

¹Удовицька Ю.А., ¹Луньов С.В., ¹Кашицький В.П., ¹Савчук П.П., ²Маслюк В.Т.

¹Луцький національний технічний університет

²Інститут електронної фізики НАН

ВПЛИВ ЕЛЕКТРОННОГО ОПРОМІНЕННЯ НА МЕХАНІЧНІ ТА ЕКСПЛУАТАЦІЙНІ ВЛАСТИВОСТІ ПОЛІМЕРІВ НА ОСНОВІ ЕПОКСИДНОЇ СМОЛИ

Досліджувався вплив різних доз опромінення електронами з енергією 10 МеВ на механічні та експлуатаційні властивості епоксидно-діанової смоли марки ЕД–20 з твердником ПЕПА (12 мас.ч.). Одержано залежності границі міцності та інтенсивності зношування для різних доз опромінення. Показано, що границя міцності досягає свого максимуму для дози 0,2 МГр, а інтенсивність зношування є мінімальною при дозі 0,7 МГр. Характер одержаних залежностей визначається процесами поперечного «зшивання», радіаційної деструкції та утворенням мікротріщин. Радіаційно-стимульоване зростання границі міцності та зносостійкості пояснюється залежністю ефективності даних процесів від дози опромінення.

Ключові слова: *радіаційне опромінення, композит, епоксидна смола, границя міцності на стиск, зносостійкість.*

Розвиток ряду галузей сучасної техніки та промисловості, таких як літакобудування, космічна техніка, радіоелектроніка, машинобудування вимагає створення матеріалів, придатних для тривалої експлуатації при високих температурах, підвищених радіаційних та деформаційних полях, при наявності зниженого тиску, тертя та хімічно агресивних середовищ [1-3]. Потреба у вирішенні цих практичних завдань стимулювала розвиток досліджень фізичних та хімічних властивостей полімерів. Однією з найважливіших проблем радіаційної фізики і хімії полімерів є з'ясування специфіки радіаційних процесів, що протікають в речовині при впливі різних видів іонізуючих випромінювань [4,5]. Відомо, що іонізуюча радіація суттєво впливає на властивості природних та синтетичних полімерів [2,6]. При цьому основними радіаційними процесами, які відбуваються в полімерах при опроміненні, є «зшивання», тобто утворення додаткових хімічних зв'язків, та деструкція, яка призводить до розриву полімерного ланцюга. Зміна механічних та експлуатаційних властивостей полімерів при опроміненні електронами високих енергій вивчена мало. Зокрема, проведені в роботах [3, 6-12] дослідження впливу електронного опромінення на фізичні властивості полімерів обмежуються лише енергією електронів до 6 МеВ. Також пучок прискорених електронів може бути інструментом енергетичного впливу на полімери з метою покращення їх властивостей, оскільки він є екологічно чистим енергоносієм, що дає можливість вводити в об'єм оброблюваного матеріалу велику кількість енергії за короткий час, різко змінюючи його стан.

Тому нами досліджувався вплив опромінення різними дозами електронів з енергією 10 МеВ на механічні та експлуатаційні властивості епоксидно-діанової смоли марки ЕД–20 з твердником ПЕПА (12 мас.ч.). Композицію заливали у спеціальні форми, внаслідок чого було одержано зразки циліндричної форми з висотою $h=1,5$ см та діаметром $d=1$ см для досліджень границі міцності на стиск та зразки паралелепіпедної форми з розмірами $1 \times 1 \times 2,5$ см для досліджень зносостійкості матеріалу. Процес тверднення епоксидно-діанової смоли тривав 24 години за нормальних умов. Додаткова термічна обробка здійснювалась в печі при температурах $70 \dots 130^\circ\text{C}$. Після термічної обробки епоксикомпозитний матеріал опромінювався в Інституті електронної фізики на мікротроні М–30 прискореними електронами з енергією 10 МеВ, дозами від 0,1 до 0,7 МГр. Для забезпечення стабільності кімнатної температури опромінення, яка фіксувалась мідьконстантановою диференціальною термопарою, зразки епоксидно-діанової смоли обдувались парами азоту. Границю міцності при стисканні в умовах нормального відриву визначали за ГОСТ 14759-69. Дослідження проводили на розривній машині марки УММ-5 за швидкості переміщення нижньої траверси 2 мм/хв. Зносостійкість досліджувалась на машині тертя СМЦ–2 за схемою «вал- сегмент втулки» в умовах сухого тертя. При цьому зразок встановлювався на циліндричну поверхню металевого контртіла, яке оберталось із заданою швидкістю.

