

Агишанова Н.Ж., Мұрадов А.Д., Алджамбекова Г.Т.

әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті,
Қазақстан, Алматы қ., e-mail: naz-1596@mail.ru

ЭЛЕКТРОНМЕН СӘУЛЕЛЕНДІРУДІҢ ЖӘНЕ КҮМІСПЕН ҚАПТАУ ПРОЦЕСТЕРІНІҢ ПОЛИИМИДТІ ҮЛДІРЛЕРДІҢ ДЕФОРМАЦИЯЛАНУЫНА ӘСЕРІ

Полиимидті үлбірлердің механикалық деформациялануына электронмен сәулелендіру және күміспен қаптау процестерінің әсері зерттелді. Полиимидті негіздің құрылымына ерітінді сіңірілгеннің металдық қабат қалыңдығы 1 μm -ден 5 μm -ды құрады. Күміс айнасының көрінетін және инфрақызыл аймағына қатысты бетті қаптауы 80÷97 %-ды құрады. ЭЛУ-6 сызықтық үдеткішінде электрон шоғырының орташа энергиясы 2 MeV, интегралды токта 1000 μA -ге дейінгі импульстерді жіберу жиілігі 200 Hz мен импульс ұзақтығы 5 μs болатын гамма сәулелену жүргізілді. Үлгілердің жұтылу дозасы: 10, 20, 30 және 40 МГр-ды құрады. Үлгілердің деформациясын бірәсті созылу режимінде Instron 5982 универсалды сынау машинасымен бөлме температурасында жүргізілді. Берілген физикалық факторлардың әсерінен композитті материалдардың құрылымдық өзгерістері ауада ДРОН-2М типтес рентгендік дифрактометрінде $\text{CuK}\alpha$ 293 K температурасында сәулеленумен ($\lambda_{\text{Cu}} = 1,5418 \text{ \AA}$) зерттелді.

Таза үлбірге карағанда үлбірлерді металдау нәтижесінде беріктік шегінің $\Delta\sigma = 105 \text{ МПа}$ және пластикалылығының $\Delta\varepsilon = 75\%$ айтарлықтай өсуі белгіленді. Бұл өсу металдандырылған үлбірлердің құрылымының өзгеру ерекшеліктеріне және олардың химиялық өңдеу шарттарына байланысты. Металдандырылған полиимидті үлбірлердің электронды сәулеленуі оның серпімділік және беріктілік көрсеткіштерін төмендетеді. Мөлшері өскен сайын концентрациясы артатын және полиимидтің макромолекула түйіндерінің үзіліс түрінде болатын материалдың реттелген құрылымының бұзылуымен және қапталған күмістің жаңа фазаларының пайда болуымен туғызылатын күміс тотығы түрінде болатын қаптаудағы жаңа фазалардың пайда болуымен байланысты болып келеді.

Түйін сөздер: полиимид, композитті материалдар, күміспен металдау, механикалық деформация, серпімділік модулі, Юнг модулі, электронды сәулелену, математикалық модель.

Agishanova N.Zh., Muradov A.D., Aldzhambekova G.T.

Al-Farabi Kazakh National university,
Kazakhstan, Almaty, e-mail: naz-1596@mail.ru

Influence of silver metallization and electron irradiation on the processes of mechanical deformation of polyimide films

The effect of silver metallization and electron irradiation on the physical and mechanical properties of polyimide films is studied. The metal layer of the polyimide base impregnated into the structure was from 1 to 5 μm thick. The coatings on the surface contained 80÷97 % of the relative silver mirror in the visible and infrared regions. The irradiation was carried out on a linear accelerator ELU-6 with an average electron beam energy of 2 MeV, an integral current of up to 1000 μa with a pulse frequency of 200 Hz and a pulse duration of 5 μs . The absorbed dose by the samples was: 10, 20, 30 and 40 MGy. Deformation of the samples was performed at room temperature in the uniaxial tension mode on the universal testing machine Instron 5982. Study of Structural changes in composite materials in the result of the impact of these physical factors was studied in the x-ray diffractometer type DRON-2M in air at 293 K, $\text{CuK}\alpha$ radiation ($\lambda_{\text{Cu}} = 1.5418 \text{ \AA}$).

A significant increase in the mechanical characteristics as a result of metallization of films compared to the pure film, so the increase in the tensile strength by $\Delta\sigma = 105$ MPa and plasticity by $\Delta\varepsilon = 75\%$, which is associated with the peculiarities of changes in the structure of metallized films and the conditions of their chemical etching. Electronic irradiation of the metallized polyimide film worsens its elastic and strength parameters, which is caused by the formation of new phases in the coating in the form of silver oxide, the concentration of which increases with increasing dose, and is also caused by a violation of the ordered structure of the material in the form of a rupture of the macromolecules of polyimide and the formation of new phases of silver in the coating. The mathematical model, which is in good agreement with the experimental data and allows to predict the elastic properties of silver metallized polyimide films, is obtained.

Key words: polyimide, composite materials, silver metallization, mechanical deformation, modulus of elasticity, young's modulus, electron irradiation, mathematical model.

Агишанова Н.Ж., Мурадов А.Д., Алджамбекова Г.Т.

