

## ВПЛИВ ЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА ТЕРТЯ НА ДІАГРАМУ ПРОДАВЛЮВАННЯ ДИСКОВОГО МІКРОЗРАЗКА З УРАХУВАННЯМ ПРОЦЕСУ РУЙНУВАННЯ

<sup>1</sup>Інститут проблем міцності імені Г. С. Писаренка НАН України

Визначення зміни механічних характеристик, зокрема границі текучості та міцності, матеріалів конструкцій впродовж строку їх служби під дією експлуатаційних навантажень та робочого середовища є дуже важливою задачею забезпечення надійної та безпечної експлуатації працюючого обладнання. Застосування для цього випробувань на одновісний розтяг не завжди можливе через обмеженість наявності матеріалу для виготовлення зразків та неминуче порушення цілісності конструкції. Через це розробляються непрямі методи контролю, одним з яких є метод продавлювання дискових мікроразривків. Суть методу полягає у продавлюванні індентором у формі кулі закріпленого певним чином зразка із записуванням діаграми процесу його деформування в координатах «навантаження»—«глибина продавлювання». За параметрами цієї діаграми з використанням кореляційних залежностей визначаються механічні характеристики. Для вдосконалення цього методу необхідно використовувати чисельне моделювання, одним з параметрів якого є значення коефіцієнта тертя в контактних парах. Метою роботи є дослідження впливу вибору коефіцієнта тертя на діаграму продавлювання під час чисельного моделювання процесу деформування дискового мікроразривка з урахуванням процесу руйнування. Для врахування процесу руйнування використано модель Gurson–Tvergaard–Needleman (GTN). За результатами дослідження встановлено, що зі зміною коефіцієнта тертя від 0 до 0,36, діаграми продавлювання на стадіях пружного й пружно-пластичного деформування дискового зразка суттєво не відрізняються. З досягненням максимального навантаження перед руйнуванням спостерігається розбіжність в діаграмах. Встановлено, що збільшення коефіцієнта тертя призводить до зменшення максимального навантаження та глибини продавлювання під час руйнування. Різниця максимальних значень навантаження за зазначеної зміни величини коефіцієнта тертя складає 27 %, глибини продавлювання — 14 %. Визначено, що найближчою до експериментальної кривої «навантаження»—«глибина продавлювання» є крива, визначена чисельним моделюванням з коефіцієнтом тертя, який дорівнює 0,18.

**Ключові слова:** small punch test, метод продавлювання дискових мікроразривків, границя текучості, границя міцності, дисковий мікроразривок, метод скінченних елементів, коефіцієнт тертя.

### Вступ

Механічні характеристики матеріалів працюючого обладнання можуть змінюватись упродовж строку служби під впливом експлуатаційних навантажень та робочого середовища. Свочасне виявлення критичних змін їхніх значень є дуже важливою задачею забезпечення надійної та безпечної експлуатації об'єктів критичної інфраструктури. До таких характеристик належать, зокрема, границі текучості та міцності.

Найкоректнішим методом визначення характеристик міцності є випробування на одновісний розтяг. Проте застосовувати такий метод до працюючого обладнання найчастіше неможливо через обмеженість матеріалу для виготовлення зразків та порушення при цьому цілісності конструкції, а також потребу в дорогій випробувальній техніці. Тому на сьогодні приділяється велика увага дослідників до розробки непрямих методів контролю, які б дозволили за наявності мінімального об'єму матеріалу з мінімальним пошкодженням конструкції визначити механічні характеристики з достатньою достовірністю. До таких методів можна віднести метод продавлювання дискових мікроразривків [1]—[3], який в англійській літературі має назву «small punch test». Суть методу полягає у продавлюванні індентором у формі кулі закріпленого певним чином зразка з записуванням діаграми процесу його деформування в координатах «навантаження»—«глибина продавлювання». Дис-

ковий зразок певної товщини та діаметра виготовляється з мінівирізок досліджуваного матеріалу. Механічні характеристики визначаються з використанням кореляційних залежностей між параметрами діаграми продавлювання та відповідними характеристиками на одновісний розтяг [4].

Для вдосконалення методу провалювання дискових мікрозразків необхідно використовувати чисельне моделювання, одним з параметрів якого є коефіцієнт тертя у контактних парах. В літературі зустрічається використання різних значень коефіцієнта. Для прикладу, автори [5] використовували значення коефіцієнта тертя рівним 0,1, а в [6] — 0,3. Врахування тертя у контактних парах може мати вплив як на саму діаграму продавлювання, так і на відповідні механічні характеристики, визначені за параметрами цієї діаграми.

