

УДК 629.33; 621.38(075.32)

UDK 629.33; 621.38(075.32)

Сафаров Е.Г., Романюк О.О., Смачило О.В.

*Відкритий міжнародний університет розвитку людини "Україна"***МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ПОЛІАМІДІВ ПРИ ДИНАМІЧНОМУ НАВАНТАЖЕННІ**

Розвиток сучасних технологій потребує застосування нових інноваційних матеріалів. Поліаміди серії ПА, які відносяться до термопластичних полімерів, завдяки своїй міцності, зносостійкості, стійкості до хімічних речовин та термостійкості широко використовуються у конструкційних елементах автомобілів. Теплостійкість поліаміду надзвичайно затребувана в підкапотному просторі, де від пластику вимагається довготривала експлуатація при високих температурах. Близькі за властивостями до кераміки, поліаміди зі склонаповнювачем використовують у виробництві розеток і вимикачів. Поліаміди з ізотропною усадкою застосовують для точного лиття в електроніці. У зв'язку з цим виникає потреба у визначенні динамічних механічних характеристик поліамідів.

Як об'єкти дослідження взяти такі марки поліамідів: ПА 610 (паливні та масляні трубки (автоіндустрія), кабельні оболонки, спортивний інвентар), ПА 610-РМ (деталі, що вимагають підвищеної міцності або термостійкості, ізоляція в електротехніці, вузли тертя з низьким коефіцієнтом тертя), ПА 6-ЛТ-У1-РМ (конструкційні деталі, шестерні, підшипники, електротехнічні корпуси, автокомпоненти), ПА66 - 2 (вузли тертя, зубчасті передачі, клемники, розетки), ПА66-2РМ (вузли з високим механічним навантаженням, деталі з постійною роботою за підвищеної температури, ізоляційні матеріали, втулки, що направляють), ПА6-ЛТ-СВУ2 (ТУ 6-05-211-1411-85), ПА66-1-Л-СВ30(ТУ 6-05-211-1424-86).

У цій статті описані результати випробувань поліамідів на динамічний стиск.

Ключові слова: поліамід, електротехнічні матеріали, автомобільний транспорт, сучасне машинобудування, ізоляційні матеріали, імпульсне навантаження, динамічні випробування, триботехніка.

ВСТУП

У зв'язку з вищевикладеним, для інженерних розрахунків у галузі розробки сучасних техніки та технології актуальна наявність даних про вплив швидкості навантаження на міцнісні та деформаційні характеристики поліамідів.

АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДАНИХ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

З метою визначення механічних характеристик матеріалів при високих швидкостях навантаження розроблено ряд методик [1], що дозволяють реєструвати зусилля за імпульсної взаємодії тіл. З цією метою реєструють переміщення торця ударника високошвидкісною камерою або перетворювачем прискорення. Дані методики мають низку недоліків та обмежень. У методиках реєстрації сили взаємодії, заснованих на визначенні негативного прискорення або переміщення похибка отриманих даних може досягати 25% внаслідок нехтування хвильовими процесами та подвійного графічного диференціювання.

Вільні від вищезазначених недоліків методики [2-5], в яких зусилля взаємодії оцінюються по пружній деформації силовимірника на деякій відстані від зони контакту, що реєструється за допомогою тензорезисторів. Однак, при високих навантаженнях на фронті навантажень тензорезистори виходять з ладу в початковій стадії процесу. У роботі [6] описано методику безперервної реєстрації зусилля взаємодії за допомогою ємнісного датчика. Ця методика вільна від нестачі тензорезисторів, пов'язаних із навантаженнями.

Хоча визначення динамічних характеристик міцності присвячено безліч робіт, є необхідність в отриманні експериментальних даних більш простими експрес-методами.

ЦІЛЬ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Ціллю роботи є отримання експериментальних даних і на їх основі аналізування впливу швидкості деформації на характеристики поліамідів при стисканні. Важливим фактором є те, що описане дослідження не вимагає трудомісткої осцилографічної реєстрації залежності "зусилля-деформація" для оцінки механічних характеристик випробуваного матеріалу.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Отримані результати випробувань на ударний стиск. Аналізовано вплив швидкості деформації на міцнісні та деформаційні характеристики поліамідів

ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

Статичні та динамічні випробування на стиск виконували за методикою [7]. Циліндричний зразок 1 (рис.1) розміщують між передавальним бойком 2, виконаним зі сферичною головкою для

вирівнювання зусилля по всьому перерізу та опорним конічним індентором 3, який упирається на площину силовимірювального елемента 4 у вигляді диска, розміщеного на масивній ковадлі 5.

