

**В. О. Віленський**, член-кореспондент НАН України **Ю. Ю. Керча**,  
**Л. А. Гончаренко**, **В. Л. Демченко**

## Про “релаксаційну структуру” наповнених епоксиолімерів

*Досліджено структуру, теплофізичні й термомеханічні властивості наповнених поліепоксидів. Встановлено, що аномальна термічна поведінка зразків визначається особливостями взаємодії хімічної сітки поліепоксиду з лігандами в умовах дії фізичних полів. Запропоновано визначення релаксаційної структури зшитого композита.*

Циклом робіт [1–11] досліджено наповнені епоксиолімери і встановлено існування аномального для зшитих поліепоксидів явища термічного розширення  $\varepsilon \approx 30\%$ , хоча зазвичай для термореактивних полімерів на основі епоксидних смол  $\varepsilon$  становить 2–5% [12]. Цей феномен автори вважають проявом “релаксаційної структури” зшитого полімеру. Для з’ясування природи відкритого явища вивчено композити епоксиолімеру (ЕП) з дисперсними наповнювачами  $Al_2O_3$ ,  $Fe_2O_3$ , поліанілін (ПАН), які відрізнялися вмістом наповнювача та умовами формування зразків: композити отверджували або за нормальних умов, або під дією постійного електричного поля (ПЕП) або постійного магнітного поля (ПМП). Поліепоксидну матрицю наповнювали оксидом металу  $Me_2O_3$  або комплексним наповнювачем  $Me_2O_3 + \text{ПАН}$ , де ПАН і  $Me_2O_3$  взято порівну [3, 6].

Слід зазначити, що при збільшенні об’ємної частки поліаніліну, на відміну від оксидів металів, не змінюється густина і структура хімічної сітки епоксиолімеру. Вивчення надмолекулярної структури та діелектричних властивостей композитів ЕП– $Me_2O_3$  й ЕП–( $Me_2O_3 + \text{ПАН}$ ) [3, 6] показало важливу роль частинок оксиду металу як центрів взаємодії донорно-акцепторних груп епоксиолімеру й ПАН. Залучення зовнішніх фізичних полів для керованого формування комплексу “структура — фізичні властивості” свідчить [4–11], що зміною складу зразків і дією ПМП або ПЕП на процеси тверднення можна варіювати ступінь неоднорідності композитів, ієрархію мікрогетерогених складових структури, що зрештою надає полярним діелектрикам властивостей електропровідності на рівні напівпровідників.

Мета запропонованої роботи — далі дослідження феномену релаксаційної структури через вивчення тонкої структури, теплофізичних, термомеханічних і енергетичних властивостей потрійних композитів ЕП–( $Me_2O_3 + \text{ПАН}$ ).

Зразки композитів готували на основі епоксидної смоли ЕД-20 і твердника триетилентетраміну; для наповнення використовували оксиди заліза  $\alpha\text{-}Fe_2O_3$  й алюмінію  $\alpha\text{-}Al_2O_3$ , а також поліанілін, синтезований способом хімічно ініційованої полімеризації, наведеним у роботі [13]. Методику приготування зразків докладно описано в роботі [1]. Для кращого змочування поверхні частинок наповнювачів матричним полімером їх обробляли 1%-м розчином ЕД-20 в ацетоні, об’ємну концентрацію наповнювачів змінювали від 0,2 до 19,0%. Композити отверджували як за нормальних умов (температура оточення, атмосферний тиск), так і під дією зовнішніх фізичних полів: ПМП із напруженістю  $H = 4 \cdot 10^5$  А/м або ПЕП із напруженістю  $E = 3 \cdot 10^4$  В/м. Схеми установок наведено в роботі [5].

Особливість даного дослідження полягає в тому, що суміш органічного й неорганічного наповнювачів вносять у реакційноздатне середовище і формування хімічної сітки епоксиполімеру відбувається за умов селективної взаємодії його з оксидом металу чи з ПАН. У зв'язку з цим слід було виділити у FTIR-спектрах такі смуги поглинання, на які впливають згадана специфічна взаємодія, хімічна природа  $Me_2O_3$  у складі комплексного наповнювача і зовнішні фізичні поля. У табл. 1 наведено характеристичні смуги поглинання епоксиполімеру [14] та їх зміни при взаємодії полярних груп ЕП з послідовністю іонів  $Me^+O^-Me^+O^-Me^+$  (оксид металу) і зарядових систем  $\pi^- \sigma^+ \pi^- \sigma^+$  (сегмент макроланцюга ПАН), а також під дією ПМП або ПЕП.


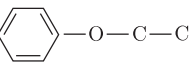
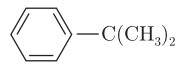

На рис. 1, а наведено спектри зразка ЕП-3%( $Al_2O_3$  + ПАН). З даних табл. 1 можна зробити висновок, що метиленові групи в аліфатичних фрагментах не змінюють частоту коливань ( $\delta$  1460  $cm^{-1}$ ), що свідчить про неучасть їх у міжмолекулярній взаємодії; натомість метильні групи фрагмента  $Ag-C(CH_3)_2-Ag$  ( $\nu$  1385 і  $\nu$  1363  $cm^{-1}$ ) виявляють часткову здатність до виокремлення і поляризації, наслідком чого є зростання частоти коливань смуги від 1383 до 1385  $cm^{-1}$  і зменшення її інтенсивності під впливом полів у композиті ЕП-3%( $Fe_2O_3$  + ПАН). Це вказує на активну роль оксиду заліза у формуванні лігандних комплексів у міжмолекулярному просторі композитів, оскільки на спектрі зразка ЕП-3%( $Al_2O_3$  + ПАН) (див. рис. 1, а) такі зміни відсутні. Природа металу позначається й на частоті коливань ароматичних етерів 1246 та 1039  $cm^{-1}$  (див. табл. 1).

