

## МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОЦІНЮВАННЯ МІЦНОСТІ СТАЛІ ТУРБОГЕНЕРАТОРІВ ЗА СКЛАДНОГО НАВАНТАЖЕННЯ ТА ПІДВИЩЕНИХ ТЕМПЕРАТУР

Я. Л. ІВАНИЦЬКИЙ<sup>1,2</sup>, В. В. ВІРА<sup>2</sup>, В. М. ПАЛЮХ<sup>2</sup>,  
П. Ф. ХОЛОД<sup>2</sup>, О. М. ГОЛЯН<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів;

<sup>2</sup> Національний університет "Львівська політехніка";

<sup>3</sup> Національний лісотехнічний університет України, Львів

Проаналізовано деякі аспекти уточненого моделювання та визначення характеристик міцності сталі 26Х2МФ турбогенераторів за складного деформування при підвищених температурах. Вказано на важливість використання критерію руйнування, який враховує вплив нормальних і дотичних напружень на міцність сталі під складним навантаженням за підвищених температур. Побудовано діаграми граничного стану сталі за сумісної дії розтягу та закруту в умовах високих температур.

**Ключові слова:** складне навантаження, критерій гранично-рівноважного стану, діаграма граничного стану, підвищена температура.

Some aspects of adequate modeling and determining the strength of 26Х2МФ steel for turbogenerators under complex deformation at elevated temperatures are established. The importance of the use of fracture criterion, which takes into account the influence of normal and tangential stresses on the steel strength under complex loading at high temperatures is shown. The curves of the limiting state of steel under common action of tension and torsion in the conditions of high temperatures are constructed.

**Keywords:** complex load, criterion of limiting state, diagram of limit state, elevated temperature.

**Вступ.** Оцінювання міцності, довговічності та залишкового ресурсу елементів конструкцій відповідального призначення, зокрема, газотурбінного обладнання – актуальне завдання сучасного машинобудування [1, 2]. Тут найважливіше проаналізувати напружено-деформований стан за різними підходами механіки руйнування (силовим, деформаційним чи енергетичним) [3–5], враховуючи проблеми, пов'язані з теплопровідністю, термопружністю, газодинамікою тощо [6, 7]. При цьому методи розрахунку, які сформувалися ще в середині минулого століття, з появою обчислювальної техніки та розвитком методик експериментальних досліджень, потребують перегляду. Тому, визначаючи ресурс турбоагрегатів теплових електростанцій та газотурбінних двигунів, які працюють за підвищених температур та складного експлуатаційного навантаження, необхідно вивчити, залучаючи сучасні підходи (наприклад, методи машинного навчання із урахуванням експлуатаційних чинників [8, 9], безконтактні методи вимірювання локальних деформацій [5–11] тощо), зміну фізико-механічних характеристик та запропонувати критерій, який описує поведінку матеріалу за сумісної дії розтягу та закруту. Щоб зберегти роботоздатність турбоагрегатів, слід забезпечити термомеханічну довговічність ротора та лопатей під час їх маневрових режимів. Елементи конструкцій (вал ротора, лопаті тощо) працюють за підвищених темпе-

ратур і складного навантаження (згин і закрут). У більшості випадків не враховують їх складний напружено-деформований стан (НДС), а тільки одну компоненту деформації і, відповідно, напруження. Оцінювати так в локальному об'ємі металу НДС не завжди правомірно, оскільки це може призвести до суттєвих відхилень розрахункових значень від реального. При підвищеній (до 600°C) температурі в матеріалі змінюються умови пружно-пластичного деформування, а отже, і досягнення граничного стану, що впливає на загальний ресурс роботи турбогенераторів теплових електростанцій та газотурбінних двигунів.