На рис. 1 представлено залежності границі міцності для епоксидно-діанової смоли від поглинутої дози електронного опромінення. Як видно з рис. 1, для доз поглинання до 0,1 МГр границя міцності практично не змінюється, а потім монотонно зростає і досягає максимуму при дозі 0,2 МГр. Подальше збільшення дози поглинання до 0,5 МГр призводить до зменшення

ПЕРСПЕКТИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ПРИЛАДИ

границі міцності більше, ніж в 3 рази, і при переході через мінімум знову до зростання. Як відомо з теорії опору матеріалів [13], руйнування зразка при одновісному стиску, що має форму стержня, відбудеться при такій критичній напрузі, коли втрачається стійкість. Втратою стійкості для стержня, стиснутого центральними силами, буде згин стержня. Розв'язок задачі Ейлера при осьовому стисканні стержня дає наступний вираз для критичної сили, за якої стержень буде втрачати стійкість [13]:

$$F_{кр} = \frac{\pi^2 k E J_{\min}}{l^2}, \quad (1)$$

де k – довільне ціле число, E – модуль Юнга, J_{\min} – мінімальний момент інерції поперечного перерізу стержня, l – довжина стержня. Для нас важливою є перша критична сила ($k=1$). Мінімальний момент інерції поперечного перерізу залежить від площі та форми перерізу. Для нашого випадку формою поперечного перерізу досліджуваних зразків епоксикомпозитів є круг.

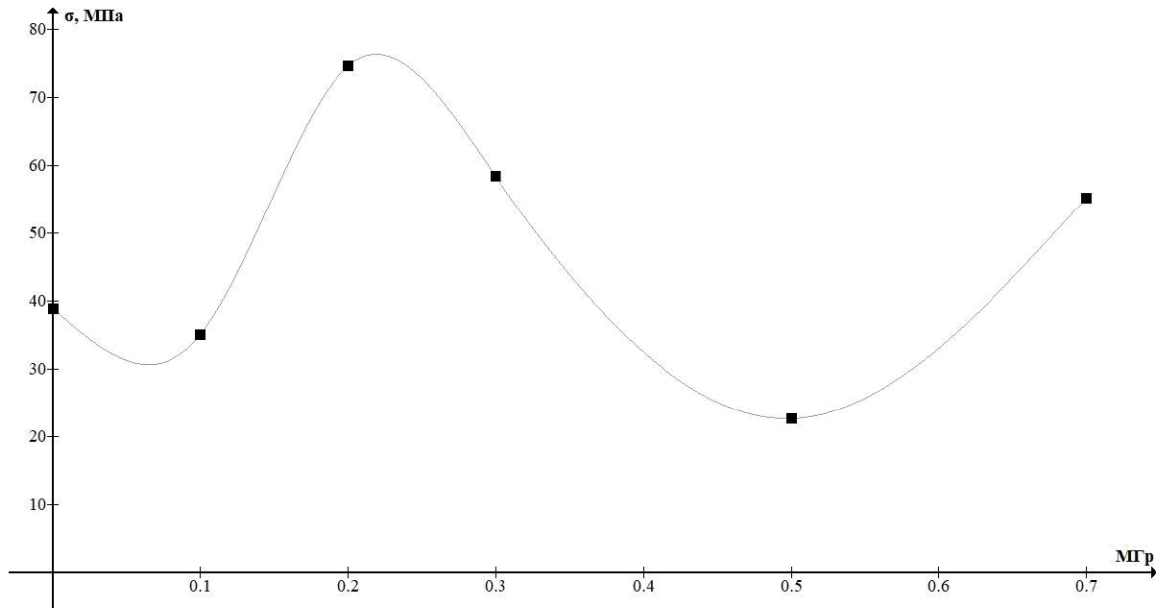


Рис. 1. Залежність граничної міцності для епоксидно-діанової смоли від поглинутої дози опромінення електронами з енергією 10 МеВ.