*Метою роботи* є дослідження впливу вибору значення коефіцієнта тертя на діаграму продавлювання в чисельному моделюванні процесу деформування дискового мікрозразка з урахуванням процесу руйнування.

### Розробка чисельної моделі

Щоб дослідити вплив вибору коефіцієнта тертя на діаграму продавлювання в чисельному моделюванні процесу деформування дискового мікрозразка з урахуванням процесу руйнування використано програмний комплекс, що базується на методі скінчених елементів. Внаслідок осової симетрії моделі розглядалась вісесиметрична контактна задача в пружно-пластичній постановці.

Геометричні параметри моделі, показані на рис. 1а, вибрані з урахуванням конструкції випробувального обладнання [7]. При цьому індентор та шток його оправи (розглядались як одне ціле), а також верхня й нижня затискні матриці моделювались для спрощення розрахунків ідеально жорсткими тілами.

Переміщення зразка, штока оправи та індентора в радіальному напрямку обмежувалось, як показано на рис. 1б. Нижня та верхня матриці обмежувались в переміщенні жорстким защемленням. Для моделювання взаємодії зразка з іншими конструктивними елементами обладнання створено три контактні пари: індентор—зразок, зразок— верхня затискна матриця та зразок—нижня затискна матриця. Граничні умови контактних пар задавались в припущенні, що сила тертя на поверхні контакту має нормальну і тангенціальну складові. Зразок моделювався вісесиметричними чотирикутними елементами розміром 0,02 мм.

В якості модельного матеріалу вибрано сталь 45 в стані поставки з характеристиками: границя міцності  $\sigma_b = 677,6$  МПа; границя текучості  $\sigma_{0,2} = 353,9$  МПа; модуль Юнга  $E = 199600$  МПа. Істинні діаграми деформування, що використовувались в чисельному моделюванні, отримані за результатами випробувань зразків на одновісний розтяг.

В першому наближенні матеріал моделювався без урахування процесу руйнування. Отримана таким чином діаграма продавлювання суттєво відрізнялася від експериментальної (рис. 2). Для врахування процесу руйнування використано модель Gurson – Tvergaard – Needleman (GTN) [8]—[10]. Така модель описує поведінку в'язкого пористого матеріалу і враховує як утворення й ріст пор, так і механізм в'язкого руйнування, викликаний їх злиттям.

Згідно з цією моделлю, умова пластичності пористого матеріалу має вигляд

$$\varphi = \left( \frac{\sigma_{eqv}}{\sigma_y} \right)^2 + 2q_1 f^* \cosh \left( \frac{3}{2} q_2 \frac{\sigma_0}{\sigma_{eqv}} \right) - \left[ 1 + q_3 (f^*)^2 \right] = 0, \quad (1)$$

де  $\sigma_{eqv}$  — інтенсивність дотичних напружень,  $\sigma_y$  — границя текучості матеріалу,  $f$  — пористість.

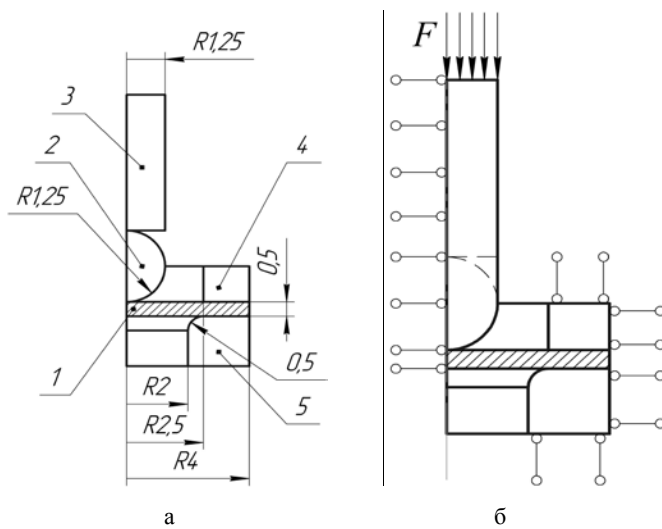


Рис. 1: а — геометричні параметри моделі; б — схема навантаження для чисельного моделювання процесу деформування дискового мікрозразка; 1 — зразок; 2 — індентор; 3 — шток оправи індентора; 4 і 5 — верхня та нижня затискні матриці

Параметри моделі  $q_1, q_2, q_3$  отримані Твергаардом [10];  $\sigma_0 = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/3$ ;  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  — головні напруження.

