

УДК 539.319

ВИЗНАЧЕННЯ ПИТОМОЇ ЕНЕРГІЇ РУЙНУВАННЯ МАТЕРІАЛУ ЗА ЗСУВНОЇ ДЕФОРМАЦІЇ

Р. О. ШИШКОВСЬКИЙ

Національний університет "Львівська політехніка"

Наведено методику визначення енергії деформування та руйнування матеріалу за зсувної деформації зі застосуванням методу цифрової кореляції зображень. Знайдені характеристики використовують під час розрахунку напружено-деформованого стану та ресурсу роботи бурових колон, валів гідротурбін за згину та кручення.

Ключові слова: *кручення, зсув, питома енергія руйнування, локальна деформація, метод цифрової кореляції зображень.*

Вступ. Для обґрунтування безпечного терміну експлуатації та залишкового ресурсу елементів конструкцій, які працюють упродовж тривалого періоду, необхідно врахувати всі впливи на зміну механічних характеристик матеріалу. При цьому важливим є реальний напружено-деформований стан, який формується за дії складного експлуатаційного навантаження. Щоб визначити залишковий ресурс роботи валів гідротурбін, бурових колон в експлуатаційних умовах, необхідно дослідити поточний енергетичний стан (енергетичні втрати) матеріалу за зміною деформаційних процесів на поверхні з використанням сучасних методів моніторингу деформацій [1, 2] (скінченних елементів, клітинних автоматів, оптико-цифрових тощо). Здебільшого для визначення залишкового ресурсу роботи обладнання в умовах складного навантаження використовують характеристики міцності і довговічності матеріалу, встановлені на основі випробувань за руйнування одновісним розтягом [3, 4]. Водночас на колони бурильної техніки, вали турбін, валки прокатних станів діють деформація, розтяг та кручення. Нагромадження пошкоджень у матеріалі за експлуатаційного навантаження залежить від силової схеми деформування. Для таких випадків необхідно коректно визначити характеристики міцності як за розтягу, так і за кручення, а також за сумісної їх дії. Розроблено [3, 5] методику для визначення енергії деформування і руйнування матеріалу в локальному об'ємі за розтягу.

В основу пропонованої методики покладено побудову повних рівноважних діаграм за кручення, визначення істинних деформацій в локальному об'ємі та напружень з використанням методу цифрової кореляції зображень (ЦКЗ) [5]. За значенням істинних деформацій та напружень визначають питому енергію руйнування за кручення як інваріантну характеристику міцності матеріалу за зсуву.

Методика досліджень. Випробовували циліндричні зразки для визначення питомої енергії руйнування за кручення з використанням спеціального пристрою, встановленому на універсальній розривній машині EUS-20 [5]. Використовували суцільний циліндричний зразок (рис. 1).

Для кручення зразка на кінцях передбачені зрізи в середній частині циліндричної поверхні. На зовнішньому діаметрі виготовляли u-подібний концентратор для встановлення місця руйнування та контролю локальної деформації з допомогою методу ЦКЗ. Зразки виготовляли зі сталі 20ГС у стані постачання, що

відповідає матеріалу вала гідротурбіни. Стандартні механічні характеристики сталі 20ГС такі: границі плинності $\sigma_{0,2} = 260$ МПа та міцності $\sigma_B = 480$ МПа, відносні видовження $\delta_5 = 16\%$ та звуження $\Psi = 30\%$. Поверхню концентратора шліфували і наносили хаотичний крапковий малюнок спеціальною еластичною фарбою, що відповідає технології безконтактних вимірювань оптичним методом для підвищення точності [3, 5–10]. Під час закручування зразка цифровою камерою реєстрували зображення відносних зміщень V_i двох частин зразка на дні концентратора і записували в персональний комп'ютер. Верхня частина пристрою у вигляді коромисла, кінці якого контактують із вертикальними колонами машини через регульовальні динамометри сили, є для визначення крутного моменту. В центрі розташований верхній захоплювач, де зразок зрізаними фіксується від прокручування. Нижня частина зразка закріплена в захоплювачі, який з'єднаний із гідроциліндром для його скручування.

