відповідним вісям першої пластинки. Складові світлового променя уздовж головних осей другої пластинки мають вигляд:

$$A_{10} = A_8 \cos \beta + A_9 \sin \beta = \frac{a}{\sqrt{2}} (\cos \beta \cos(\omega t + \beta - \Delta) + \sin \beta \sin(\omega t + \beta)),$$

$$A_{11} = -A_8 \sin \beta + A_9 \cos \beta = -\frac{a}{\sqrt{2}} (\sin \beta \cos(\omega t + \beta - \Delta) - \cos \beta \sin(\omega t + \beta)).$$

Промені виходять з другої чвертьхвильової пластинки з додатковою кутовою різницею фаз $\pi/2$ і записуються у вигляді:

$$A_{12} = \frac{a}{\sqrt{2}} \cos \beta \cos(\omega t + \beta - \Delta) + \frac{a}{\sqrt{2}} \sin \beta \sin(\omega t + \beta),$$

$$A_{13} = \frac{a}{\sqrt{2}} \sin \beta \sin(\omega t + \beta - \Delta) + \frac{a}{\sqrt{2}} \cos \beta \cos(\omega t + \beta).$$

Якщо площина пропускання аналізатора перпендикулярна площині пропускання поляризатора, то світло, що виходить з аналізатора описується співвідношенням:

$$A_{14} = \frac{1}{\sqrt{2}} (A_{12} - A_{13}) = a \sin \frac{\Delta}{2} \sin \left(\omega t + 2\beta - \frac{\Delta}{2} \right).$$

$$\text{Його інтенсивність дорівнює } J = 2a^2 \sin^2 \frac{\Delta}{2}.$$

Таким чином, у коловому полярископі є єдина умова згасання світла $\Delta = 2\pi m$, $m = 0, \pm 1, \dots$. Воно дає картину смуг або ізохром в залежності від застосовуваного джерела світла: при білому світлі видно ізохром, а при монохроматичному – смуги. Величину m називають порядком смуги, вона встановлюється підрахунком кількості затемнень, які пройшли через досліджувану точку під час поступового навантаження моделі, або по загальній картині смуг на екрані або на фотографії. Смуги нумерують від особливої точки (або лінії) – точки (або смуги) нульового порядку. Розглянемо докладніше питання про знаходження таких точок.

Умова згасання світла: $\Delta = \frac{\omega}{c} (\sqrt{k_1} - \sqrt{k_2}) h = \frac{\omega(k_1 - k_2)}{c(\sqrt{k_1} + \sqrt{k_2})} h \approx \frac{\omega(k_1 - k_2)}{2c\sqrt{k_0}} h = \frac{\omega C(\sigma_1 - \sigma_2)}{2c\sqrt{k_0}} h$. В силу малості ефекту оптичної анізотропії використаємо наближену рівність $\sqrt{k_1} + \sqrt{k_2} \approx \sqrt{k_0}$.

Таким чином, умова згасання:

$$\sigma_1 - \sigma_2 = \frac{4\pi c \sqrt{k_0}}{\omega C} \frac{m}{h} \quad (1)$$

Введемо позначення $\sigma_0^{(1,0)} \equiv \frac{4\pi c \sqrt{k_0}}{\omega C} = \frac{2\lambda \sqrt{k_0}}{C}$. Ця величина називається ціною смуги матеріалу. Вона, вочевидь, залишається незмінною для всіх моделей, зроблених з одного і того ж матеріалу, тому що константи k_0 і C для них однакові. Тарувальний дослід, з якого знаходиться ціна смуги матеріалу, буде описаний нижче. Використовуючи введenu величину $\sigma_0^{(1,0)}$, умова (1) запишемо у вигляді

$$\sigma_1 - \sigma_2 = \sigma_0^{(1,0)} \frac{m}{h}.$$

Це співвідношення отримало назву основного закону методу фотопружності. Виходячи із нього, якщо в якійсь точці навантаженої моделі $\sigma_1 = \sigma_2$, то в цій точці умова згасання виконується, і при цьому $m = 0$. На картині ізохром в місцях, відповідних $m = 0$, видно чорні точки або смуги. На картині ізоклін, в точках їх перетину $\sigma_1 = \sigma_2$, значить, точки нульового порядку можна визначити і по картині ізоклін. Від цих точок відрховується порядок інших смуг.