Нижче досліджено вплив підвищених температур за складного навантаження на механічні характеристики сталі 26Х2МФ, з якої виготовляють вал парової турбіни, що експлуатується при температурі до 600°C в умовах згину та закруту. Під час тривалої роботи в матеріалі нагромаджуються структурні пошкодження під впливом нормальних і зсувних напружень. Зміна умов навантаження впливає на пластичне деформування матеріалу та настання граничного стану. Тому, щоб оцінити міцність та встановити надійний термін експлуатації, необхідно визначити механічні характеристики сталі за умов, наближених до експлуатаційних. Для цього з неї виготовляли циліндричні зразки (рис. 1), які випробовували за схемою одноосісного розтягу, закруту та їх сумісної дії.

Використовували універсальну гідравлічну розривну машину Heskert EUS-20 з додатковим пристроєм для навантаження зразка закрутом (рис. 2). Розтягували зразок безпосередньо від приводу машини, реєструючи динамометром зусилля розтягу та дистанційно методом цифрової кореляції зображень (ЦКЗ) – видовження зразка [11, 12], який дає можливість вимірювати поздовжні та зсувні переміщення поверхні зразків за підвищеної температури. Для цього застосовували цифрову камеру типу Tourcam UCMOS 10000 KPA, зображення з якої реєстрували на комп'ютері із відповідним програмним забезпеченням (похибка  $\pm 0,05$  mm). Аналогові сигнали від динамометрів реєстрували перетворювачем L-Card F440 та підсилювали. Аналізували та обробляли отримані дані, використовуючи програму Power Graph 3.3.8. Нагрівали зразки та контролювали температуру електричним нагрівачем з керамічною ізоляцією від автотрансформатора та цифрового регулятора температури РТ-0102. За результатами випробувань зразків на розтяг будували діаграми деформування в координатах умовні напруження  $\sigma$ –відносна деформація  $\epsilon$ .

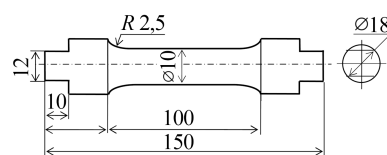
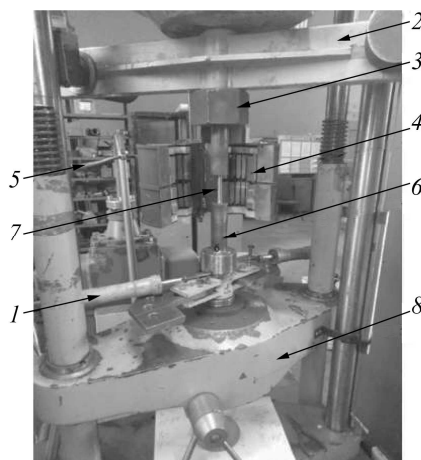


Рис. 1. Зразок для випробувань.

Fig. 1. Test specimen.

Рис. 2. Випробувальна установка: 1 – пристрій для закруту; 2 – важіль; 3 – захопи; 4 – нагрівальний пристрій; 5 – термопара; 6 – перехідні тяги; 7 – зразок; 8 – установка EUS-20.

Fig. 2. Testing installation: 1 – torsion device; 2 – lever; 3 – captures; 4 – heating device; 5 – thermocouple; 6 – transitional thrust; 7 – specimen; 8 – installation EUS-20.



Партію зразків випробовували закрутом, використовуючи динамометри, встановлені на важелі установки, і реєстрували зусилля  $F_k$ . Момент закруту визначали як добуток сили  $F_k$  на плече  $l$ . За результатами досліджень зразків за різних темпе-

ратур розраховували граничне напруження зсуву  $\tau_c$  та відносне зміщення  $\gamma_c$ , за якими будували відповідні діаграми. Зразок закручували моментом  $M$  на кут  $\varphi$  і далі розтягували до руйнування, реєструючи критичні зусилля розтягу та видовження. Визначали критичні напруження розриву  $\sigma_c$  та деформації  $\epsilon_c$ , а також зміну граничного напруження розтягу  $\sigma_c$  від прикладеного зсувного  $\tau$ . Гранично-рівноважний стан тіла за складного навантаження визначали за критерієм типу  $(\sigma / \sigma_c)^n + (\tau / \tau_c)^n = 1$ , що враховує внесок кожного механізму у загальне руйнування.