Мінімальний момент інерції для зразка з круглим поперечним перерізом діаметром d рівний [13]:

$$J_{\min} = \frac{\pi d^4}{64}. \quad (2)$$

Тоді критичне значення механічної напруги, за якої руйнуються зразки

$$P_{кр} = \frac{\pi^2 d^2 E}{16l^2}. \quad (3)$$

Як слідує з виразу (3), критична напруга прямопропорційна модулю Юнга. Тому такі специфічні залежності граничної міцності від поглинутої дози електронного опромінення для зразків епоксикомпозитів можна пов'язати зі змінами величини модуля Юнга при опроміненні, що, в свою чергу, обумовлені радіаційно-хімічними процесами в опромінені епоксикомпозитах. До таких основних процесів відносяться поперечне «зшивання», внаслідок якого укрупнюються макромолекули полімеру за рахунок утворення поперечних хімічних зв'язків між лінійними макромолекулами, та деструкція макромолекул, з утворенням летючих продуктів і макромолекул меншої довжини [2]. Також, враховуючи результати роботи [3], опромінення електронами з енергією $E > 2$ МеВ призводить до утворення в полімерах мікротріщин, розміри та глибина яких залежить від дози опромінення. Зростання граничної міцності для епоксидно-діанової смоли при дозах поглинання до 0,2 МГр може бути пов'язане з домінуючою роллю поперечних міжмолекулярних зшивок. Для доз поглинання від 0,2 до 0,5 МГр стають ефективними процеси радіаційної деструкції та утворення мікротріщин, які і призводять до зменшення граничної міцності. Подальше збільшення поглинутої дози електронного опромінення може сприяти утворенню нових ланцюгів макромолекул епоксикомпозиту, в яких енергія зв'язку між атомами є більшою, що пояснює зростання граничної міцності при дозах поглинання більших за 0,5 МГр. Подібні міркування можна

провести щодо вимірювань зносостійкості для опромінених зразків епоксидно-діанової смоли (рис. 2). Лише відмінною особливістю від залежностей границі міцності від поглинутої дози є те, що мінімальна інтенсивність зношування досягається для дози поглинання 0,7 МГр. В даному випадку формування мікротріщин може вносити менший вклад в зменшення зносостійкості, ніж границі міцності, що відповідно пояснює досягнуту максимальну зносостійкість для дози поглинання 0,7 МГр, а не для дози 0,2 МГр.