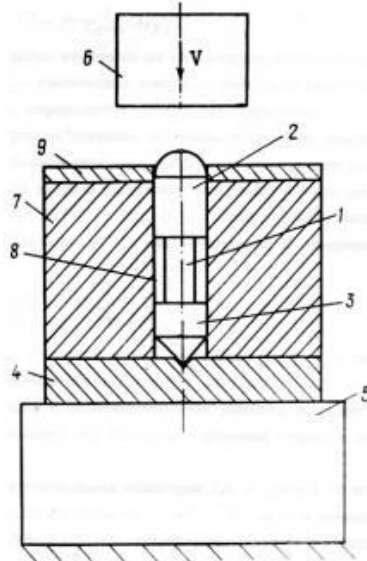


Рисунок 1. Схема проведення експерименту

При виборі конічної форми індентора виходили з відносної простоти виготовлення та необхідності однакового ступеня відносної деформації в міру застосування, що визначається геометричною подібністю відбитків. Зразок навантажували ударом баби 6 по передаючому бойку 2. Для забезпечення співвісності бойок і індентор центрують втулкою 7 з направляючим отвором 8. Необхідний ступінь деформації зразка забезпечується обмежувальними шайбами 9. Силовимірювальний елемент попередньо тарується статичним впровадженням у нього недеформованого конічного індентора під гідропресом, реєстрацією зусилля впровадження та відповідних йому розмірів відбитка. Силовимірювальний елемент виготовляли з матеріалу, малочутливого до швидкості деформації в межах $\dot{\epsilon} < 10^3 \text{ с}^{-1}$ (сплав Д16Т), що дозволяє при динамічному навантаженні користуватися статичною таріровкою.

Максимальне зусилля, що діє на зразок, визначається виразом:

$$P = \pi r_m^2 H_s,$$

де r_m - радіус відбитка на силовимірювальному елементі;

$H_s = P_{\max} / \pi r_{\max}^2$ - твердість матеріалу силовимірювального елемента, визначається статичною таріровкою. Для побудови істинної діаграми стиснення "напруження-деформація" проводять ряд послідовних навантажень випробуваного зразка, визначаючи після кожного його відносну деформацію $\epsilon_i = (h_0 - h_i) / h_0$ (h_0 , h_i - відповідно початкова та поточна висота зразка), $r_{n,i}$ - поточний радіус зразка та відповідні їй напруження:

$$\sigma_i = P_i / \pi r_{n,i}^2 = H_s (r_{m,i} / r_{n,i})^2,$$

де $r_{m,i}$ - поточний радіус відбитка; $r_{n,i}$ - поточний радіус зразка; σ_i - поточні дійсні напруження. При необхідності підвищення швидкості деформування зразка, в силовимірювальному елементі утворюють попередній відбиток, що призводить до зниження швидкості впровадження індентора.

Зразки виготовляли діаметром 7,5 мм та висотою 14 мм, яких випробовували на статичний ($v = 10^{-5} \text{ м/с}$) та динамічний ($v = 6 \text{ м/с}$) стиск.

Параметри проведених експериментів відповідають експлуатації деталей із поліамідів у реальних умовах експлуатації.

Стеклонаповнені поліаміди ПА6-ЛТ-СВУ2, ПА66-1-Л-СВ30 як при статичному, так і при динамічному стисканні руйнувалися крихко після одноразового навантаження з утворенням характерного конуса деформацій зсуву або сколу під кутом, близьким до 45° . У таблиці 1 наведено значення максимальних $\sigma_{\max}$ та середніх σ_{avg} напружень крихкого руйнування поліамідів на стиск.

Таблиця 1. Максимальні $\sigma_{\max}$ та середні σ_{avg} напруження крихкого руйнування поліамідів на стиск.