Казахский национальный университет им. аль-Фараби,
Казахстан, г. Алматы, e-mail: naz-1596@mail.ru

Влияние металлизации серебром и электронного облучения на процессы деформации полиимидных пленок

Исследовано влияние металлизации серебром и электронного облучения на физико-механические свойства полиимидных пленок. Металлический слой импрегнированного в структуру полиимидной основы имел толщину от 1 до 5 μm . Покрытия на поверхности содержали 80÷97% относительного серебряного зеркала в видимой и инфракрасной областях. Облучение производилось на линейном ускорителе ЭЛУ-6 со средней энергией пучка электронов 2 MeV, интегральном токе до 1000 μA с частотой посылки импульсов 200 Hz и продолжительностью импульсов 5 μs . Поглощенные дозы образцами составляли: 10, 20, 30 и 40 Mrad. Деформацию образцов производили при комнатной температуре в режиме одноосного растяжения на универсальной испытательной машине Instron 5982. Структурные изменения в композитных материалах в результате воздействия данных физических факторов изучались на рентгеновском дифрактометре типа ДРОН-2М на воздухе при температуре 293 K, $\text{CuK}\alpha$ излучением ($\lambda_{\text{Cu}} = 1,5418 \text{ \AA}$).

Установлено значительное повышение механических характеристик в результате металлизации пленок по сравнению с чистой пленкой. Так увеличение предела прочности на $\Delta\sigma = 105$ MPa и пластичности на $\Delta\varepsilon = 75\%$, которое связано с особенностями изменения структуры металлизированных пленок и условиями их химического травления. Электронное облучение металлизированной полиимидной пленки ухудшает ее упругие и прочностные показатели, что вызвано образованием новых фаз в покрытии в виде окиси серебра, концентрация которых возрастает с увеличением дозы, а также вызвано нарушением упорядоченной структуры материала в виде разрыва звеньев макромолекул полиимида и образованием новых фаз серебра в покрытии. Получена математическая модель, которая хорошо согласовывается с экспериментальными данными и позволяет прогнозировать упругие свойства металлизированных серебром полиимидных пленок.

Ключевые слова: полиимид, композитные материалы, металлизация серебром, механическая деформация, модуль упругости, модуль Юнга, электронное облучение, математическая модель.

Кіріспе

Металдандырылған полимерлі материалдардың қасиеттерін алу мен зерттеу қажеттілігі олардың космостық саласында, электроникада және де кең қолданыстағы тауарларды шығару үшін кең ауқымда қолдануымен байланысты. Жаңа материалдарды таңдаудағы негізгі бағыттар әр түрлі металдау фазаларының механикалық сипаттамаларын сақтай отыра қалыңдықтары бойынша композитті үлбірлерді алу үшін бағытталған [1-5]. Металдандырылған полимер-

лі материалдардың ең перспективтісі- жоғары термотұрақтылыққа, диэлектрлік сипаттамаларға және азғантай ұлғаю коэффициентке ие-полиимид болып табылады [6-8].

Бұндай тәжірибелердегі басты сұраққа металдандырылған қаптау түрінің әсерін, оның құрылымын және полимерлі композитті материалдың механикалық қасиеттеріне қаптау сипаттамасын анықтау жатады. Екінші жағынан басты болып механикалық жүктеменің нақты түрін сипаттау үшін тұтқырлы серпімді орталардың анықтаушы теңдеулерін алу болып

саналады, ол материалдың әр түрлі механикалық (статикалық, динамикалық және т.б.) әсер етулерде эксплуатациялық сипаттамаларын болжауды қамтамасыз етеді [9-14].

Сондықтан тұтқыр серпімділерді, металдандырылған полимерлі материалдардың беріктілікті және басқа да механикалық сипаттамаларды зерттеу, олардың механикалық тәртібіне қаптау құрылымының әсерін анықтау, олардың тәртібін болжау әдістерін өңдеу қазіргі кезде өзекті және маңызды іс болып табылады [15-22].

Қазіргі жұмыстың мақсаты күміспен металдау мен электронды сәулелену мөлшерінің полиимидті үлбірдің механикалық деформация процестеріне әсерін анықтау.

Зерттеу әдістемесі

Металдандырылған полиимидті үлбірлерді зерттеу 2 кезеңде жүргізілді: бірінші кезеңі металдандырылған үлбірлердің үлгілерін алу ретінде қарастырылды, ал екінші кезеңі осы үлгілердің механикалық қасиеттерінің өзгеруін үйрену және осы процесстің механизмін көрсететін математикалық моделін құрастырылуы қарастырылды.

Бірінші кезең екі сатыдан құралады. Технологиялық тізбектің бірінші сатысы әр түрлі қалыңдықтағы АБ-имид лагы негізіндегі полиимидті үлбірлерді алуды қамтиды. Технологиялық сызбасы 90 °С- та келесі кептіруі бар және 1 мен 2 сағат 180 °С-та аралығында үлбірдің орамға оралуына сәйкес термиялық циклизациясы таспалы транспортердің когезиялық қабатына фильерлер арқылы лактың итеріліп шығатынын болжады.

Екінші кезеңі органикалық еріткіште, сулы-спиртті сілтілі ерітіндісінде, тазалау, қайта қалпына келуші металмен хелатирлеу, диализбен тазалау және 220 °С-та металдың термохимиялық қалпына келуі бастапқы полиимидті үлбірлердің тізбектеп өңдеу негізінде орамды металдандырылған үлбірлерді алу болып саналады.