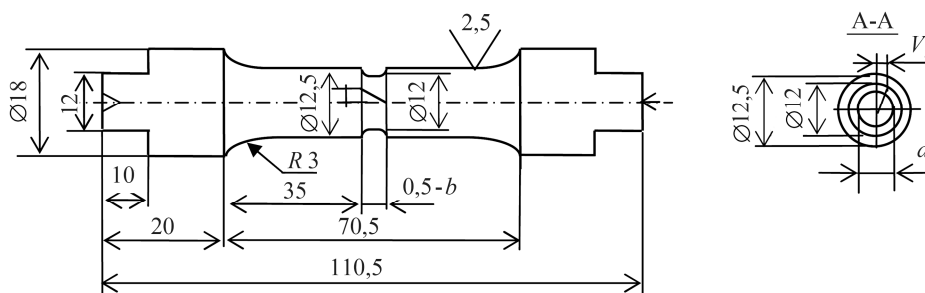


Рис. 1. Зразок для визначення характеристик матеріалу за зсуву.

Fig. 1. Specimen for determining material characteristics under shear.

Крутний момент на зразку обчислювали за формулою

$$M_k = 2P \cdot l, \quad (1)$$

де P – зусилля на динамометрі; l – плече від осі зразка до осі динамометра.

Зображення на дні концентратора реєстрували за допомогою оптичної системи промислової цифрової камери Tourson UC MOS 100 KPA з об'єктивом Xenoplan. Частота реєстрації зображень становила 0,5 fps. За результатами обробки зображень отримували розподіл взаємних зміщень V_i двох протилежних частин відносно лінії розділу на базі $b = 0,5$ mm. За результатами випробувань будували діаграму “момент кручення M –зсув V ”.

Першу партію зразків (3 шт.) закручували моментом M_1 до точки 1 (рис. 2), яка відповідає початку пластичної плинності та зародженню тріщини. За досягнення моменту M_1 в точці 1 зразок вилучали із випробувальної установки і руйнували його за силовою схемою триточкового згину. На зламі зразка вимірювали діаметр вершини утвореної від скручування тріщини.

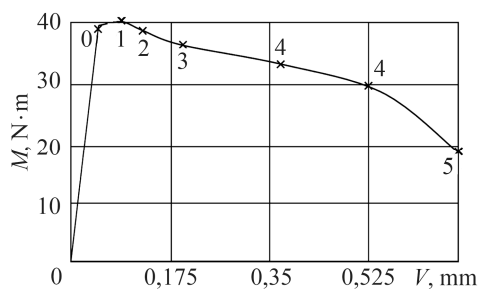


Рис. 2. Діаграма деформування M – V під час випробування зразків крученням:

× – точки реєстрації.

Fig. 2. M – V deformation diagram under torsion test:

× – points of registration.

Розраховували момент опору січення за формулою

$$W_i = \pi d_i^3 / 16, \quad (2)$$

де d_i – діаметр зразка, що відповідає i -му просуванню тріщини.

За зміщенням V_i , встановленим методом ЦКЗ [3], вираховували зсувну деформацію γ_i за формулою

$$\gamma_i = V_i / b, \quad (3)$$

де V_i – зміщення зсуву, $b = 0,5 \text{ mm}$ – база вимірювання зміщення.

Другу партію зразків навантажували до точки 2 на діаграмі (рис. 2) за такою ж методикою, в результаті встановлювали момент M_2 і момент опору січення W_2 .

Наступні партії зразків навантажували до точок 3, 4, 5 і аналогічно обчислювали W і γ для кожної. Точка 5 відповідає спонтанному руйнуванню зразка.

Для кожної точки з повної рівноважної діаграми визначали критичні напруження зсуву τ_{ci} за формулою (4)

$$\tau_{ci} = \frac{16M_{ci}}{\pi d_i^3}. \quad (4)$$

За експериментальними результатами будували істинну діаграму руйнування за зсуву τ – γ .

Результати досліджень. Під час випробування зразків одержували вихідну експериментальну криву в координатах M – V (рис. 2). На діаграмі точка 1 відповідає моменту появи тріщини в концентраторі. Ділянка 1–5 відповідає статичному підростанню тріщини від поверхні концентратора до центру зразка. Спадаюча ділянка діаграми після точки 5 відповідає спонтанному руйнуванню залишкового кільцевого перерізу зразка.

Розраховували істинні напруження τ та деформації γ на основі діаграми M – V для сталі 20ГС (див. таблицю).

Експериментальні результати під час кручення зразків

Точка навантаження на діаграмі	d , mm	M , N·m	γ ($d\phi/dx$)	τ , МПа
1	12	40,1	0,025	120
2	11,4	39,4	0,21	150
3	10,2	37,1	0,52	215
4	9,3	33,2	0,84	295
5	7,31	29,9	1,38	380

За розробленою методикою визначені локальні деформації перевищують ті, які одержані за стандартною [5].

За обчисленими значеннями істинних напружень на основі встановленої методикою ЦКЗ локальної деформації будували повну істинну діаграму деформування зразка за кручення (рис. 3).