Марка	v , м/с	$\sigma_{\max}$, МПа	σ_{avg} , МПа
ПА6-ЛТ-СВУ2	10^{-5}	152.5	
		141.5	

ПА6-ЛТ-СВУ2	6	135.5	139.0
		137.0	
		263.5	242.0
ПА66-1-Л-СВ30	10^{-5}	234.0	
		250.0	
		229.0	
		234.0	
		162.5	164.0
ПА66-1-Л-СВ30	6	138.0	
		200.0	
		160.0	
		161.0	
		249.0	257.0
ПА66-1-Л-СВ30	6	266.5	
		236.5	
		243.0	
		250.0	

Поліаміди ПА 610, ПА 610-РМ, ПА 6-ЛТ-У1-РМ, ПА66 - 2, ПА66-2РМ як у статичному, так і в динамічному стиску деформувалися пружно-пластично. Умовні (червоні) та дійсні (чорні) діаграми деформування при стисканні наведені на рис. 2.

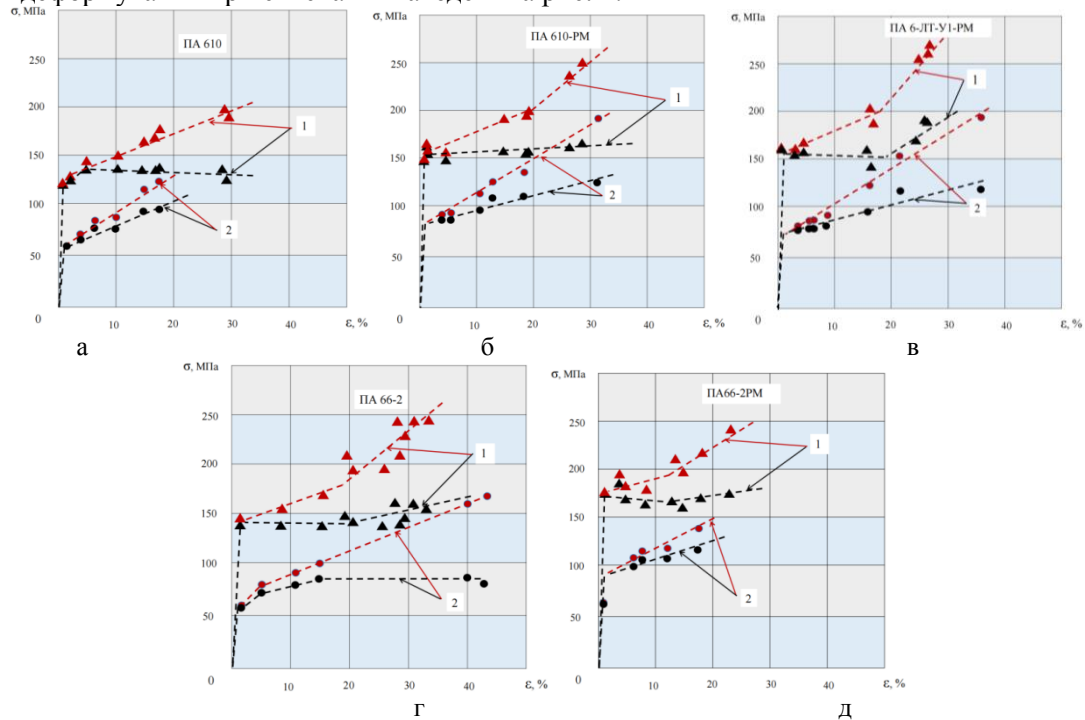
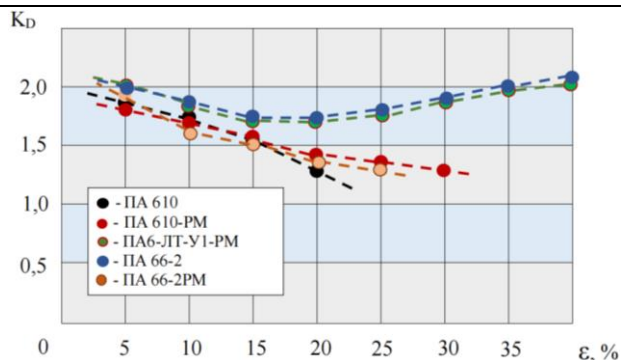


Рисунок 2. Умовні (червоні) та дійсні (чорні) діаграми деформування. а- ПА 610; б- ПА 610-РМ; в- ПА 6-ЛТ-У1-РМ; г- ПА66 - 2; д- ПА66-2РМ; (1 - $v = 6$ м/с; 2 - $v = 10^{-5}$ м/с).

За отриманими даними, збудовано залежність коефіцієнта динамічності $K_D = \sigma_i(v=6 \text{ м/с}) / \sigma_i(v=10^{-5} \text{ м/с})$ від ступеня деформації ϵ (рис.3).