Формування композитів у постійних фізичних полях по-різному впливає на валентні коливання фрагментів ланцюга  $Ag-C(CH_3)_2-Ag$  і  $Ag-O-C-S$ , які можна пов'язувати з  $\pi^-$ - й  $\sigma^+$ -послідовностями груп молекул. Варто відзначити, що саме під дією полів у спектрах з'являється смуга 1653  $cm^{-1}$ , ідентифікована як коливання фрагмента  $\delta C=N$  поліаніліну, проте інтенсивність її залежить від металу та природи поля. Слід звернути увагу на чутливість до умов тверднення смуг 1608 й 1582  $cm^{-1}$ , пов'язаних із коливаннями фенольних груп (див. табл. 1). Її можна пояснити впливом спряжених сегментів ПАН, які є особливо активними за умов дії зовнішніх фізичних полів, що підтверджується різним знаком зміни частоти коливань цих смуг у ПЕП і ПМП.

Попередніми дослідженнями [1, 2] встановлено, що при об'ємній концентрації 3–5%  $Me_2O_3$  настає поріг перколяції, при переході через який у композитах відбувається фазове розділення. На рис. 1, б наведено спектри зразка ЕП-9%( $Al_2O_3$  + ПАН). Якщо в композиті ЕП-3%( $Al_2O_3$  + ПАН) (див. рис. 1, а) наповнювач диспергований у поліепоксидній матриці і перебуває в системі, охопленій хімічними й фізичними зв'язками, то в зразку ЕП-9%( $Al_2O_3$  + ПАН) характеристичні смуги поглинання, які відносяться до поліепоксиду, практично незмінні за будь-яких умов формування. Це означає, що в зразку, де відбулося фазове розділення, полімерна матриця набула стану, подібного до ненаповненого полімеру. Зазначене однаковою мірою стосується й композитів, наповнених  $Fe_2O_3$ .

У роботі [1] при дослідженні впливу природи дисперсних наповнювачів на питому теплоємність  $C_p$  зшитих композитів було показано, що в основі упаковки макроланцюгів ЕП лежить механізм формування координаційних центрів під дією лігандів — частинок  $Fe_2O_3$  або  $Al_2O_3$ , хоча в останніх цей процес проявляється слабше. Якщо на термограмі вихідного поліепоксиду спостерігається лише один релаксаційний перехід в області 343–373 К, то термограми композитів свідчать про гетерогенність їхньої структури. При введенні ПАН до складу наповнювача (рис. 2, а) змінюється характер кривих, а найвищою є теплоємність композитів з об'ємним вмістом 1%  $Me_2O_3$  + ПАН. Характерно, що цей результат не залежить від природи металу в оксиді, тоді як раніше було показано [1–4], що вплив  $Fe_2O_3$

Таблиця 1. Зміна частот на FTIR-спектрах композитів ЕП-( $Me_2O_3 + PAH$ ) під дією фізичних полів