Визначення компонент тензора напружень в плоскій моделі. Описаний вище метод вимірювання тиску дозволяє визначити напрями головних осей тензора напружень і різниця його головних компонент. Для відшукування кожної з головних компонент окремо потрібне додаткове дослідження.

Відомо досить велика кількість методів поділу напружень. Ці методи можна умовно розбити на дві групи:

- 1) методи, що вимагають постановки додаткових експериментів;
- 2) методи, що використовують диференціальні рівняння теорії пружності.

До першої групи належать похиле просвічування, вимір поперечних деформації, метод електроаналогії інші.

Спосіб похилого просвічування полягає у просвічуванні моделі під деяким кутом до її поверхні. Якщо в деякій точці моделі виміряти відносну різницю ходу при просвічуванні її по нормалі до поверхні і під деяким кутом до нормалі, то цього буде достатньо для визначення компонент тензора напружень в даній точці.

Вимірювання поперечної деформації e_3 моделі дозволяють за допомогою закону Гука знайти суму головних напружень $\sigma_1 + \sigma_2$, оскільки в разі плоского напруженого стану має місце співвідношення

$$e_3 = -\frac{\nu}{E} (\sigma_1 + \sigma_2),$$

де E – модуль Юнга, ν – коефіцієнт Пуассона.

Для вимірювання деформації, застосовуються інтерферометричні методи. При інтерферометричній вимірах різниця між порядками інтерференційних смуг до навантаження і при навантаженні характеризує зміну товщини моделі. Слід зазначити, що за допомогою картин інтерференційних смуг можна визначити величини деформації по всій досліджуваній області.

Методом електроаналогії отримують величини деформації, задаючи на контурі листа токопровідного паперу, вирізаного за кресленням моделі, різниці потенціалів, відповідні величинам деформації на контурі моделі. Методи аналогії взагалі базується на формальному збігу рівнянь, що описують різні фізичні явища, в даному випадку, розподіл електричного потенціалу і суми головних напружень в плоскій моделі.

З другої групи методів поділу напружень найбільш відомий метод різниці дотичних напружень, пов'язаний з чисельним інтеграцією рівнянь рівноваги плоскої задачі в різних системах координат.

У прямокутній системі координат X, Y рівняння рівноваги плоскої задачі (при відсутності об'ємних сил) мають вигляд

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} = 0, \quad \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} = 0 \quad (2)$$

Інтегруючи перше рівняння з системи (2) уздовж основного перетину – прямий, що збігається з віссю X (рис. 6), отримаємо

$$(\sigma_x)_n = \sigma_{x,0} - \int_0^n \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} dx,$$

де $\sigma_{x,0}$ – напруга в початковій точці інтегрування.

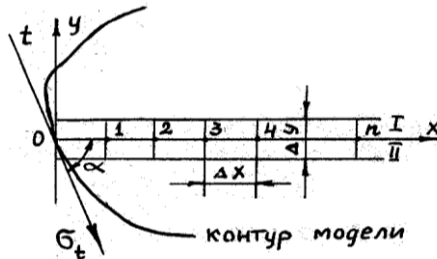


Рис. 6 Визначення величини дотичних напружень

Використовуємо спосіб чисельного інтегрування з двома додатковими перетинами I та II. Проведемо дві допоміжні прямі, паралельні OX. Наближене значення $\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y}$ в будь-якій точці прямої можна отримати, склавши вираз

$$\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} \approx \frac{(\tau_{xy})_I - (\tau_{xy})_{II}}{\Delta y} = \frac{\Delta \tau_{xy}}{\Delta y},$$

де Δy – відстань між додатковими перетинами по вертикалі. Напруги τ_{xy} з індексами I і II обчислюються на прямих I і II на одній вертикалі. У даному випадку перше рівняння (2) замінимо кінцево-різницевою рівнянням, вирішуючи яке відносно сіткових значень $(\sigma_x)_n$, отримаємо

$$(\sigma_x)_n = \sigma_{x,0} - \sum_0^n \frac{\Delta \tau_{xy}}{\Delta y} \Delta x.$$

Тут Δy – постійна, а величина Δx обирається довільно, залежно від необхідної точності обчислень. Величини дотичних напружень τ_{xy} в точках прямої OX і на допоміжних прямих (рис. 6) обчислюються наступним чином [8]:

$$\tau_{xy} = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \sin 2\alpha.$$