Металдандырылған полиимидті үлбірлер ерітінді сіңірілгеннің полиимидті негіз құрылымына тұтас (бір немесе екіжақты) металдық қабат түрінде жасалды. Металдық фазасы қалыңдығы 1-ден 5 мкм-ге дейінгі болатын күміс арқылы орындалды. Конструкция үлгілерінің суммарлы қалыңдығы бастапқы үлбір қалыңдығына сәйкес 25-100 мкм құрады. Металдандырылған қаптаулар күміс айнасына қатысты

көрінетін және инфрақызыл аймағында бетте 80÷97 % құрады. Металдандырылған полиимидті үлбірлердің алынған орамдарынан ені 5 мм және жұмыстық ұзындығы 50 мм болатын үлгілер кесілді, содан соң үлгілер әр түрлі дозада электрондармен сәулелендіру мақсатында 5 топқа бөлінді. Үлгілердің бір тобы бақылау ретінде қолданылып сәулеленуге ұшырамады.

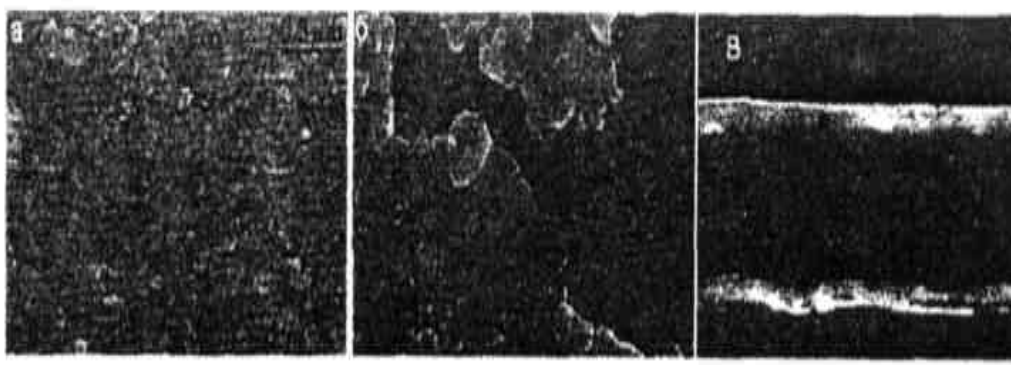
Үлгілерді сәулелендіру сызықты ЭЛУ- 6 күшейткішінде жүргізілді. Электрон шоғының орташа энергиясы импульстерді жіберу жиілігі 200 Hz мен импульс ұзақтығы 5 μs болатын интегралды токта 1000 μА-ге дейін 2 MeV құрады. Әр топтың үлгілермен жұтылу дозасы (D)- 10, 20, 30 және 40 МГр құрады.

Кейін үлгілер универсалды Instron 5982 сынау машинасында біресті созу режимінде бөлме температурасында деформацияланды. Механикалық сынаулардың жүргізілу методологиясы универсалды Instron 5982 сынау машинасын қолдануға негізделді.

Эксперименттік нәтижелер және оның талқылаулары

Кейбір металдарда оксидтердің болуымен амидқышқылды фрагменттері катализатордың жоқтығына қарағанда өте жоғары жылдамдықпен имидизацияланады, бір уақытта алынған жүйелердің тұтқырлығы біршама көтеріледі. Күйдіруден кейін циклденбеген имидті топтардың саны төмендейді, ал полиимидті үлбірлердің термиялық тұрықтылығы жоғарылайды.

Металдық қабаты металдық бөлшектерді формалау нәтижесінде жасалынды: басында Ag иондары үлбірлердің бетінде кішкене кристалдарды туғызады, олар диффузияланушы кеуекті каналдардың жүйесі негізіндегі қайта қалпына келуші күмістің иондарының әсерінен өседі. Беттің морфологиясы – наноқұрылымдық және беттік қабаттың көлеміне қарай біртекті емес болып келеді. Нәтижесінде сыртқы қабаты тығыз қапталған металдың өлшемі 50 нм-ге жуық дәнін көрсетеді. Дәндері беттік қабатта 8-10 нм-ге ие және полиимидтің матрицалық негіздері арасында аралшықтармен бөлінген. Металдың сыртқы қабатында максимал металға ие болатын үлбірлер көлемі бойынша қатаң тасымалдаушы градиенті бар және ол материалдың тереңдігі бойынша азаймалы болып табылады (1-сурет а, б, в).



а – жоғарғы қабат, б – ішкі қабаты, в – кесілген кездегі үлбір

1-сурет – Күмістелген полиимидті үлбірлердің жоғарғы металдық қабатының СЭМ суреттері

Металдық беттік қабатының қабатталуы (деламинация) барлық полимерлі қабаттың тұтастығы 160 МПа (бөлме температурасында) мен 100 МПа (200°C-тан жоғары) дейінгі кернеуде бұзылмайынша бақыланбайды.

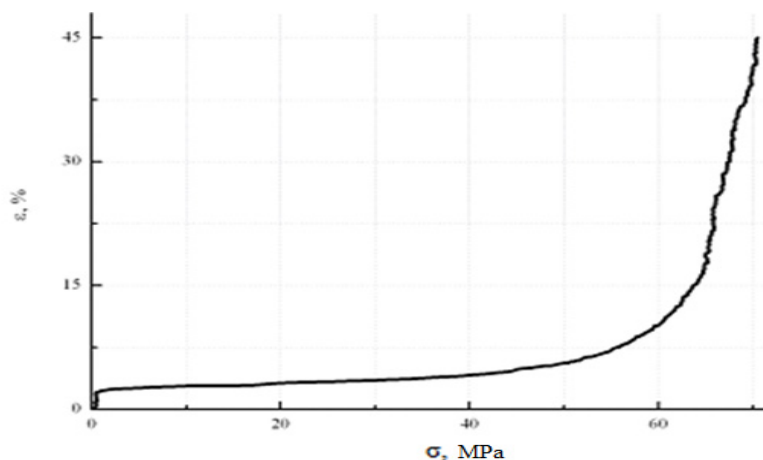
Алғашқыда таза полиимидті үлбірдің бір-өсті созылу кезіндегі салыстырмалы ұзарудың сыртқы механикалық кернеуге тәуелділігінің оның ажырауына дейінгі зерттеу арқылы механикалық қасиеттері зерттелген.