| Характеристичні групи   | Вихідні композити |            |                            |                            | Постійне магнітне поле     |                            | Постійне електричне поле   |                            |
|---|-------------------|------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
|   | ЕП*               | ЕП-<br>ПАн | ЕП-( $Fe_2O_3 +$<br>+ ПАн) | ЕП-( $Al_2O_3 +$<br>+ ПАн) | ЕП-( $Fe_2O_3 +$<br>+ ПАн) | ЕП-( $Al_2O_3 +$<br>+ ПАн) | ЕП-( $Fe_2O_3 +$<br>+ ПАн) | ЕП-( $Al_2O_3 +$<br>+ ПАн) |
| $\gamma(CH)_{аром.}$       | 830               | 826        | 826                        | 826                        | 826                        | 826                        | 826                        | 826                        |
| Нереакційноздатні епоксидні цикли   | 916               | 918        | —                          | —                          | —                          | 918                        | —                          | 918 плече                  |
| $\nu(> C_{Ar}-O-C)$   | 930               | 933        | —                          | 930                        | 933                        | 930                        | —                          | 930                        |
| $\nu(C-O)$  | 1039              | 1030       | 1039                       | 1030                       | 1034                       | 1034                       | 1034                       | 1034                       |
| Аліфатичні $\nu(C-N)$   | 1084              | 1084       | 1086                       | 1084                       | 1088                       | 1084                       | 1088                       | 1084                       |
|   | 1107              | 1107       | 1107                       | 1107                       | 1107                       | 1107                       | 1107                       | 1107                       |
|   | 1180              | 1180       | 1182                       | 1180                       | 1180                       | 1180                       | 1180                       | 1180                       |
| $> C-O-$ у групі           | 1246              | 1238       | 1248                       | 1234                       | 1238                       | 1234                       | 1238                       | 1234                       |
| $CH_3$ -групи у біс-фенолі А  | 1363              | 1362       | 1362                       | 1362                       | 1362                       | 1362                       | 1362                       | 1362                       |
| $Ar-CH(CH_3)_2-CH_2-CH$   | 1385              | 1381       | 1383                       | 1381                       | 1385                       | 1380 плече                 | 1381                       | 1381 плече                 |
| $\delta(CH_2, CH_3)$  | 1460              | 1458       | 1460                       | 1458                       | 1458                       | 1458                       | 1458                       | 1458                       |
| Ароматичне кільце   | 1508              | 1508       | 1508                       | 1508                       | 1508                       | 1508                       | 1508                       | 1508                       |
| $\delta NH$ -групи вторинних амінів,  |                   | —          | 1541                       | —                          | —                          | —                          | —                          | —                          |
| Н-зв'язані $\nu(C-N)$   |                   | —          | 1558                       | —                          | —                          | —                          | 1551                       | —                          |
|   |                   | 1586       | 1582                       | 1581                       | 1582                       | 1581                       | 1582                       | 1581                       |
| Бензольне кільце $\nu C + C$ ;  | 1582              | 1582       | 1580                       | 1577                       | 1577                       | 1582                       | 1578                       | 1582                       |
| cis $-CH=CH-$   | 1608              | 1605       | 160                        | 16059                      | 1605                       | 1605                       | 1609                       | 1609                       |
|   | 1658              | —          | 1654                       | 1653                       | —                          | 1655                       | —                          | —                          |
|   | 1705              | 1706       | 1705                       | —                          | 1705                       | —                          | 1705                       | —                          |
|   | 1744              | 1743       | —                          | 1740                       | 1743                       | 1744                       | —                          | —                          |
| $\nu_{асим} + \nu_{сим} CH_2$   | 2852              | 2851       | 2852                       | 2851                       | 2855                       | 2827/2866                  | 2827/2855                  | 2828/2870                  |
|   | 2920              | 2920       | 2922                       | 2924                       | 2924                       | 2924                       | 2924                       | 2924                       |
| $\nu(CH_3)$ у фрагменті  | 2955              | 2959       | 2960                       | 2951 плече                 | 2951 плече                 | 2955                       | 2951 плече                 | 2963                       |
| $\nu(CH)$                | 3030              | 3031       | 3035                       | 3044                       | —                          | 3044                       | 3043                       | 3036                       |
|   |                   | 3055       | 3055                       | 3055                       | 3055                       | 3059                       | 3055                       | 3051                       |
| ОН- і NH-групи  | 3320              | —          | 3321 плече                 | 3227                       | 3217                       | —                          | —                          | —                          |
|   | 3420              | 3361       | 3414                       | —                          | 3283                       | 3302                       | 3283                       | 3337                       |
|   |                   |            | 3495 плече                 | —                          | 3356                       | —                          | —                          | 3391                       |

\* За даними роботи [14].