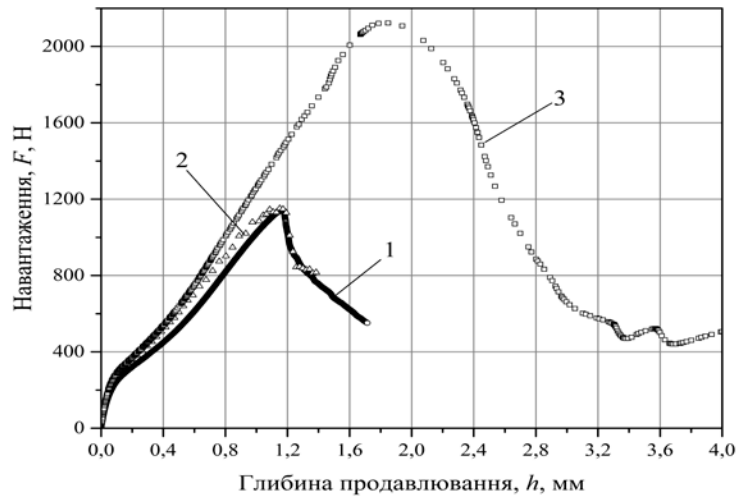


Рис. 2. Діаграми деформування дискових мікрозразків: 1 — експериментальна; 2 — розрахункова з урахуванням моделі GTN; 3 — розрахункова без урахування моделі GTN

Вираз для  $f^*(f)$  можна представити в такому вигляді:

$$f^* = \begin{cases} f, & \text{якщо } f \leq f_c, \\ f_c + \frac{(f_U^* - f_c)}{(f_F - f_c)}(f - f_c), & \text{якщо } f_c < f < f_F, \\ f_U^*, & \text{якщо } f \geq f_F, \end{cases} \quad (2)$$

де  $f_c$  — значення коефіцієнта  $f$ , за якого в певному елементарному об’ємі матеріалу починається злиття пор;  $f_F$  — критичне значення коефіцієнта  $f$ , за якого цей елементарний об’єм втрачає несучу здатність;  $f_U^*$  набуває значення

$$f_U^* = \frac{q_1 + \sqrt{q_1^2 - q_3}}{q_3}. \quad (3)$$

Зміна пористості матеріалу відбувається за рахунок росту та зародженню пор

$$\dot{f} = \dot{f}_{nuc} + \dot{f}_{gr} = B(\dot{\sigma}_y + \dot{\sigma}_0) + D\dot{\epsilon}_m^{pl} + (1 - f)\dot{\epsilon}_{ij}^{pl}. \quad (4)$$

Згідно з [11], параметри  $B$  і  $D$  вибираються, припускаючи, що закономірність росту пор відповідає нормальному закону розподілу

$$D = \frac{f_N}{S_N \sqrt{2\pi}} \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{\epsilon_m^{pl} - \epsilon_N}{S_N} \right)^2 \right], \quad B = 0, \quad (5)$$

де  $\epsilon_N$  — середня величина, а  $S_N$  — дисперсія нормального розподілу інтенсивності деформацій, за якої зароджуються пори;  $f_N$  — об’ємна доля пор, що зароджуються.

Для визначення параметрів моделі GTN проведено значну кількість розрахунків до досягнення задовільної збіжності чисельної та експериментальної діаграми продавлювання. При цьому значення коефіцієнта тертя вважалось рівним 0. Отримані значення параметрів наведені в табл. 1.

Таблиця 1

Значення параметрів моделі GTN

$q_1$	$q_2$	$q_3$	$\epsilon_N$	$S_N$	$f_N$	$f_c$	$f_F$
1,5	1	2,25	0,3	0,1	0,01	0,0005	0,28

### Результати досліджень

З метою визначення коефіцієнта тертя проведено чисельні розрахунки з різними його значеннями в межах від 0 до 0,36. На рис. 3 показано діаграми продавлювання дискового мікрорізка зі сталі 45 в координатах «навантаження»—«глибина продавлювання» за використання коефіцієнтів тертя, рівних 0; 0,06; 0,12; 0,18; 0,24; 0,30 та 0,36. Зовнішній вигляд зруйнованого зразка за результатами чисельного моделювання та експериментальних досліджень показано на рис. 4.