2-суретте көрсетілгендей бірінші кезеңде кернеу 0-1МПа аралығында болды және ұзарудың 3%-ға дейін көтерілуі бақыланды. Бұл құбылыс заттардың макромолекулалары кернеу әрекеті бағытымен жылдам түзуленеді. Берілген кернеулердің 1-ден 40 МПа-ға дейін оның созылуының серпімділігін көрсетуші, Гук заңы орындалатын материалдың салыстырмалы сызықты өсуі байқалады. Берілген аймақта талшық тәріздес полимерлі матрицаның ағысы бағытымен макромолекулалар-

дың созуы орындалады [23-25]. Макромолекулаларда ($-C=O$) жанама байланыстардың үзілуіне сәйкес үлгіде еріксіз эластикалылығы дамиды.

$\sigma = (40\div 50)$ МПа аралығында үлгінің ұзаруы бейсызықтық заңдылығымен жүргізіледі. Алайда, оның серпімді қасиеттері сақталады, бірақ Гук заңы орындалмайды. Кейінгі кернеудің өсуі ($\sigma \geq 50$ МПа) үлгінің пластикалық ағысына әкеледі. Соңғысы ұзарудың экспоненциалды өсуімен алынып, үлгінің үзілуімен аяқталады. Осы кезде полимерде бензол сақиналарының арасында байланыстардың үзілуі болады және ол өздігінен деструктивтенеді.

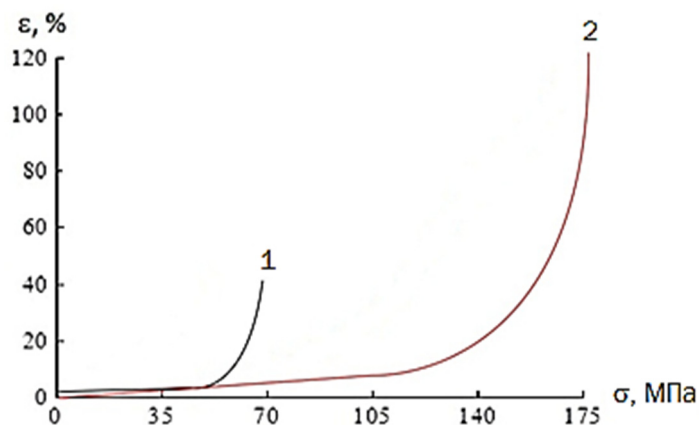
Күміспен металдандырылған полиимидті үлбірлердің бір-өсті созылу кезіндегі механикалық қасиеттеріне әсері таза сәулеленбеген және металдандырылғандар үшін салыстырмалы ұзарудың (ε) түсірілген кернеуден (σ) тәуелділігі 3-суретте көрсетілген.



2-сурет – Бір-өсті созылу кезіндегі таза полиимидті үлбірдің салыстырмалы ұзаруы

Суретте көрсетілгендей, үлбірдің металдан-дырылуы оның пластикалық қасиеттерін арттырады, салыстырмалы ұзаруы 120%-ға дейін жетеді, сондай-ақ беріктілік шегін арттырады, түсірілген үзілу кернеуі~175 МПа-ға жетеді. Металданбаған үлбірмен салыстырғанда металдандырылған үлбірде салыстырмалы ұза-

руы~90 %-ға, ал беріктілік шегі~135 МПа-ға артады. Ескере кету керек, зерттелетін үлбірдің үзілу орнында полиимидтің өзі көрінеді, ал күміс қабатымен қапталғандары оның аймағында қалады. Біздің жағдайымызда үлбірлердің күміспен металдандырылуы металдың химиялық өңдеу әдісімен жүргізілді.



1 – таза үлбір, 2 – күмістелген үлбір

3-сурет – Біресті созылу кезіндегі сәулеленбеген полиимидті үлбірлердің күміспен металдауда механикалық қасиеттеріне әсері

Полиимидті үлбірлердің металдануы оның механикалық көрсеткіштерін айтарлықтай дәрежеде жақсартады: беріктілігі ~175 МПа-ға жетеді, ал салыстырмалы үзілу ұзаруы 120%-ға дейін артады. Бұл параметрлердің өсімі таза үлбірлермен салыстырғанда $\Delta\sigma=105$ МПа және $\Delta\varepsilon=75\%$ -ды құрайды.

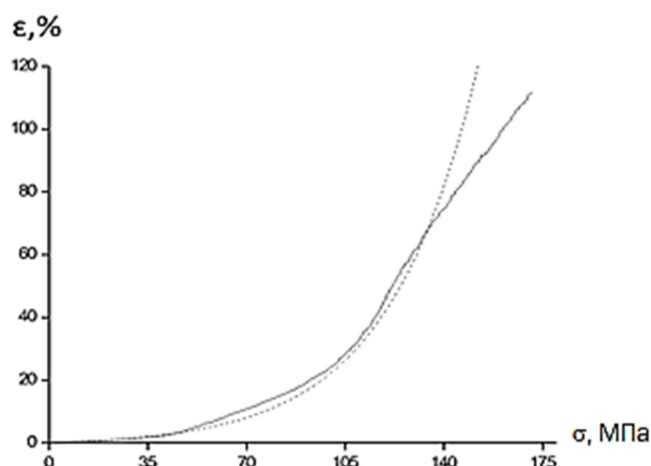
Осындай металдандырылған материалдардың механикалық көрсеткіштерінің өзгерістері осы үлбірлерді алу әдісі – күмісті химиялық өңдеу әдісіне байланысты.