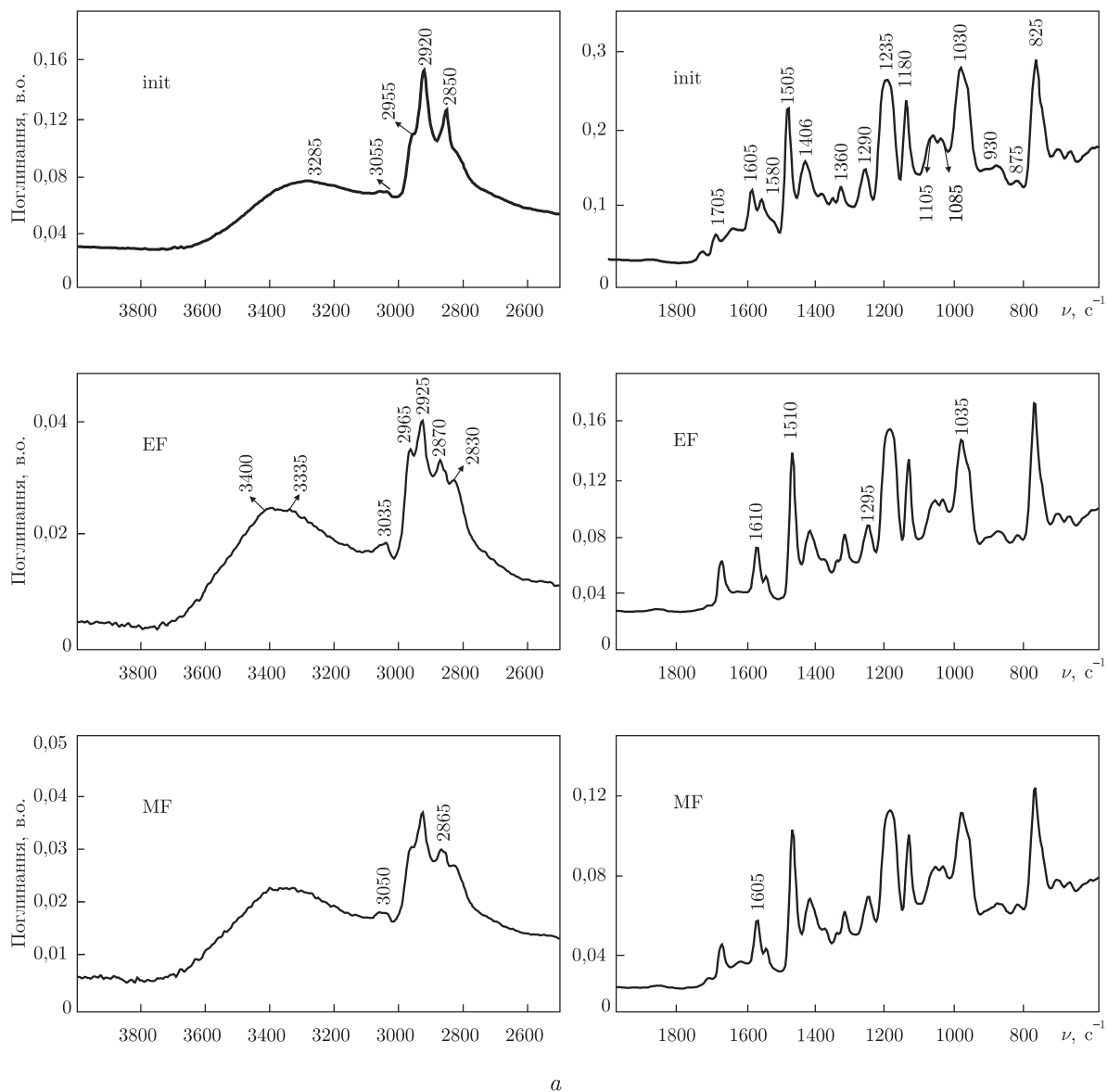
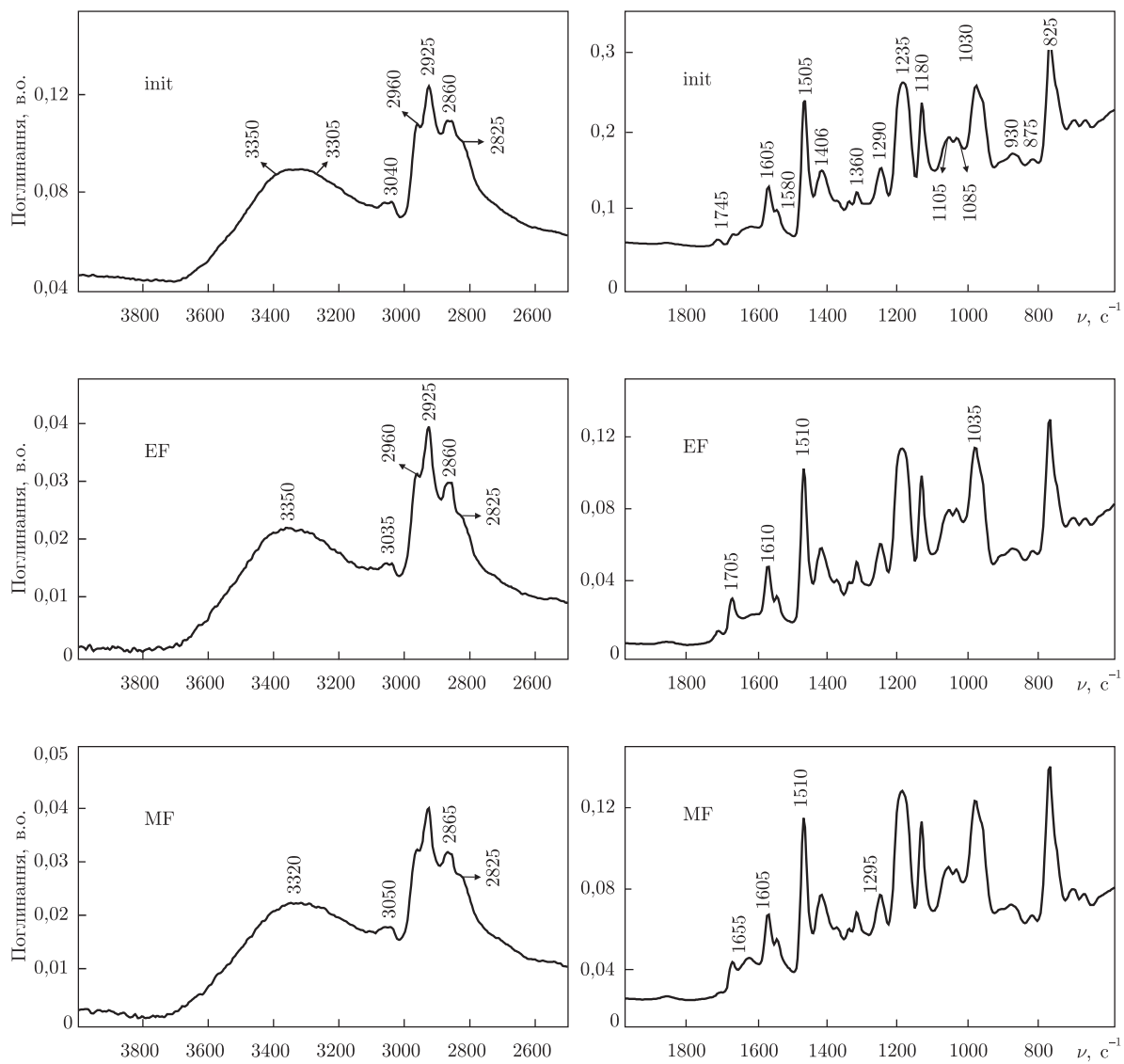


Рис. 1. FTIR-спектр композита ЕП-3%(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + ПАН) (а) та композита ЕП-9%(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + ПАН) (б)

і Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> на теплоємність зразків суттєво різний. Також можна зауважити, що в композитах ЕП-(Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + ПАН) структура матричного полімеру розпушується, натомість під дією комплексного наповнювача Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + ПАН щільність упаковки поліепоксиду зростає, про що свідчить зменшення  $C_p$  у дослідженому температурному інтервалі (див. рис. 2, а). Це стосується навіть композитів з об'ємним вмістом 9 і 19% комплексного наповнювача, де так само, як і в зразках ЕП-9%Me<sub>2</sub>O<sub>3</sub> і ЕП-19%Me<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, відбувається мікрофазове розділення [1, 2].