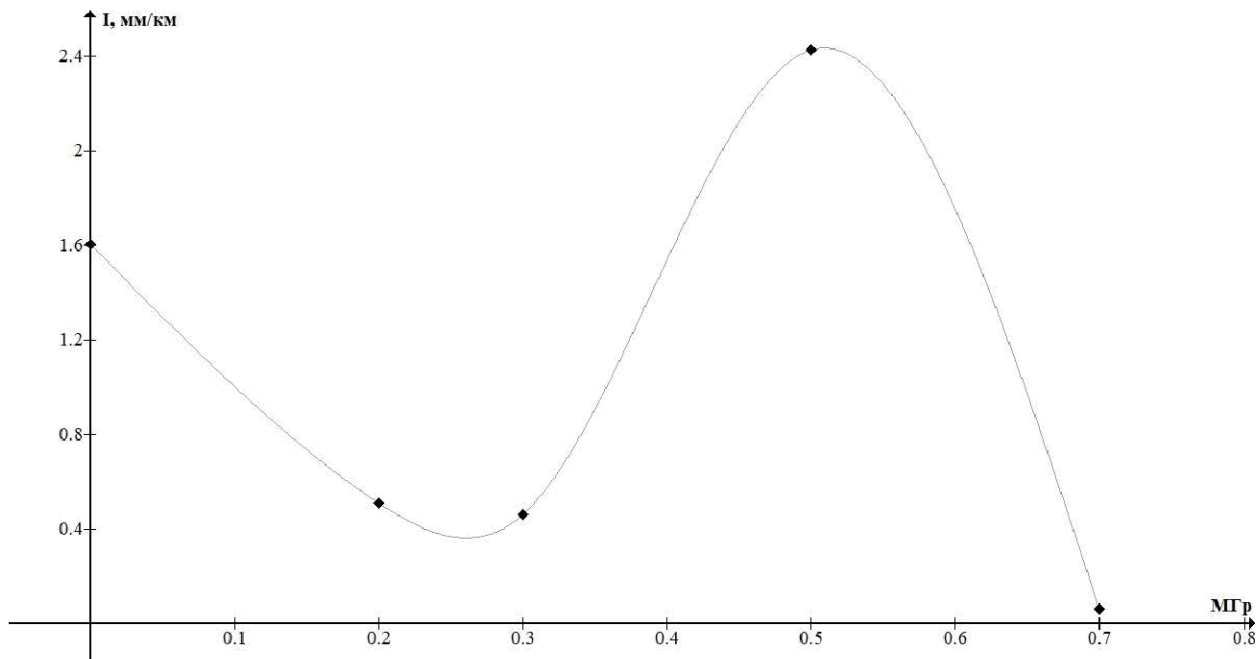


Рис. 2. Залежність інтенсивності зношування для епоксидно-діанової смоли від поглинутої дози опромінення електронами з енергією 10 МеВ.

Радіаційно-стимульоване зростання границі міцності та зносостійкості для епоксидно-діанової смоли може знайти своє практичне використання для створення на її основі високоякісних конструкційних та антифрикційних матеріалів для машинобудування та приладобудування, які матимуть нижчу ціну, меншу масу, довговічність, підвищену стійкість до агресивних середовищ.

Інформаційні джерела

1. Козлов Н.А. Митрофанов А.Д. Физика полимеров: Учеб. пособие / Владим. гос. ун-т; Владимир, 2001. 345 с.
2. Головина Е.А., Маркин В.Б. Основы радиационного материаловедения Учебное пособие. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2008. - 145 с.
3. Воздействие высокоэнергетических пучков быстрых электронов на полимерные радиационно-защитные композиты / В.И. Павленко, Р.Н. Ястребинский, О.Д. Едаменко, Д.Г. Тарасов // Вопросы атомной науки и техники. — 2010. — № 1. — С. 129-134.
4. В.Ф. Плюснин. Радиационная химия. Учебное пособие. Новосибирск: Изд. НГУ, 2010, 198 с.
5. Милинчук В.К. и др. Радиационная стойкость органических материалов: Справочник. М.: Энергоатомиздат, 1986. 272 с.
6. Радіаційно-стимульовані перетворення електропровідності нанокompозиту поліетилену з багатостінними вуглецевими нанотрубками / О.С. Ничипоренко, О.П. Дмитренко, М.П. Куліш, Т.М. Пінчук-Ругаль, Ю.Є. Грабовський, М.А. Заболотний, Є.П. Мамуня, В.В. Левченко, В.В. Шлапацька, В.В. Стрельчук, В.М. Ткач // Вопросы атомной науки и техники. — 2016. — № 2. — С. 99-106.
7. Радіаційна модифікація нанокompозитів поліетилену з багатостінними вуглецевими нанотрубками / О.С. Ничипоренко, Т.М. Пінчук-Ругаль, Д.О. Ковальова, О.П. Дмитренко, М.П. Куліш, Є.П. Мамуня, В.В. Левченко, В.В. Шлапацька // Вопросы атомной науки и техники. — 2014. — № 4. — С. 44-48.
8. В.В. Цетлин, Т.К. Павлушкина, В.И. Редько. Снижение мощности дозы электронного излучения за слоями заряжающихся диэлектриков // Атомная энергия. 1993, т.74, №2, с. 163-165.