4-суретте көрсетілгендей, металдандырылған үлгілерде (2 қисық) сызықты емес заң бойынша серпімді ұзаруы кернеу интервалында $\sigma=(50\div 140)$ МПа бақыланады. Үлгінің пластикалық ағысы $\sigma\geq 140$ МПа кернеу кезінде туғызылады. Ол ұзарудың экспоненциалды өсуімен беріледі және матрицаның бензолды сақиналарының арасындағы байланыстарында пайда болатын бұзылулар секілді оның үзілуімен аяқталады. Осы процесстің барлығы полимерлі

материалдың деструкциясымен бір уақытта және металдық қаптаулардың дәндері арасында байланыстардың үзілуімен беріледі.

Алынған эксперименталдық анықтамалар негізінде серпімді аймағында сәулеленбеген күміспен металдандырылған полиимидті үлбірлер үшін серпімділіктің орташа модуль мәні анықталды, ол 31,7 МПа-ға тең.

Зерттеу қорытындысы бойынша, гамма сәулеленудің әр түрлі дозаларының күміспен металдандырылған полиимидті үлбірлердің беріктілік модуліне әсері 1-кестеде көрсетілген. Кесте бойынша күміспен металдандырылған полиимидті үлбірлердің электронды сәулеленуінің дозалары артқан сайын, серпімді және беріктілік көрсеткіші төмендегендіктен, оның беріктілік модуль көрсеткіші де азаяды. Күміспен металдандырылған полиимидті үлбірлердің электронды сәулеленудің арнайы дозаларының әсері секілді механикалық көрсеткіштерінің эксперименталды тәуелділіктері 4-суретте (а, б) көрсетілген.



4-сурет – Сәулеленбеген күміспен металдандырылған полиимидті үлбірлердің біресті созылу кезіндегі салыстырмалы ұзарудың өзгеруі

1-кесте – Күміспен металдандырылған полиимидті үлбірлердің серпімділік модулінің (E) электронды сәулелену дозасынан (D) өзгерісі

Сәулелену дозасы (D), МГр	Беріктілік модулі (E), МПа
10	31,1
20	31,0
30	30,1
40	27,0

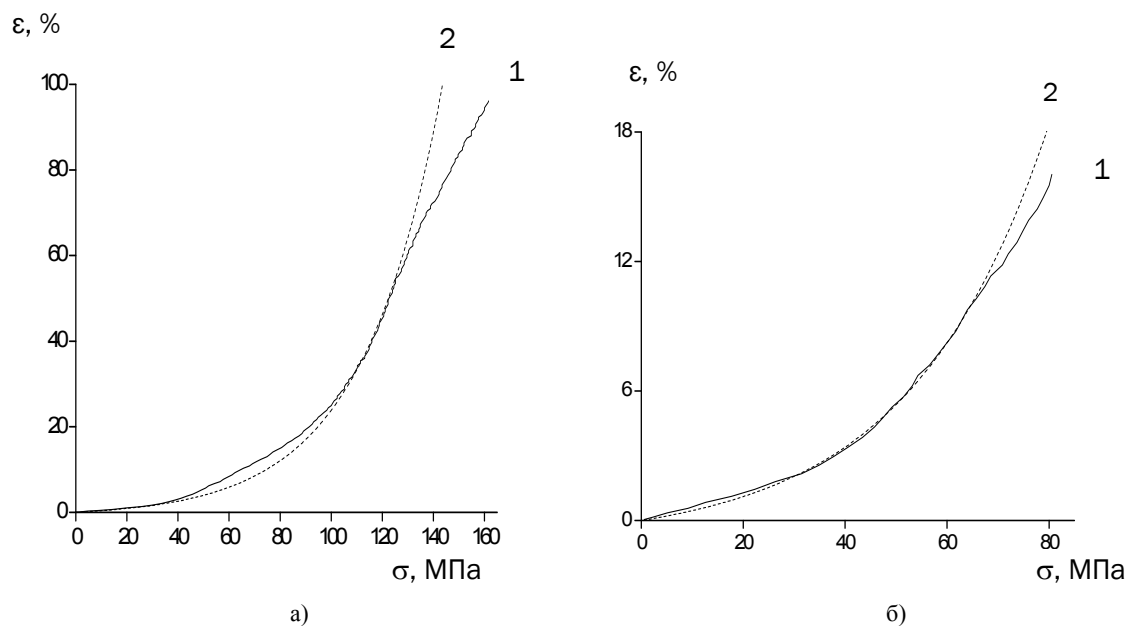
5-суретте (а, б) көрсетілгендерді 4-суреттегі аналогты берілген көрсеткіштермен салыстыра отыра, электронды сәулеленудің күміспен металдандырылған полиимидті үлбірлердің механикалық қасиеттеріне әсері теріс әсерін береді. Сәулелену дозасы өскен сайын күміспен металдандырылған полиимидті үлбірлердің механикалық көрсеткіштері елеулі өзгеріске ұшырайды. Дозаның 10-нан 40 МГр-ге артқандықтан материалдың беріктілігі 160-тан 80 МПа-ге дейін төмендеді, яғни 2-есеге, ал максималды салыстырмалы үзілу ұзаруы ~100 % - дан ~18%-ға дейін төмендеді, яғни 5 есеге дейін төмендеді.