Дія фізичних полів нівелює відмінності функції питомої теплоємності  $C_p = f(T)$  (див. рис. 2, б, в). Вплив природи поля проявляється в тому, що електрична поляризація, яка охоплює весь континуум молекул композита, призводить до ущільнення молекулярної упаковки, через що теплоємність зразків знижується ( $C_p^{\text{ПЕП}} < C_p^{\text{н.у}}$ ). Натомість ПМП взає-



б

Рис. 1. Продолжение

моді лише з системою диполів композита і відповідно величина  $C_p$  змінюється несуттєво ( $C_p^{\text{ПМП}} \geq C_p^{\text{н.у}}$ ). Таким чином, введенням до поліепоксидної матриці комплексного наповнювача ( $Me_2O_3 + \text{ПАН}$ ) і подальшим отвердненням композитів у ПЕП або ПМП створюються умови для отримання сполук, теплоємність яких може прогнозовано змінюватися у межах нерівності  $C_p^{\text{ПЕП}} < C_p^{\text{н.у}} \leq C_p^{\text{ПМП}}$ , причому ефективнішим є вплив фізичних полів на теплоємність композитів із комплексним наповнювачем  $Al_2O_3 + \text{ПАН}$ . На нашу думку, це пояснюється особливостями взаємодії дипольних молекул органічної фази з лігандами, здатними до утворення координаційних центрів з менш жорсткими міжатомними зв'язками, лабільними під дією зовнішніх чинників.

У роботі [5] при дослідженні впливу природи металу в оксиді, його концентрації та умов отверднення на термомеханічні характеристики композитів було вперше встановле-

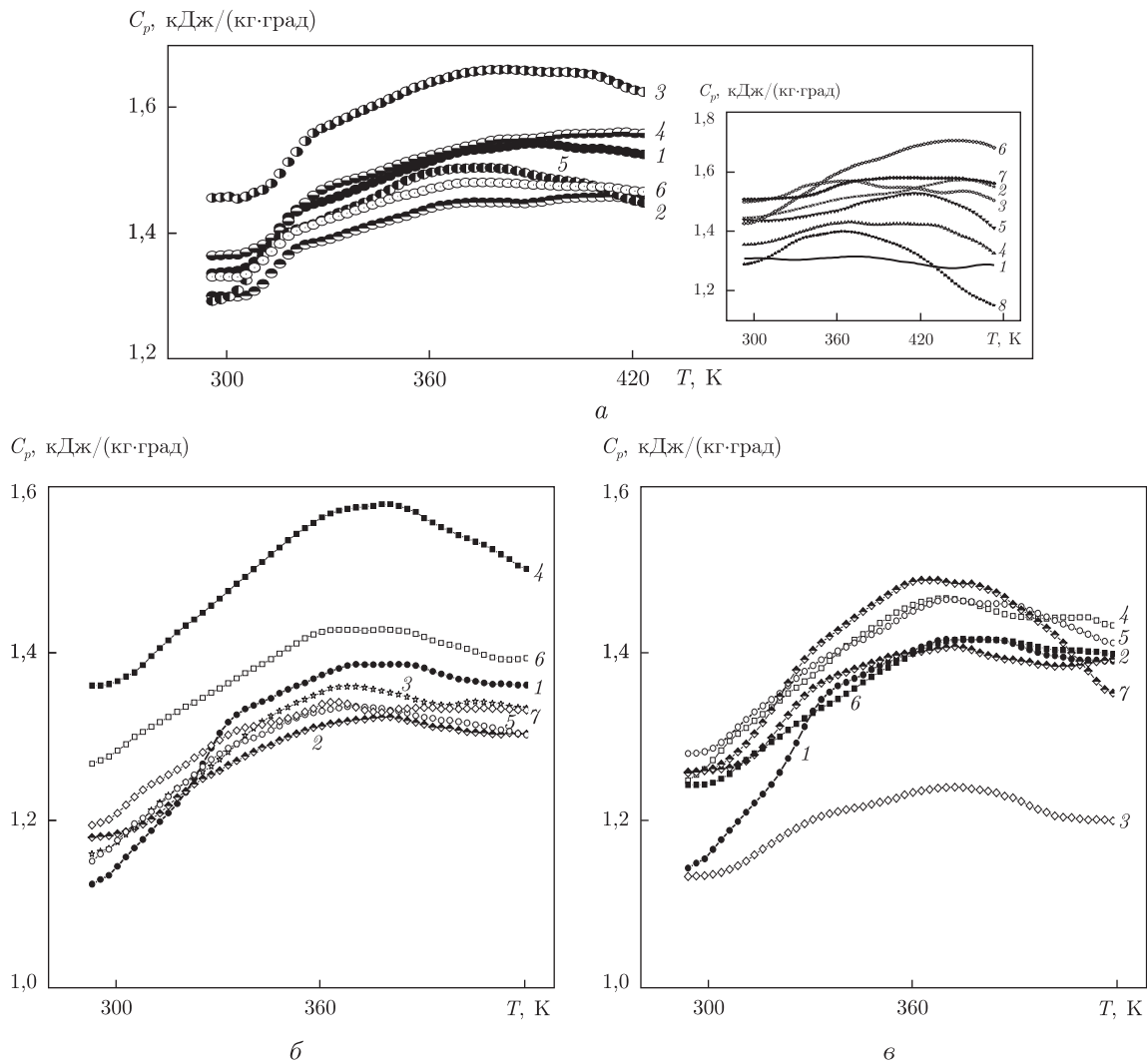


Рис. 2. Термограми композитів: а — ЕП-( $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{ПАН}$ ).