Рисунок 3. Залежність коефіцієнта динамічності K_D від ступеня деформації ε .

ВИСНОВКИ

Стеклонаповнені поліаміди марок ПА6-ЛТ-СВУ2, ПА66-1-Л-СВ30 при стисканні руйнуються крихко незалежно від швидкості деформування. Поліаміди марок ПА 610, ПА 610-PM, ПА 6-ЛТ-У1-PM, ПА66 - 2, ПА66-2PM показують значну пластичність 20-40%. У міру зростання відносної деформації до 20% усі марки поліамідів (крім ПА6-ЛТ-СВУ2, ПА66-1-Л-СВ30) мають тенденцію до зниження коефіцієнта динамічності K_D від 1,7...2,0 до 1,5...1,75, що показує зниження впливу швидкості деформації. Подальше зростання деформації до 40% супроводжується збільшенням коефіцієнта динамічності для поліамідів марок ПА 6-ЛТ-У1-PM, ПА66 – 2 від 1,75 до 2,1.

Дійсні нормальні напруження зі зростанням швидкості деформування від 10^{-5} м/с до 6 м/с збільшуються 1,3...2,1 разів. Найбільш яскраво виражено вплив швидкості деформації для поліамідів марок ПА 6-ЛТ-У1-PM, ПА66-2. Отримані дані показують значний вплив швидкості деформування на характеристики міцності випробуваних поліамідів, що необхідно враховувати в конструкторських розрахунках.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Зубов В.І., Степанов Г.В., Широков О.В. Вплив швидкості деформації на межу плинності сталей різної міцності // Проблеми міцності.- 2003.- №5. С. 113-121.
2. Стрижало В.О., Бородій М.В. Експериментальні методи в механіці деформівного твердого тіла. Навчальний посібник // Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», 2022. - 306с.
3. Ващенко О.П. Експериментальні методи та механізми властивості конструкційних матеріалів при високошвидкісному деформації ($10^2...10^5$ с $^{-1}$) та температурах 77...773 0 К // Проблеми міцності.- 2002.- №3. С. 55-61.
4. Ващенко О. П. Механічні випробування конструкційних матеріалів за високошвидкісного розтягу у широкому діапазоні температур. Навчальний посібник // Київ: Національний трансп. ун-т, 2000. - 93 с.
5. Сафаров Е.Г. Методичні рекомендації до виконання практичних робіт з навчальною дисципліни «Поведінка матеріалів при імпульсному навантаженні». Навчальне видання // Київ: Університет «Україна», 2025.-24 с.
6. Ващенко А.П., Степанов Г.В., Сафаров Е.Г. Динамічний опір конструкційних матеріалів зрізу // Проблеми міцності.- 1987.- №2. С. 45-47.
7. Степанов Г.В. Сафаров Е.Г. Авторське свідоцтво «Спосіб динамічних випробувань матеріалів» № 1434321 від 1.07.1988 р.

REFERENCES

1. Zubov V.I., Stepanov G.V., Shirokov O.V.(2003). Vplyv shvydkosti deformatsiyi na mezhu plynnosti staley riznoyi mitsnosti [Effect of strain rate on the yield strength of steels of different strengths]. *Problemy mitsnosti*, [in Ukrainian].
2. Stryzhalo V.O., Borodiy M.V.(2022). Eksperymental'ni metody v mekhanitsi deformivnoho tverdoho tila. Navchal' nyu posibnyk [Experimental methods in deformable solid mechanics]. *Natsional'nyy tekhnichnyy universytet Ukrayiny «Kyiv's'ky politekhnichnyy instytut imeni Ihorya Sikors'koho»*, [in Ukrainian].
3. Vashchenko O.P.(2002). Eksperymental'ni metody ta mekhanizmy vlastyvyosti konstruktivnykh materialiv pry vysokoshvydkisnomu deformatsiyi ($10^2...10^5$ с $^{-1}$) ta temperaturakh 77...773 K [Experimental

methods and mechanisms of the properties of structural materials at high-speed deformation ($10^2...10^5$ c⁻¹) and temperatures 77...773⁰ K]. *Problemy mitsnosti*, [in Ukrainian].