9. A.A. Turetskii, S.N. Chvalun, et al. Defects in the crystalline lattice of highly oriented polyethylene and their changes during irradiation // Polymer Science U.S.S.R. 1990, v. 32, issue 12, p. 2525-2531.
10. Морфологія та структура нанокompозитів поліетилену високого тиску з багатостінними вуглецевими нанотрубками під опроміненням / Т.М. Пінчук-Ругаль, О.С. Ничипоренко, О.П. Дмитренко, М.П. Куліш, Ю.Є. Грабовський, М.А. Заболотний, О.Г. Ругаль, Є.П. Мамуня, В.В. Левченко, В.В. Шлапацька, В.М. Ткач // Вопросы атомной науки и техники. — 2013. — № 5. — С. 173-177.
11. В.М.Станкевич, Ю.М.Плескачевский, В.В.Смирнов. Воздействие ионизирующего излучения на физико-механические свойства термопластичных полимерных материалов // 4-я международная конференция «Взаимодействие излучений с твердым телом», 3-5 октября 2001 г., Минск, Беларусь.
12. А.И.Купчишин, Ф.Ф.Комаров, А.Д.Мурадов, Р.М.Искаков, Б.Г.Таипова, Г.Б.Сарсембаев, Т.В.Поздеева. Влияние наполнителя и облучения на механические свойства полимерного композитного материала // Физика и химия обработки материалов. – 2010. – №6. – с. 18-22.
13. Опір матеріалів з основами теорії пружності й пластичності: підручник для студ. буд. і транспорт. спец. вузів: у 2. ч., 5. кн. / ред. В. Г. Піскунов. – К.: Вища школа, 1994. – 260 с.
14. Феодосьев В. И. Соппротивление материалов / В. И. Феодосьев. – М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 1999. – 592 с.

¹Удовицкая Ю.А., ¹Лунёв С.В., ¹Кашицкий В.П., ¹Савчук П.П., ²Маслюк В.Т.

¹Луцкий национальный технический университет

²Институт электронной физики НАН,

ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ПОЛИМЕРОВ НА ОСНОВЕ ЭПОКСИДНОЙ СМОЛЫ

Исследовалось влияние различных доз облучения электронами с энергией 10 МэВ на механические и эксплуатационные свойства эпоксидно-диановой смолы марки ЭД-20 с отвердителем ПЕПА (12 мас.ч.). Получены зависимости предела прочности и интенсивности износа для различных доз облучения. Показано, что предел прочности достигает своего максимума для дозы 0,2 МГр, а интенсивность изнашивания является минимальной при дозе 0,7 МГр. Характер полученных зависимостей определяется процессами поперечного «сшивания», радиационной деструкции и образованием микротрещин. Радиационно-стимулированный рост предела прочности и износостойкости объясняется зависимостью эффективности данных процессов от дозы облучения.

Ключевые слова: радиационное облучение, композит, эпоксидная смола, предел прочности на сжатие, износостойкость.

¹Udovytska Yu., ¹Lunyov S., ¹Kashitskyi V., ¹Savchuk P., ²Maslyuk V.

¹Lutsk National Technical University

²Institute of Electronic Physics, National Academy of Sciences

INFLUENCE OF ELECTRONIC IRRADIATION ON MECHANICAL AND OPERATIONAL PROPERTIES OF POLYMERS BASED ON EPOXY RESIN

The influence of different doses of electron irradiation with energy of 10 MeV on the mechanical and operational properties of ED-20 epoxy resin with PEPA hardener (12 parts by weight) was investigated. The dependences of the strength limit and intensity of wear for different radiation doses were obtained. It is shown that the strength limit reaches its maximum for a dose of 0.2 MGy, and the intensity of wear is minimal at a dose of 0.7 MGy. The nature of the resulting dependencies is determined by the processes of cross-linking, radiation destruction and the formation of microcracks. Radiation-stimulated growth of the strength limit and wear resistance due to the dependence of the effectiveness of these processes on the dose of radiation.

Key words: irradiation, composite, epoxy resin, compression strength, wear resistance.