**Результати та їх аналіз.** За результатами досліджень побудували діаграми деформування сталі 26Х2МФ та встановили граничні напруження  $\sigma_c$  і деформації  $\epsilon_c$ . Виявили (рис. 3), що граничне напруження знижується на 16%, а деформація руйнування зменшується до 20%, що свідчить про погіршення пластичних властивостей матеріалу за розтягу. Під час закруту з ростом температури випробувань напруження  $\sigma_c$  знижується до 15%, а деформація  $\epsilon_c$  зменшується до 10%.

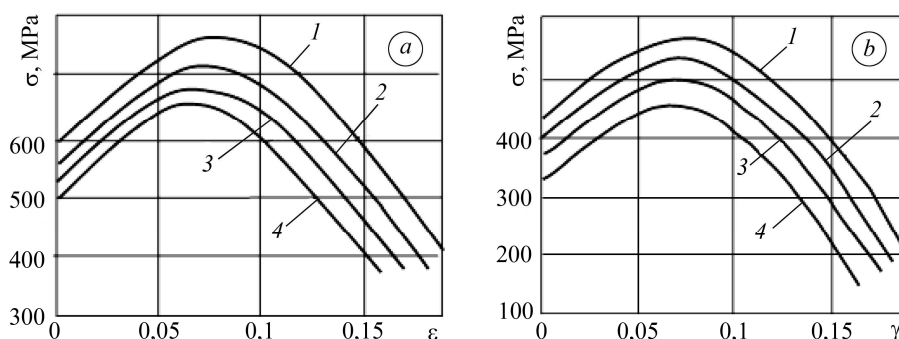


Рис. 3. Діаграми розтягу (а) та закруту (б) зразків сталі при 20°C (1); 200 (2); 400 (3) і 600°C (4).

Fig. 3. Steel tensile (a) and torsional (b) diagrams for temperatures 20°C (1); 200 (2); 400 (3) and 600°C (4).

Результати зміни механічних характеристик сталі за різних температур подано у таблиці.

#### Механічні характеристики сталі за розтягу та закруту в умовах підвищених температур

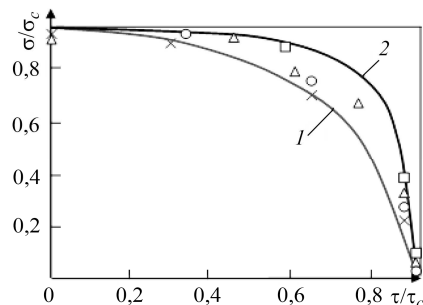
Температура випробувань, °C	Границя плинності	Границя міцності	Відносна деформація	Модуль пружності
	за розтягу $\sigma_{0,2}$ / за зсуву $\tau_{0,3}$	за розтягу $\sigma_B$ / за зсуву $\tau_B$	за розтягу $\delta_5$ / за зсуву $\gamma$	за розтягу $E$ / за зсуву $G$
	MPa		%	GPa
20	660 / 490	780 / 590	22 / 20,1	210 / 81
200	610 / 410	710 / 570	19 / 19,7	205 / 79
400	560 / 380	690 / 530	19 / 19,5	185 / 77
600	490 / 350	600 / 500	18 / 18,4	175 / 76

Виявили, що граничний стан сталі при підвищеній температурі можна визначати за критерієм  $(\sigma / \sigma_c)^2 + (\tau / \tau_c)^2 = 1$  (рис. 4, крива 1). З ростом температури від 20 до 600°C змінюються умови її руйнування, тому верхню межу руйну-

вання точніше описує критерій  $(\sigma/\sigma_c)^4 + (\tau/\tau_c)^4 = 1$ . Під час навантаження закрутом і розтягом у матеріалі відбуваються фазові перетворення, змінюються умови пластичного течіння, що впливає на його граничний стан (рис. 4, крива 2).