При цьому використовуються дані, одержувані поляризаційно-оптичним методом. Напруга в початковій точці інтегрування $\sigma_{x,0}$ зазвичай береться на вільному контурі моделі, де

$$\sigma_{x,0} = \sigma_t \cos^2 \alpha.$$

У даному випадку α – кут, утворений віссю X і дотичній тдо контуру, σ_t – головне напруга, що діє на ділянці, нормаль до якої збігається з дотичною до контуру (нормальна напруга на вільному контурі дорівнює нулю). Остання формула легко виводиться з співвідношень між компонентами тензора напружень в системі координат X, Y і в головних осях [8]

$$\sigma_x = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} + \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \cos 2\alpha,$$

$$\sigma_y = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} - \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \cos 2\alpha,$$

$$\tau_{xy} = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \sin 2\alpha$$

Дійсно, вважаючи в першому з них $\sigma_2 = 0$, отримаємо шуканий вираз для граничного значення напруги σ_x . Компонента тензора напруги σ_y визначаються по знайденим значенням σ_x з виразу

$$\sigma_x - \sigma_y = (\sigma_1 - \sigma_2) \cos 2\alpha$$

За допомогою методу різниці дотичних напружень можна знайти розподіл напружень уздовж будь-якої прямої, паралельної одній з осей координат, а при збільшенні числа перетинів – у всій області, що досліджується.

Порядок виконання дослідження. Грунтуючись на даних про поляризаційно-оптичний метод можна сформулювати наступний порядок проведення дослідження:

1. Для визначення ціни смуги матеріалу $\sigma_0^{(1,0)}$ проводиться тарувальне дослідження на диску, що стискається по діаметру.
2. У навантаженому зразку спостерігаються картини ізохром і смуг, ізокліни різних параметрів. По зображенню картини смуг визначаємо порядок смуги в довільній точці.
3. Методом різниці дотичних напружень проводиться визначення компонент тензора напружень в необхідних перетинах моделі.

Висновки. Висновки виконаного дослідження можна сформулювати наступним чином.

У СумДУ на базі кафедри Загальної механіки і динаміки машин є всі можливості для проведення досліджень поляризаційно-оптичним методом із використанням полярископу БПУ (ІМАШ-2).

Просторовий ескіз моделі виробляється у вигляді пластини, що відображає фронтальну проекцію золотника розподільника з гідравлічним centruванням. Модель виконується із оптично чутливого матеріалу ЕД-6М.

Визначені наступні етапи дослідження напруженого моделі золотника розподільника:

- виконання тарировочного дослідження;
- дослідження зразка і спостереження картини ізохром і ізоклін;
- визначення компонентів тензру напружень у потрібному переті моделі.

Список використаних джерел:

1. Наземцев, А. С. Гидравлические и пневматические системы. Часть 1. Пневматические приводы и средства автоматизации: Учебное пособие – Москва: ФОРУМ. – 2004.
2. Экспериментальные методы исследования деформаций и напряжений в конструкциях/ под ред. Н. И. Пригоровского – Москва: Наука. – 1977.
3. Тареев, Б. М. Физика диэлектрических материалов/ Б. М. Тареев. – Москва: Энергия. – 1973.
4. Александров А. Я. Поляризационно-оптические методы механики деформируемого тела / А. Я. Александров, М. Х. Ахметзянов. – Москва: Наука – 1973.
5. Виноградова, М. Б. Теория волн. / М. Б. Виноградова, О. В. Руденко, А. П. Сухоруков. – Москва: Наука. – 1979.
6. Писаренко, Г. С. Несущие и светопрозрачные элементы конструкций из стекла / Г. С. Писаренко, К. К. Амелянович, И. Б. Каринцев ; Под ред. Г.С. Писаренко. – Киев : Наук.думка, – 1987.
7. Лозовский, В. Н. Надежность и долговечность золотниковых и плунжерных пар / В. Н. Лозовский. – Москва : Машиностроение – 1971.
8. Писаренко, Г. С. Сопrotивление материалов / Г. С. Писаренко, Б. М. Ружицкий. – Киев :Вицашк. – 1984.

Рецензент:

Ковальов І.О. к.т.н, професор, завідувач кафедри Прикладної гідроаеромеханіки СумДУ

Стаття надійшла до редакції 15.09.2019