Із діаграми визначали питому енергію руйнування як площу, що обмежена кривою діаграми і віссю деформацій. Повну енергію руйнування W_τ за кручення визначали як суму пружної складової W_1 та пружно-пластичної W_2 :

$$W_\tau = W_1 + W_2 = \int_0^{\gamma_{0,3}} \tau_1(\gamma) d\gamma + \int_{\gamma_{0,3}}^{\gamma_c} \tau_2(\gamma) d\gamma = \int_0^{\gamma_{0,3}} G \cdot \gamma_{dv} + \tau_{0,3} \int_{\gamma_{0,3}}^{\gamma_c} \left(\frac{\gamma}{\gamma_{0,3}} \right)^n d\gamma =$$

$$= \frac{1}{2} G \gamma_{0,3}^2 + \frac{G_{0,3}}{\gamma_{0,3}^n} \cdot \frac{\gamma_c^{n+1} - \gamma_{0,3}^{n+1}}{n+1}, \quad (5)$$

де $\tau_1 = G \cdot \gamma$ – зсувні напруження за пружної деформації; G – модуль зсуву; $\tau_{0,3}$ – напруження плинності за зсуву; γ – біжуче значення зсувної деформації; $\gamma_{0,3}$ – деформація, що відповідає границі плинності за зсуву; $n = 0,216$ – коефіцієнт; $W = 425,3 \text{ МПа} = 425,3 \text{ Мдж/м}^3$.

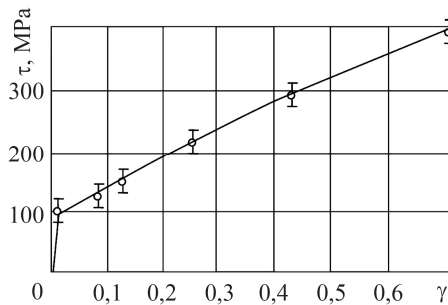


Рис. 3. Діаграма “істинні напруження τ – істинна деформація γ ” за кручення циліндричних зразків.

Fig. 3. Diagram “true stresses τ – true strain γ ” under cylindrical specimens rotation.

Порівняння питомої енергії руйнування, визначеної з класичної діаграми та повної істинної, запропонованої на основі локального підходу, показує, що значення встановлене із повної істинної діаграми є в 1,7 разів більше, ніж за класичним підходом [3].

Водночас енергія руйнування за деформації зсуву є на 10,3% менша, ніж встановлена за локальним підходом за руйнування розтягом [4]. Цю величину як інваріантну характеристику матеріалу можна використовувати під час розрахунку напружено-деформованого та граничного станів елементів конструкцій за дії зсувних деформацій.

ВИСНОВКИ

Розроблено методику побудови повних рівноважних діаграм за кручення циліндричних зразків. Визначено істинну питому енергію руйнування сталі 20ГС за зсувної деформації. Встановлено, що ця енергія в 1,7 разів перевищує енергію, знайдену за класичним підходом.

РЕЗЮМЕ. Разработана методика определения энергии деформирования и разрушения материала при сдвиге с использованием метода цифровой корреляции изображений. Установленные характеристики используют при расчете напряженно-деформированного состояния и ресурса работы буровых колонн, валов гидротурбин при их нагружении изгибом и кручением.

Ключевые слова: кручение, сдвиг, удельная энергия разрушения, локальная деформация, метод цифровой корреляции изображений.

SUMMARY. A technique for determining the energy of deformation and fracture of material under shear using the digital image correlation method is developed. The established characteristics are used for calculation of the stress-strain state and service life of drill columns and hydraulic turbine shafts under bending and torsion loading.

Keywords: torsion, displacement, specific fracture energy, local deformation, digital image correlation method.

1. Оцінка довговічності труби нафтогону з поверхневою тріщиною під двовісним блочним навантаженням / О. Є. Андрейків, Я. Л. Іваницький, З. О. Терлецька, М. Б. Кіт // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2004. – **40**, № 3. – С. 103–108.

(Evaluation of the durability of a pipe of oil pipeline with surface crack under biaxial block loading / O. E. Andreikiv, Ya. L. Ivanyts'kyi, Z. O. Terlets'ka, M. B. Kit // Materials Science. – 2004. – **40**, № 3. – P. 408–415.)