Рис. 4. Діаграма граничного стану сталі 26Х2МФ за складного навантаження при підвищених температурах:  
 × – 20°C; ○ – 200; △ – 400; □ – 600°C.

Fig. 4. Diagram of the limiting state of 26Х2МФ steel under complex loading at elevated temperatures:  
 × – 20°C; ○ – 200; △ – 400; □ – 600°C.



За експлуатаційного навантаження, коли відомі напруження, можна оцінювати безпечний НДС для елементів турбогенераторних теплових станцій, виготовлених зі сталі 26Х2МФ, які працюють при підвищених температурах.

1. *Comprehensive rotor service life study for high & intermediate pressure cylinders of high power steam turbines* / V. Peshko, O. Chernousenko, T. Nikulenkova, and A. Nikulenkov // Propulsion and Power Research – China: National Laboratory for Aeronautics and Astronautics. – 2016. – **5**, № 4. – P. 302–309.
2. *Dan Burnes and Alejandro Camou. Impact of fuel composition on gas turbine engine performance* // J. Eng. Gas Turbines Power. – 2019 – **141**, № 10. – P. 1–12.
3. *Methods for the construction of the diagrams of fatigue crack-growth rate of materials* / O. P. Ostash, V. V. Panasyuk, I. M. Andreiko, R. V. Chepil, V. V. Kulyk, and V. V. Vira // Materials Science. – 2007. – **43**, № 4. – P. 479–491.
4. *Study of hydrogen influence on 1020 steel by low deformation method* / B. G. Mytsyk, Ya. L. Ivanyts'kyi, A. I. Balitskii, Ya. P. Kost', and O. M. Sakharuk // Mat. Letters. – 2016. – **184**. – P. 328–331.
5. *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* / Y. L. Ivanyts'kyi, T. M. Lenkovs'kyi, V. M. Boiko, and S. T. Shtayura // Materials Science. – 2018. – **54**, № 3. – P. 361–367.
6. *Heat transfer analysis in a single spool gas turbine by using calculated-estimated coefficients with the finite element method* / Geraldo Creci, Márcio Teixeira de Mendonça, João Carlos Menezes, and João Roberto Barbosa // Appl. Sci. – 2020. – **10**, № 23. – 8328.
7. *Третяк О. В. Міцність вузлів турбогенераторів і гідрогенераторів великої потужності: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук.* – Харків, 2020. – 48 с.
8. *Determination of the best microstructure and titanium alloy powders properties using neural network* / Z. A. Duriagina, R. O. Tkachenko, A. M. Trostianchyn, I. A. Lemishka, A. M. Kovalchuk, V. V. Kulyk, and T. M. Kovbasyuk // J. of Achievements in Mat. and Manufacturing Eng. – 2018. – **87**, № 1. – P. 25–31.
9. *Investigation of the microstructure and Properties of TRIP 800 steel subjected to low-cycle fatigue* / Z. M. Rykavets, J. Bouquerel, J.-B. Vogt, Z. A. Duriagina, V. V. Kulyk, T. L. Terpla, L. I. Bohun, and T. M. Kovbasyuk // Progress in Physics of Metals – 2019. – **20**, № 4. – P. 620–633.
10. *О поддержании эксплуатационной надежности турбогенераторов* / В. И. Завидей, Н. В. Крупенин, А. В. Голубев, В. И. Волошин, М. А. Вихров, С. В. Милованов // Энергетик. – М.: НТФ “Энергопрогресс”, 2008. – С. 44–45.
11. *Mol'kov Yu. V. Application of the method of digital image correlation to the construction of stress-strain diagrams* // Materials Science. – 2013. – **48**, № 6. – P. 832–837.
12. *The choice of spacing in measuring displacements for the evaluation of strains by the method of optical-digital image correlation* / Y. L. Ivanyts'kyi, P. S. Kun, T. M. Lenkovs'kyi, Yu. V. Mol'kov, and S. T. Shtayura // Materials Science. – 2018. – **53**, № 6. – P. 849–854.

Одержано 23.07.2021