Сәулеленген күміспен металдандырылған полиимидті үлбірлердің механикалық көрсеткіштерінің өзгерістерінің сипаттамасы бойынша берілген математикалық моделінің қолданылуы 5-суретте (а, б) қосымша қисық сызықтармен көрсетілген. Математикалық модель толық түрде серпімді аймақтағы процесстер тәуелділіктерін және сызықты түрде қалай болса, сы-

зықты емес қисық аймағындағыдай электрондармен сәулеленген материалдар үшін анықтайды. Бірақ модель таза полиимидті үлбірлер үшін салыстырмалы салыстырмалы ұзарудың кенет өзгерісін сипаттай алмайды, механикалық кернеуі $\sigma = (0 \div 1)$ МПа.

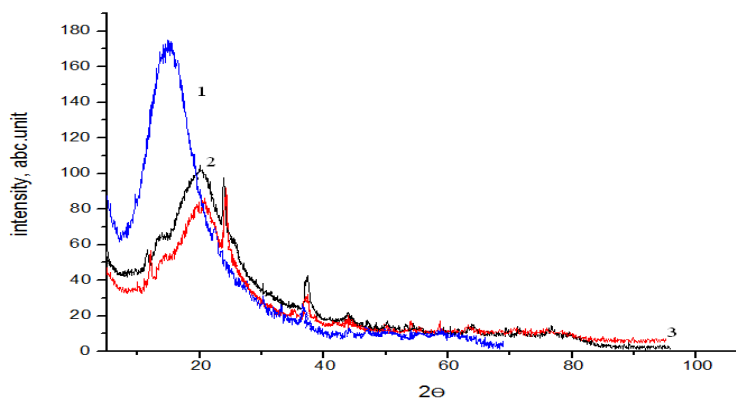
6-суретте күміспен металдандырылған полиимидті үлбірлі материалдардың механикалық деформацияға дейін және үзілуден кейінгі ұшыраған рентгенограммалары көрсетілген, сондай-ақ электронды сәулелену дозасы үзілуден кейінгі біресті созылу әсерінен 40 МГр болады. Біресті созылу мен үзілу нәтижесінде сәулеленбеген үлбірлер үшін үзілмеген үлбірлермен (1 қисық) салыстырғанда бірінші максимум интенсивтілігі (~16° кезінде) ~78 °-қа азаяды, жылжумен ~6°-қа қарай (2-қисық) өседі. Сәулеленген үлбірдің 40 МГр доза арқылы үзілумен бірге біресті деформация үзілмеген үлбірмен салыстырғанда тура сондай жылжумен (3-қисық) берілген максимумның 20° қосымша интенсивтіліктің төмендеуін туғызады.

1-қисықтың бірінші максимумы алғашқы материалдың жақсы реттелген құрылымы болғанын көрсетеді. Интенсивтіліктің төмендеуі және пиктің бұрыштардың (2 және 3-қисық) өсуіне қарай жылжуы материалдарда құрылымның тәртіптілігі бұзылады және полиимидтің макромолекулаларының үзілуі жүреді. Бұл өзгерістер комптондық шашырау нәтижесінде рентгендік сәулеленуде үлбірлердің жаңа шашырау центріне спектр үлкен бұрыштарына ($\theta > 70^\circ$) жылжиды.



1 – эксперименті; 2 – есебі
D = 10 МГр (а); D = 40 МГр (б)

5-сурет – Күміспен металдандырылған полиимидті үлбірлердің біресті созылу кезінде салыстырмалы ұзаруының электронды сәулелену дозасына байланысты өзгерісі



1 – алғашқы үзілмеген сәулеленбеген металдандырылған үлбір (D=0);
2 – сәулеленбеген үзілген металдандырылған үлбір (D=0);
3 – үзілген сәулеленген металдандырылған үлбір (D=40МГр).

6-сурет – Механикалық деформацияға ұшыраған, күміспен металдандырылған полиимидті үлбірлі материалдардың рентгенограммалары

$\theta=25^\circ$ мен $\theta=37^\circ$ кезінде қосымша пиктердің туындауы мен күшеюі металдық қаптауларда осы әсер етулердің нәтижесінде диэлектрикалық қасиеттері бар күміс тотығы тәріздес жаңа фазалар пайда болды. Оы пиктердің күшеюі металдандырылған үлбірлердің электронды сәу-

леленуі сәулелену дозасымен артатын жана фазалардың өсуін туғызады.

Статикалық кернеулер әсерінің (үзілу кернеуінен 80%) температуралық зерттеулері сәулеленбеген үлбір үзілген температура салыстырмалы үзілу ұзаруы $\sim 90\%$ кезінде 290°C құрады, ал кернеудің басынан үзілуіне дейінгі уақыты

24 минут аралығын көрсетті. Сәулеленудің дозасы 20 МГр-ге артуымен үзілу болған температурасы 230⁰С-ты құрады. Сәулелену дозасының 40 МГр-ге дейінгі өсуі үзілу температурасының 95⁰С-ке төмендегенін көрсетеді, ал уақыты кернеудің бастауынан үзілуіне дейін 8 минутты, яғни кернеудің әсер ету уақытының материалдың үзілуі басталғанға дейін 3 есеге дейін қысқарған. Осының бәрі электронды сәулеленумен композитті материалда құрылымдық өзгерістердің туындауымен байланысты, олар оның термомеханикалық көрсеткіштерінің төмендеуіне әкеледі.