На вставці — термограми подвійних систем ЕП- $\text{Al}_2\text{O}_3$ . [На рисунках нумерація кривих відповідає об'ємному вмісту наповнювача, %: 0 (1), 0,2 (2), 1,0 (3), 3,0 (4), 5,0 (5), 9,0 (6) і 19,0 (7)]; б — ЕП-( $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{ПАН}$ ), отверднених у постійному електричному полі [об'ємний вміст комплексного наповнювача становить, %: 0 (1), 0,2 (2), 1,0 (3), 3,0 (4), 5,0 (5), 9,0 (6) і 19,0 (7)]; в — ЕП-( $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{ПАН}$ ), отверднених у постійному електричному полі [вміст комплексного наповнювача становить, %: 0 (1), 0,2 (2), 1,0 (3), 3,0 (4), 5,0 (5), 9,0 (6) і 19,0 (7)]

но, що зразки ЕП- $\text{Fe}_2\text{O}_3$  і ЕП- $\text{Al}_2\text{O}_3$  здатні до термічного розширення у температурному інтервалі від 350 до 560 К на 10–20%. Слід зазначити, що така величина властива лінійним полімерам, тоді як для зшитих поліепоксидів  $\epsilon$  становить 2–5% [12]. З порівняння термомеханічних кривих композитів ЕП-( $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{ПАН}$ ), сформованих за нормальних умов і під дією магнітного поля (рис. 3, а і б), можна зробити два висновки: по-перше, вихідні композити мають різну термостійкість і здатність до температурного розширення залежно від вмісту комплексного наповнювача; по-друге, застосування фізичних полів цілком нівелює цю властивість, що доводить їх високу ефективність для стандартизації структури і властивостей композитів з вмістом фаз різної приро-

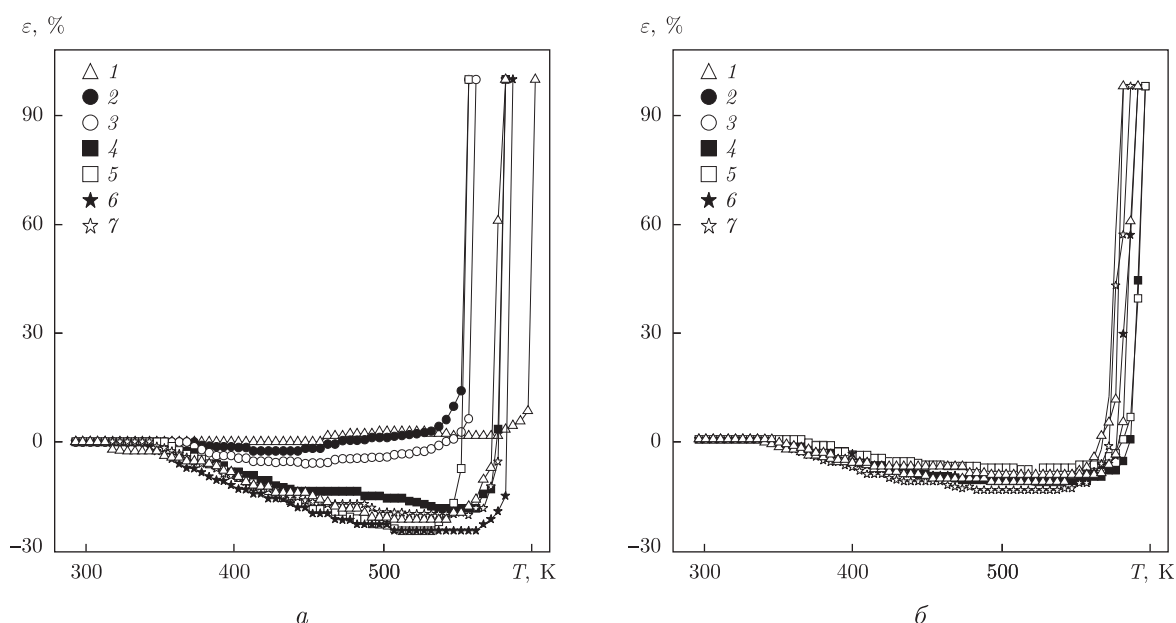


Рис. 3. Термомеханічні криві композитів: *a* — ЕП-( $\text{Al}_2\text{O}_3$  + ПАн), що містять, % за об'ємом комплексного наповнювача: 0 (1), 0,2 (2), 1,0 (3), 3,0 (4), 5,0 (5), 9,0 (6) і 19,0 (7); *б* — ЕП-( $\text{Al}_2\text{O}_3$  + ПАн), отверднених у постійному магнітному полі, що містять, % за об'ємом комплексного наповнювача: 0 (1), 0,2 (2), 1,0 (3), 3,0 (4), 5,0 (5), 9,0 (6) і 19,0 (7)

ди й ПАн, який завдяки своїй будові виступає сполукою — компатіблізатором (сумісником).