4. Vashchenko O.P.(2000). Mekhanichni vyprobuвання konstruktsiynykh materialiv za vysokoshvydkisnoho roztyahu u shyrokomu diapazoni temperatur. Navchal' nyy posibnyk [Mechanical testing of structural materials under high-speed tension in a wide temperature range]. Kyiv, *Natsional'nyy transportnyy universytet*, [in Ukrainian].

5. Safarov E.G.(2025). Metodichni rekomendatsiyi do vykonannya praktychnykh robot z navchal'noy dystsypliny "Povedinka materialiv pry impul'snom navantazheni". Navchal'ne vydannya [Methodological recommendations for performing practical work on the academic discipline "Behavior of materials under impulse loading"]. Kyiv, *University "Ukraine"*, [in Ukrainian].

6. Vashchenko A.P., Stepanov G.V., Safarov E.G.(1987). Dynamichnyy opir konstruktsiynykh materialiv zrizu [Dynamic shear resistance of structural materials]. *Problemy mitsnosti*, [in Ukrainian].

7. Stepanov G.V. Safarov E.G. (1988). Author's certificate "Method of dynamic testing of materials" No. 1434321.

E.Safarov, O.Romaniuk, O.Smachylo, Mechanical properties of polyamides under dynamic loading

The development of modern technologies requires the use of new innovative materials. PA series polyamides, which belong to thermoplastic polymers, are widely used in structural elements of automobiles due to their strength, wear resistance, resistance to chemicals and heat resistance. The heat resistance of polyamide is extremely in demand in the engine compartment, where long-term operation at high temperatures is required from plastic. Glass-filled polyamides, which are close in properties to ceramics, are used in the production of sockets and switches. Isotropic shrinkage polyamides are used for precision casting in electronics. In this regard, there is a need to determine the dynamic mechanical characteristics of polyamides.

The following grades of polyamides were taken as objects of research: PA 610 (fuel and oil pipes (automotive industry), cable sheaths, sports equipment), PA 610-RM (parts requiring increased strength or heat resistance, insulation in electrical engineering, friction units with a low coefficient of friction), PA 6-LT-U1-RM (structural parts, gears, bearings, electrical housings, automotive components), PA66 - 2 (friction units, gears, terminal blocks, sockets), PA66-2RM (units with high mechanical load, parts with constant operation at elevated temperatures, insulating materials, guide bushings). PA6-LT-SVU2 (TU 6-05-211-1411-85), PA66-1-L-SV30(TU 6-05-211-1424-86).

This article describes the results of dynamic compression tests of polyamides.

Key words: polyamide, electrical materials, automotive transport, modern mechanical engineering, insulating materials, impulse loading, dynamic tests, tribotechnics.

САФАРОВ Елман Гасанбей огли, кандидат технічних наук, доцент кафедри автомобільного транспорту та соціальної безпеки, Інженерно-технологічний інститут Відкритого міжнародного університету розвитку людини «Україна», e-mail: elman19.60.07@gmail.com, ORCID 0000-0002-4584-5539

РОМАНЮК Оксана Олександрівна, кандидат технічних наук, доцент кафедри автомобільного транспорту та соціальної безпеки, Інженерно-технологічний інститут Відкритого міжнародного університету розвитку людини «Україна», e-mail: knutdromanuk@gmail.com, ORCID 0000-0001-9774-9875

СМАЧИЛО Оксана Володимирівна, кандидат технічних наук, доцент кафедри автомобільного транспорту та соціальної безпеки, Інженерно-технологічний інститут Відкритого міжнародного університету розвитку людини «Україна», e-mail: oksana.sma79@gmail.com, ORCID 0009-0001-9875-901X

Elman SAFAROV, PhD in Engineering, Associate Professor of the Department of Road Transport and Social Security, Engineering and Technology Institute of the Open International University of Human Development "Ukraine", e-mail: elman19.60.07@gmail.com, ORCID 0000-0002-4584-5539

Oksana ROMANIUK, PhD in Engineering, Associate Professor of the Department of Road Transport and Social Security, Engineering and Technology Institute of the Open International University of Human Development "Ukraine", e-mail: knutdromanuk@gmail.com, ORCID 0000-0001-9774-9875

Oksana SMACHYLO, PhD in Engineering, Associate Professor of the Department of Road Transport and Social Security, Engineering and Technology Institute of the Open International University of Human Development "Ukraine", e-mail: oksana.sma79@gmail.com, ORCID 0009-0001-9875-901X

DOI 10.36910/automash.v1i24.1744