Қорытынды

1. Таза үлбірмен салыстырғанда күміспен қаптауланған полиимидті үлбірлердің механикалық көрсеткіштері жақсартылады, беріктілік шегі $\Delta\sigma=105$ МПа мен пластикалылығы $\Delta\varepsilon=75\%$ -ге дейін өсуін туғызады. Бұл өзгерістер металдандырылған үлбірлердің құрылым ерекшеліктеріне және оның химиялық өңдеу шарттарына байланысты.

2. Күміспен металдандырылған полиимидті үлбірлердің электронды сәулеленуі оның серпімді және беріктілік көрсеткіштерін төмендетеді. Күміс тотығы тәріздес жаңа фазалардың пайда болуымен туғызылатын серпімділік модулі дозаның өсуімен төмендейді, концентрациясы дозаның өсуімен артады.

3. Электронды сәулелену нәтижесінде күміспен қаптауланған полиимидті үлбірлердің механикалық көрсеткіштерінің төмендеуі полиимидтің макромолекулаларының буындарының үзілуі түрінде реттелген құрылымның бұзылуымен және қаптаудағы күмістің жаңа фазаларының пайда болуымен туындалды.

4. Берілген математикалық модель серпімді аймақта сәулеленбеген үшін қалай болса әр түрлі дозада электрондармен сәулеленген эксперименталды анықтамалармен жақсы келіседі. Берілген моделдің көмегімен сәулеленбегендермен электрондармен сәулеленген күміспен металдандырылған полиимидті үлбірлердің серпімді қасиеттерін болжауға болады.

Әдебиеттер

- 1 Кербер М.Л., Виноградов В.М., Головкин Г.С. и др. Полимерные композиционные материалы: структура, свойства, технология. – СПб.: Профессия, 2008. – 560 с.
- 2 Ермаков С.Н., Кербер М.Л., Кравченко Т.П. Химическая модификация и смешение полимеров при реакционной экструзии // Пластические массы. – 2007. – № 10. – С. 32-40.
- 3 Краузе С.В. В сб. Полимерные смеси. Под ред. Пола Д. и Ньюмена С.М. –М.: Мир, 2002. – С. 126-145.
- 4 Griepentrog, M. Comparison of nanoindentation and AFM methods for the determination of mechanical properties of polymers / M. Griepentrog, G. Krämer, B. Cappella // Polymer Testing. –2013. – V.32. –№3. –P.455-460.
- 5 Nishira T., Nishijima S., Okada T. Creep behavior of an epoxy resin and an epoxy- Based FRP in condition of simultaneous supply of radiation and stress at cryogenic temperatures // JAERI-Conf.- 2015, № 95-020. – С. 55-61.
- 6 Charlesby A. Kinetics of the g-Radiation-Induced single Crystals of Polyethylene Terephthalate // Nature. – 2013. – Vol. 171, № 4343. – P. 167.
- 7 Little K. ESR Study of Free Radicals Formed by γ -Irradiation of Polyethylene Terephthalate // Nature. 2015. Vol. 170, № 4338. P. 1075.
- 8 Михайлин Ю.А. Термоустойчивые полимеры и полимерные материалы. – СПб.: Профессия, 2006. – 623 с.
- 9 Светличный В.М., Кудрявцев В.В. Полиимиды и проблема создания современных конструкционных композитных материалов // Высокомолек. соед. 2003. – Серия Б. – Т. 45. №6. – С. 984-1036.
- 10 Gaurav Mago, Dilhan M. Kalyon, Frank T. Fisher. Polymer Crystallization and Precipitation-Induced Wrapping of Carbon Nanofibers with PBT // Journal of Applied Polymer Science. 2015. V. 114. P.1312-1319.
- 11 Elyashevich G.K., Kuryndin I.S., Lavrentyev V.K., Bobrovsky A.Yu., Bukošek V. Porous structure, permeability, and mechanical properties of polyolefin microporous films // Physics of the Solid State. 2017, V. 54. Issue 9, P. 1907–1916.
- 12 Mandelkern L. Crystallization of Polymers. – Cambridge Academ. 2013. 478p.
- 13 Mandelkern L. Crystallization of Polymers: V. 2, Kinetics and Mechanisms – Cambridge University Press. 2013. 478 p.
- 14 Крутько Э.Т. и др. под общ. ред. Прокопчука Н.Р. Полиимиды. Синтез, свойства, применение. – Минск: БГТУ, 2002. 303 с.
- 15 Кабанов В.Я., Кудрявцев В.Н. Модифицирование полимеров путем радиационной прививочной полимеризации (современное состояние, тенденция развития). // Химия высоких энергий. 2003. – Т. 37. № 1. – С. 3 -7.
- 16 Шевченко А.А. Физикохимия и механика композиционных материалов. – СПб.: Профессия, 2010. – 224 с.
- 17 Купчишин А.И., Рябых С.М., Нуркеева З.С., Таипова Б.Г., Тронин Б.А., Омарбекова Ж.А. Экспериментальные исследования физико-механических свойств полиимидных пленок // Труды Международной конференции «Физико-химические процессы в неорганических материалах (ФХП-9)». Кемерово, 2004. – Т. 1. – С.580-583.