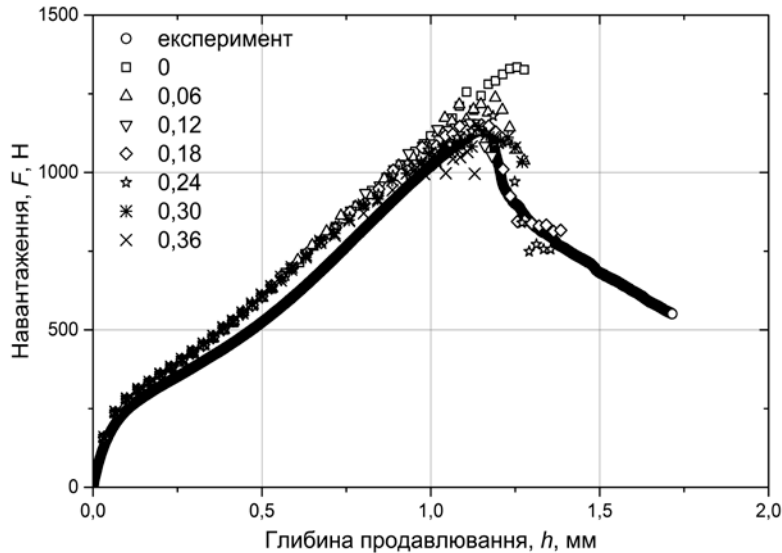


Рис. 3. Діаграми деформування дискового мікрорізка зі сталі 45 з різними коефіцієнтами тертя

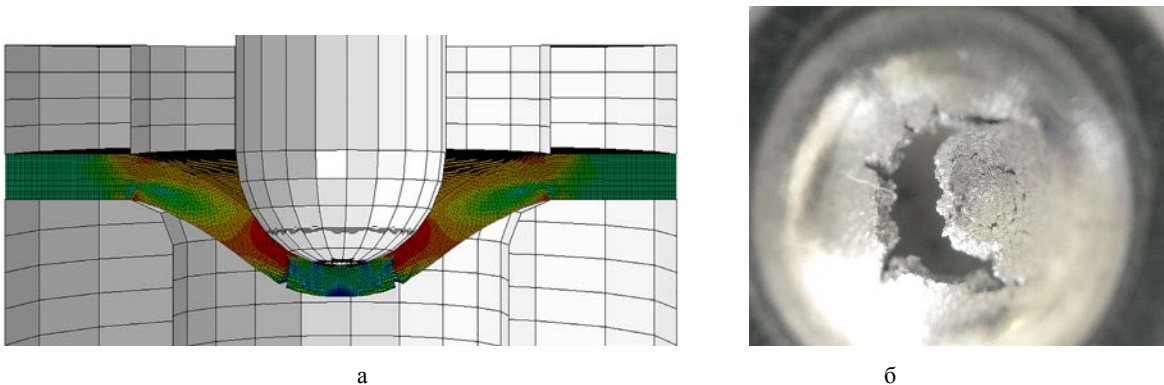


Рис. 4. Зовнішній вигляд зруйнованого зразка: а — за результатами чисельного моделювання; б — в результаті експериментальних досліджень

Як видно з представлених результатів, зі зміною коефіцієнта тертя від 0 до 0,36, діаграми продавлювання на стадіях пружного й пружно-пластичного деформування дискового зразка суттєво не відрізняються. На цьому етапі площа контакту між індентором та зразком сягає близько  $0,5 \text{ мм}^2$ . У разі додавання до деформацій згину деформацій розтягу площа контакту зростає в 5—6 разів з досягненням максимального значення навантаження перед руйнуванням, за рахунок чого спостерігається деяка розбіжність в отриманих діаграмах. З проведених досліджень можна зробити висновок, що збільшення коефіцієнта тертя призводить до зменшення максимального навантаження та глибини продавлювання при руйнуванні. Різниця максимальних значень навантаження за коефіцієнтів тертя, рівних 0 і 0,36, складає 27 %, глибини продавлювання — 14 %. Найближчою до експериментальної кривої «навантаження»—«глибина продавлювання» є крива, визначена чисельним моделюванням з коефіцієнтом тертя, що дорівнює 0,18.