2. *Panasyuk V. V., Ivanytskyi Ya. L., and Hembara O. V.* Assessment of hydrogen effect on fracture resistance under complex-mode loading // *End. Fract. Mech.* – 2012. – **83**. – P. 54–61.
3. *Визначення локальної деформації біля концентраторів напружень методом цифрової кореляції зображень / Я. Л. Іваницький, Ю. В. Мольков, П. С. Кунь, Т. М. Ленковський, М. Войтович // Фіз.-хім. механіка матеріалів.* – 2014. – **50**, № 4. – С. 18–24.
(*Determination of the local strains near stress concentrators by the digital image correlation technique / Ya. L. Ivanyts'kyi, Yu. V. Mol'kov, P. S. Kun', T. M. Lenkovs'kyi, M. Wójtowicz // Materials Science.* – 2015. – **50**, № 4. – P. 488–495.)
4. *Методика побудови кінетичних діаграм втомного руйнування сталей за поперечного зсуву з врахуванням тертя берегів тріщини / Я. Л. Іваницький, В. М. Бойко, С. Т. Штаюра, Т. М. Ленковський // Фіз.-хім. механіка матеріалів.* – 2013. – **49**, № 6. – С. 41–45.
(*Methods for the construction of the kinetic diagrams of fatigue fracture for steels under the conditions of transverse shear with regard for the friction of crack lips / Ya. L. Ivanyts'kyi, T. M. Lenkovs'kyi, V. M. Boiko, S. T. Shtayura // Materials Science.* – 2014. – **49**, № 6. – P. 749–754.)
5. *Панасюк В. В., Іваницький Я. Л., Максименко О. П.* Аналіз пружно-пластичного деформування матеріалу зони передруйнування // *Фіз.-хім. механіка матеріалів.* – 2004. – **40**, № 5. – С. 67–72.
(*Panasyuk V. V., Ivanyts'kyi Ya. L., and Maksymenko O. P.* Analysis of the elastoplastic deformation of the material in the process zone // *Materials Science.* – 2004. – **40**, № 5. – P. 648–655.)
6. *Визначення концентрації водню у зоні передруйнування біля вершини тріщини / Я. Л. Іваницький, О. В. Гембара, О. Д. Сміян, М. Ковалік // Фіз.-хім. механіка матеріалів.* – 2010. – **46**, № 6. – С. 51–55.
(*Evaluation of the concentration of hydrogen in the process zone near the crack tip / Ya. L. Ivanyts'kyi, O. V. Hembara, O. D. Smiyan, M. Kowalik // Materials Science.* – 2011. – **46**, № 6. – P. 769–774.)
7. *Study of hydrogen influence on 1020 steel by low deformation method / B. G. Mytsyk, Ya. L. Ivanytskyi, A. I. Balitskii, Ya. P. Kost', O. M. Sakharuk // Materials Letters.* – 2016. – **184**. – P. 328–331.
8. *Вибір бази вимірювання переміщень для визначення деформацій методом оптико-цифрової кореляції зображень / Я. Л. Іваницький, П. С. Кунь, Т. М. Ленковський, Ю. В. Мольков, С. Т. Штаюра // Фіз.-хім. механіка матеріалів.* – 2017. – **53**, № 6. – С. 94–98.
(*The choice of spacing in measuring displacements for the evaluation of strains by the method of optical-digital image correlation / Ya. L. Ivanyts'kyi, P. S. Kun, T. M. Lenkovs'kyi, Yu. V. Mol'kov, S. T. Shtayura // Materials Science.* – 2018. – **53**, № 6. – С. 849–854.)
9. *Оцінювання тріщиностійкості конструкційних матеріалів за мішаних макромеханізмів руйнування / Wen Guang Song, Я. Л. Іваницький, П. С. Кунь, В. М. Чирва // Фіз.-хім. механіка матеріалів.* – 2018. – **54**, № 2. – С. 70–75.
(*Evaluation of the crack resistance of structural materials for mixed macromechanisms of fracture / W.-G. Song, Ya. L. Ivanyts'kyi, P. S. Kun', V. M. Chyrva // Materials Science.* – 2018. – **54**, № 2. – P. 209–214.)
10. *Встановлення напруженого стану стінки паливного бака ракети носія оптико-цифровим методом / Я. Л. Іваницький, Ю. В. Мольков, О. П. Максименко, Д. В. Клименко, Ю. Ю. Варивода, О. Н. Кузь // Фіз.-хім. механіка матеріалів.* – 2018. – **54**, № 5. – С. 66–71.
(*Determination of the stressed state of the wall of fuel tank of a rocket carrier by the digital optical method / Ya. L. Ivanyts'kyi, O. P. Maksymenko, Yu. V. Mol'kov, D. V. Klymenko, Yu. Yu. Varyvoda, O. N. Kuz' // Materials Science.* – 2019. – **54**, № 5. – P. 678–684.)

Одержано 16.09.2019