- 18 Кочнев А.М., Заикин А.Е., Галибеев С.С., Архиреев В.П. Физикохимия полимеров. – Казань: Изд-во «Фэн», 2003. – 512с.
- 19 James E. Mark, Harry R. Allcock, Robert West. Inorganic Polymers. – Oxford University Press, 2015. – 360 p.
- 20 Кулезнев В.Н., Шершнева В.А. Химия и физика полимеров. – М.: Колос С, 2007. 367с.
- 21 Крыжановский В.К., Бурлов В.В. и др. Технические свойства полимерных материалов. – СПб.: Профессия, 2005. – 248 с.
- 22 Khan, M.A. High Performance Ferroelectric Memory Based on Phase: Separated Films of Polymer Blends / M.A.Khan, U.S. Bhansali, M.N. Almadhoun, I.N. Odeh, D.Cha, H.N. Alshareef // Advanced Functional Materials. –2014. –V.24. –№.10. – P.1372-1381.
- 23 Танаки Т., Хозояма К., Хара К. Растяжимые свойства фильма полиимида при криогенных температурах и воздействиях радиации на полиимиде. Достижения в криогенных технических инженериях, Издания 42, 1996. – С. 21-27
- 24 Нарендры Л., Маткахари В., Бхорэскэр С. Поверхностные и структурные изменения в полиимиде, облученном электронами с энергией 6 MeV // Материаловедение и разработка: Том 168, Выпуски 1-3, 2010. – С. 122-126
- 25 Umbetova K., Kravtsova V., Korobova N., and Iskakov R. // Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Elektron. – 2016. – Vol. 21. – P.201.

References

- 1 M.L. Kerber, B.M. Vinogradov, G.S. Golovkin i dr. Polimernye kompozicionnye materialy: structura, svoistva, tehnologiya (SPb.: Professiya, 2008), 560. (in Russ)
- 2 S.N. Ermakov, M.L. Kerber, T.P. Kravchenko, Plasticheskie massy, 10, 32 – 40 (2007). (in Russ)
- 3 S.V. Krauze V sb. Polimernye smesi. Pod red. Pola D. i S.M. N'iumena, (Moscow, Mir, 2002), 126-145. (in Russ)
- 4 M. Griepentrog, Polymer Testing, 32 (3), 455-460 (2013).
- 5 T. Nishira, S. Nishijima, and Okada T., JAERI-Conf., 95-020, 55-61 (2015).
- 6 A. Charlesby, Nature, 171 (4343), 167 (2013).
- 7 K. Little, Nature, 170 (4338), 1075 (2015).
- 8 U.A. Mihailin, Termoustoichivye polimery i polimernye materialy, (SPb.: Professiya, 2006), 623. (in Russ)
- 9 V.M. Svetlichnyi, and V.V. Kudryavcev, Vysokomolek. soed. B45, 6, 984-1036 (2003).
- 10 M. Gaurav, M. Kalyon Dilhan, and T.Frank, Journal of Applied Polymer Science, 114, 1312-1319 (2015).
- 11 G.K. Elyashevich, I.S. Kuryndin, V.K. Lavrentyev, A.Yu. Bobrovsky, and V. Bukošek, Physics of the Solid State, 54(9), 1907–1916 (2017).
- 12 L. Mandelkern Crystallization of Polymers, (Cambridge Academ., 2013), 478.
- 13 L. Mandelkern Crystallization of Polymers: V.2, Kinetics and Mechanisms, (Cambridge University Press, 2013), 478.
- 14 E.T. Krut'ko i dr. pod obsh. red. Prokopchuka N.R. Poliimidy. Sintez, svoistva, primeneniye, (Minsk: BGTU, 2002), 303. (in Russ)
- 15 V.Ya. Kabanov, V.N. Kudryavcev, Himiya vysokih energii, 37(1), 3 -7 (2003). (in Russ)
- 16 A.A. Shevchenko, Fizikohimiya i mehanika kompozicionnykh materialov, (SPb.: Professiya, 2010), 224. (in Russ)
- 17 A.I. Kupchishin, S.M. Ryabyh, Z.S. Nurkeeva, B.G. Taipova, B.A. Tronin, Zh.A. Omarbekova, Trudy Mezhdunarodnoi konferencii «Fiziko- himicheskie processy v neorganicheskikh materialah (FHP-9)». Kemerevo, 1, 580-583 (2004). (in Russ)
- 18 A.M. Kochnev, A.E. Zaikin, S.S. Galibeev, V.P. Arhireev Fizikohimiya polimerov, (Kazan': Izd-vo «Fen», 2003), 512. (in Russ)
- 19 James E. Mark, Harry R. Allcock, Robert West, Inorganic Polymers, (Oxford University Press, 2015), 360.
- 20 V.N. Kuleznev, V.A. Shershnev, Himiya i fizika polimerov, (Moscow, Kolos, 2007), 367. (in Russ)
- 21 V.K. Kryzhanovskii, V.V. Burlov i dr. Tehnicheskie svoistva polimernykh materialov, (SPb.: Professiya, 2005), 248. (in Russ)
- 22 M.A. Khan, U.S. Bhansali, M.N. Almadhoun, I.N. Odeh, D. Cha, H.N. Alshareef, Advanced Functional Materials, 24(10), 1372-1381 (2014).
- 23 T. Tanaki, K. Hozoyama, K. Hara, Dostizheniya v kriogennykh tehnikeskikh inzheneriyah, (Izdaniya 42, 1996), 21-27. (in Russ)
- 24 L. Narendry, V. Matkahari, S. Bhoresker, Materialovedeniye i razrabotka, 168 (1-3), 122-126 (2010). (in Russ)
- 25 K. Umbetova, V. Kravtsova, N. Korobova, and R. Iskakov, Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved., Elektron. 21, 201 (2016).