Складність термомеханічної поведінки досліджуваних зразків, що є наслідком впливу на їхню структуру численних факторів, дає змогу оцінити внесок кожного з них в енергію активації процесу термічного розширення. Енергію активації розширення  $\Delta E_a$  обчислювали за рівнянням Арреніуса  $\tau = A' \exp[\Delta H_2/(RT)]$  [15] (де  $\tau$  — час релаксації,  $\Delta H_2 = \Delta E_a$  — енергія активації релаксаційного процесу,  $R$  — універсальна газова стала,  $T$  — температура). У табл. 2 наведено значення енергії активації композитів залежно від вмісту наповнювача

Таблиця 2. Енергія активації термічного розширення композитів ЕП- $\text{Me}_2\text{O}_3$  та ЕП-( $\text{Me}_2\text{O}_3$  + ПАн)

| Склад композита                       | Енергія активації $\Delta A$ , кДж·моль <sup>-1</sup> |              |           |
|---------------------------------------|---|--------------|-----------|
|                                       | н. у.   | ПЕП          | ПМП       |
| ЕП-3% $\text{Fe}_2\text{O}_3$         | 17,5<br>23,2  | 13,2         | 26,3      |
| ЕП-9% $\text{Fe}_2\text{O}_3$         | 23,6  | 17,4<br>23,5 | 30<br>9,5 |
| ЕП-3% $\text{Al}_2\text{O}_3$         | —   | 11,7         | 27,3      |
| ЕП-9% $\text{Al}_2\text{O}_3$         | —   | 17,3         | 28,9      |
| ЕП-3%( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ + ПАн) | 24,2  | 18,6         | 17,5      |
| ЕП-9%( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ + ПАн) | 23,1  | 21,2         | 24,8      |
| ЕП-3%( $\text{Al}_2\text{O}_3$ + ПАн) | 27,7<br>12,7  | 20,2         | 15,5      |
| ЕП-9%( $\text{Al}_2\text{O}_3$ + ПАн) | 33,8<br>5,3   | 26,2         | 26,9      |

(при досягненні порога перколяції та у двохфазній системі полімер — нескінченний кластер наповнювача), від природи металу в оксиді та присутності полімера-компатібілізатора, а також від умов формування зразків. Дані таблиці підтверджують висловлену вище думку про складність процесу формування структури: в деяких композитах, передусім у тих, що були сформовані за нормальних умов, відбуваються два процеси активації термічного розширення. У двохфазному стані — зразок ЕП-9%( $Me_2O_3$  + ПАН) для розширення необхідна більша енергія активації, особливо за умов дії фізичних полів, оскільки орієнтаційні процеси, накладаючись на систему зв'язків полярних груп, потребують додаткової енергії для активації учасників взаємодії.

Отже, проведені дослідження дають змогу зробити висновок, що формування релаксаційної структури зшитого полімеру проходить у дві стадії: на першій стадії утворюється система хімічних та фізичних зв'язків між молекулами рідкої фази (епоксидна смола + твердник) і дисперсними частинками наповнювача ( $Me_2O_3$ , ПАН); на другій — тверднення ЕП накладає обмеження на ентропію просторової структури “хімічна сітка — об'ємна частка зв'язаного наповнювача”. Показано, що на другій стадії утворюється релаксаційна структура, характеристики якої визначаються фізико-хімічними властивостями оксидів металів і ПАН, а також концентрацією наповнювачів (див. табл. 2). Регулювати властивості релаксаційної структури зшитого полімеру можна формуванням хімічної сітки поліепоксиду за умов дії зовнішніх фізичних полів різної напруженості. Під їх впливом топологічна структура з системи хімічних і фізичних зв'язків між молекулами рідкої фази й частинками дисперсних наповнювачів змінюється на структуру впорядковану — орієнтовану, згідно з природою поля. Зрозуміло, що при проведенні другої стадії формування релаксаційної структури зшитого полімеру під дією електричного або магнітного полів з'являється новий комплекс не лише термодинамічних, теплофізичних, термомеханічних властивостей, а й передусім гетерогенних характеристик наповнених систем [1, 3, 4].

Таким чином, вперше встановлено існування у поліепоксидних композитах феномена термічного розширення, яке автори трактують як прояв “релаксаційної структури”, що формується за умов присутності дисперсних наповнювачів і дії зовнішніх електричного або магнітного полів. Аналіз релаксаційної структури свідчить, що вона є складним явищем і характеризується одним або більше релаксаційними процесами з різною енергією активації.

FTIR-спектроскопічне дослідження композитів ЕП-( $Me_2O_3$  + ПАН) показало, що при ступені наповнення понад 9% за об'ємом у системі відбувається фазове розділення і полімерна матриця набуває стану, подібного до ненаповненого полімеру. Характеристичні смуги поглинання, які відносяться до поліепоксиду, залишаються незмінними за будь-яких умов формування зразків.

Аналіз термограм досліджених зразків показав, що в присутності ПАН стираються відмінності, які у подвійних системах ЕП- $Me_2O_3$  визначалися природою металу в оксиді та концентрацією наповнювача. При використанні зовнішніх фізичних полів на стадії тверднення створюються умови для отримання сполук із прогнозованою теплоємністю у межах нерівності  $C_p^{ПЕП} < C_p^{н.у} \leq C_p^{ПМП}$ , причому вплив полів ефективніший для композитів ЕП — ( $Al_2O_3$  + ПАН).