### Висновки

Проведено дослідження впливу значень коефіцієнта тертя на діаграму продавлювання в чисельному моделюванні процесу деформування дискового мікрорізка з урахуванням моделі руйну-

вання GTN. Встановлено, що зі зміною коефіцієнта тертя від 0 до 0,36 діаграми продавлювання на стадіях пружного й пружно-пластичного деформування дискового зразка суттєво не відрізняються. Проте, з досягненням максимального значення навантаження перед руйнуванням спостерігається розбіжність в отриманих діаграмах. При цьому різниця максимальних значень навантаження за коефіцієнтів тертя, рівних 0 і 0,36, складає 27 %, глибини продавлювання — 14 %. Встановлено, що найближчою до експериментальної діаграми продавлювання є діаграма, визначена чисельним моделюванням з коефіцієнтом тертя, який дорівнює 0,18.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] CWA 15627:2007 *Small Punch Test Method for Metallic Materials*. CEN Workshop Agreement, 2007.
- [2] A. Janča, J. Siegl, and P. Haušild, "Small Punch Test Evaluation Methods for Material Characterization," *Journal of Nuclear Materials*, vol. 481, pp. 201-213, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2016.09.015>.
- [3] V. Vorlicek, L. F. Exworthy, and P. E. J. Flewitt, "Evaluation of a Miniaturised Disc Test for Establishing the Mechanical Properties of Low Alloy Ferritic Steels," *Journal of Materials Science*, vol. 30, pp. 2936-2943, 1995. <https://doi.org/10.1007/BF00349666>.
- [4] О. А. Каток, і Р. В. Кравчук, «Порівняльний аналіз методик розрахунку характеристик механічних властивостей за результатами випробувань дискових мікрозразків,» *Вісник Хмельницького національного університету*, № 3 (273), с. 44-49, 2019. <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2019-273-3-44-49>.
- [5] T. E. Garcia, C. Rodríguez, F. J. Belzunce, and C. Suárez, "Estimation of the Mechanical Properties of Metallic Materials by Means of the Small Punch Test," *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 582, pp. 708-717, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2013.08.009>.
- [6] Z.-X. Wang, H.-J. Shi, J. Lu, P. Shi, and X.-F. Ma, "Small Punch Testing for Assessing the Fracture Properties of the Reactor Vessel Steel with Different Thicknesses," *Nuclear Engineering and Design*, vol. 238, pp. 3186-3193, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2008.07.013>.
- [7] О. А. Каток, Р. В. Кравчук, V. V. Kharchenko and M. P. Rudnits'kyi, "A Setup for Complex Investigation of Mechanical Characteristics of Structural Materials for NPP Equipment," *Strength of Materials*, vol. 51, pp. 317-325, 2019. <https://doi.org/10.1007/s11223-019-00077-6>.
- [8] A. L. Gurson, "Continuum Theorie of Ductile Rupture by Void Nucleation and Growth: Part I—Yield Criteria and Flow Rules for Porous Ductile Media," *Journal of Engineering Materials and Technology*, vol. 99, no. 1, pp. 2-15, 1977. <https://doi.org/10.1115/1.3443401>.
- [9] A. Needleman, and J. R. Rice, "Limits to Ductility Set by Plastic Flow Localization," in *Symposium on Mechanics of Sheet Metal Forming*, Warren, USA, 1977, pp. 237-267.
- [10] V. Tvergaard, and A. Needleman, "Analysis of the Cup-Cone Fracture in a Round Tensile Bar," *Acta Metallurgica*, vol. 32, no. 1, pp. 157-169, 1984. [https://doi.org/10.1016/0001-6160\(84\)90213-X](https://doi.org/10.1016/0001-6160(84)90213-X).
- [11] C. C. Chu and A. Needleman, "Void nucleation effects in biaxially stretched sheets," *Journal of Engineering Materials and Technology*, vol. 102, no. 3, pp. 249-256, 1980. <https://doi.org/10.1115/1.3224807>.

Рекомендована кафедрою опору матеріалів і прикладної механіки ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 28.04.2020

**Кравчук Роман Васильович** — молодший науковий співробітник лабораторії міцності обладнання АЕС та об'єктів підвищеної небезпеки, e-mail: [kravchuk.r@ipp.kiev.ua](mailto:kravchuk.r@ipp.kiev.ua).