Аналіз термомеханічних кривих композитів ЕП-( $Me_2O_3$  + ПАН), сформованих за нормальних умов та під дією фізичних полів, показав, що вихідні композити мають різну термостійкість і здатність до температурного розширення залежно від вмісту комплексного наповнювача; проте застосування електричного або магнітного полів цілком нівелює цю



властивість, що доводить їх високу ефективність для стандартизації структури і властивостей композитів, що мають у своєму складі фази різної природи й ПАН, який завдяки своїй будові може сприяти їх суміщенню.

1. Віленський В. О., Демченко В. Л. Вплив природи дисперсних наповнювачів на структуру, теплофізичні властивості та електропровідність композитів на основі епоксидної смоли // Полімер. журн. – 2008. – **30**, № 2. – С. 133–140.
2. Віленський В. О., Демченко В. Л., Керча Ю. Ю., Шут М. І. Дослідження термомеханічних та теплофізичних властивостей нанокompозитів на основі поліепоксида та дисперсних наповнювачів різної природи // Фізика конденс. високомолек. систем. – 2008. – Вип. 13. – С. 18–23.
3. Штомпель В. І., Демченко В. Л., Віленський В. О., Керча Ю. Ю. Мікрогетерогенна структура композитів на основі епоксидної смоли та оксиду Fe(III) або Al(III) // Полімер. журн. – 2008. – **30**, № 3. – С. 122–125.
4. Демченко В. Л., Штомпель В. І., Віленський В. О., Керча Ю. Ю. Вплив постійного магнітного поля на структуру композитів на основі епоксидного полімеру та оксиду Fe(III) або Al(III) // Там само. – 2008. – **30**, № 4. – С. 302–310.
5. Демченко В. Л., Віленський В. О. Вплив постійних електричного і магнітного полів на структуру і термомеханічні властивості композитів на основі епоксидного полімеру і оксиду Fe(III) або Al(III) // Наук. вісті НТУУ. Сер. Проблеми хімії та хім. технології. – 2009. – № 2(64). – С. 114–121.
6. Віленський В. О., Демченко В. Л. Діелектричні та електропровідні властивості композитів складу ЕП–Me<sub>2</sub>O<sub>3</sub> та ЕП–Me<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – ПАН, сформованих у постійному магнітному полі // Полімер. журн. – 2010. – **32**, № 2. – С. 129–136.
7. Віленський В. О., Демченко В. Л., Менжерес Г. Я. та ін. Дослідження композитів епоксиолімер – оксид металу, модифікованих постійними магнітним чи електричним полями // Там само. – 2010. – **32**, № 4. – С. 321–327.
8. Віленський В. О., Демченко В. Л. Вплив напруженості постійного магнітного поля на структуру та властивості композитів на основі епоксидного полімеру та оксидів металів (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) // Журн. фіз. досліджень. – 2010. – **14**, № 1. – С. 1–6.
9. Демченко В. Л., Штомпель В. І., Віленський В. О. Особливості структури композитів на основі полімеру сітчасті будови та оксидів Fe(III) і Al(III), сформованих у постійному електричному полі // Полімер. журн. – 2009. – **31**, № 3. – С. 235–243.
10. Демченко В. Л., Віленський В. О. Вплив магнітного та електричного полів на структуру і властивості наповнених полімерів // Там само. – 2009. – **31**, № 2. – С. 97–110.
11. Віленський В. О., Демченко В. Л. Вплив напруженості зовнішнього постійного магнітного поля на структуру та властивості композитів ЕС–Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> та ЕС–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2009. – **45**, № 3. – С. 76–82.
12. “Epoxy resins”. Encyclopedia of Polymer Science and Technology / J. I. Kroschwitz (Editor-in-Chief) / 2nd ed. 1985. – 1990. – **9**. – 752 p.
13. Пат. 61–266435 Японія, МКИ C08G 73/00, H01L 29/28. Способ получения тонких пленок токопроводящих органических полимеров / Тамура Сёхэй. – No 60-109988; Заявл. 21.05.85; Опубл. 26.11.86.
14. Handbook of Plastics Analysis / Ed. by H. Lobo and J. V. Bonilla. – New York, Basel: Marcel Dekker. – 2003. – P. 291–294.
15. Bower J. D. Introduction to Polymer Physics. – Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2002. – 465 p.

**В. А. Виленский**, член-корреспондент НАН Украины **Ю. Ю. Керча**,  
**Л. А. Гончаренко**, **В. Л. Демченко**

### **О “релаксационной структуре” наполненных эпоксиполимеров**

*Исследовали структуру, теплофизические и термомеханические свойства наполненных полиэпоксидов. Установлено, что аномальное термическое поведение образцов определяется особенностями взаимодействия химической сетки полиэпоксида с лигандами в условиях действия физических полей. Предложено определение релаксационной структуры сшитого композита.*

**V. O. Vilensky**, Corresponding Member of the NAS of Ukraine **Yu. Yu. Kercha**,  
**L. A. Goncharenko**, **V. L. Demchenko**

### **About the “relaxation structure” of filled polyepoxy**

*The structure and thermophysical and thermomechanical properties of filled polyepoxy are studied. It is established that the anomalous thermal behavior of specimens is determined by features of the interaction between chemical networks of polyepoxy and ligands under the action of physical fields. The definition of the relaxational structure of a cross-linked composite is proposed.*