Інститут проблем міцності імені Г. С. Писаренка НАН України, Київ

**R. V. Kravchuk<sup>1</sup>**

## **Influence of the Friction Coefficient Value on the Disk Microspecimens Punching Diagram Taking into Account the Fracture Process**

<sup>1</sup>G. S. Pysarenko Institute for Problems of Strength of the NAS of Ukraine

*Determining changes in mechanical characteristics, such as yield strength and tensile strength, of structural materials during their service life under the influence of operating loads and the working environment is a very important task of ensuring reliable and safe operation of working equipment. The use of uniaxial tensile tests for this purpose is not always possible because of the limited availability of material for the manufacture of specimens and the inevitable disruption of structural integrity. Therefore, indirect control methods are being developed, one of which is the small punch test method. The essence of this method consists in punching of a fixed specimen by a spherical indenter with recording the load-displacement curve. Mechanical characteristics are determined by the parameters of this diagram using correlation dependencies. In improving the methods for determining the mechanical characteristics of small punch test, there is a need to use numerical*

modeling, one of the parameters of which is the friction coefficient in contact pairs. The purpose of this work was to investigate the influence of the friction coefficient on the punching diagram in the numerical simulation of the disk microspecimen deformation process, taking into account the fracture process. The Gurson–Tvergaard–Needleman (GTN) model was used to account for the fracture process. According to the study results, it was found that when the coefficient of friction changes from 0 to 0,36, the punching diagrams at the stages of elastic and elastic-plastic deformation of the specimen do not differ significantly. When the maximum load value is reached, there is a discrepancy in the punching diagrams. It was found that an increase in the friction coefficient leads to a decrease in the maximum load and the punching depth upon failure. The difference between the maximum load values is 27 %, the penetration depth is 14 %. It was determined that the closest to the experimental load-displacement curve was the curve determined by numerical simulation with a friction coefficient equal to 0, 18.

**Keywords:** small punch test, yield strength, tensile strength, disk microspecimen, finite element method, friction coefficient.

**Kravchuk Roman V.** — Junior Research Assistant of the Laboratory of Strength of Critical Equipment of NPPs and High-Risk Facilities, e-mail: kravchuk.r@ipp.kiev.ua

**Р. В. Кравчук<sup>1</sup>**

## **Влияние значения коэффициента трения на диаграмму продавливания дисковых микрообразцов с учетом процесса разрушения**

<sup>1</sup>Институт проблем прочности имени Г. С. Писаренка НАН Украины

Определение изменения механических характеристик, в частности предела текучести и прочности, материалов конструкций в течение их срока службы под действием эксплуатационных нагрузок и рабочей среды является очень важной задачей обеспечения надежной и безопасной эксплуатации работающего оборудования. Применение для этого испытаний на одноосное растяжение не всегда возможно из-за ограниченности наличия материала для изготовления образцов и неизбежного нарушения целостности конструкции. Поэтому разрабатываются косвенные методы контроля, одним из которых является метод продавливания дисковых микрообразцов. Суть метода заключается в продавливании сферическим индентором закрепленного определенным образом образца с записью диаграммы процесса его деформирования в координатах «нагрузка»—«глубина продавливания». По параметрам этой диаграммы с использованием корреляционных зависимостей определяются механические характеристики. При усовершенствовании этого метода необходимо использовать численное моделирование, одним из параметров которого является значение коэффициента трения в контактных парах. Целью работы является исследование влияния выбора коэффициента трения на диаграмму продавливания при численном моделировании процесса деформирования дискового микрообразца с учетом процесса разрушения. Для учета процесса разрушения использована модель Gurson–Tvergaard–Needleman (GTN). По результатам исследования установлено, что при изменении коэффициента трения от 0 до 0,36, диаграммы продавливания на стадиях упругого и упругопластического деформирования дискового образца существенно не отличаются. При достижении максимального значения нагрузки перед разрушением наблюдается расхождение в диаграммах. Установлено, что увеличение коэффициента трения приводит к уменьшению максимальной нагрузки и глубины продавливания при разрушении. Разница максимальных значений нагрузки при указанном изменении значений коэффициента трения составляет 27 %, глубины продавливания — 14 %. Определено, что наиболее близкой к экспериментальной кривой «нагрузка»—«глубина продавливания» является кривая, определенная численным моделированием с коэффициентом трения, равным 0,18.

**Ключевые слова:** small punch test, метод продавливания дисковых микрообразцов, предел текучести, предел прочности, дисковый микрообразец, метод конечных элементов, коэффициент трения.

**Кравчук Роман Васильевич** — младший научный сотрудник лаборатории прочности оборудования АЭС и объектов повышенной опасности, e-mail: kravchuk.r@ipp.kiev.ua