

Дәріс 10 Композиттерді компьютерлік модельдеу

DIGIMAT бағдарламасында жобаланған композиттің механикалық қасиеттерін компьютерлік модельдеу әдістемесі

Жылдам дизайн автомобиль және аэроғарыш өнеркәсібі үшін маңызды бола түсуде. Мұндай дизайнның бөлшектері пластикалық композиттер негізінде жасалуы мүмкін. Пластмассалар әртүрлі қолданбалар үшін жеке таңдалуы мүмкін және дизайнның үлкен еркіндігін көрсетеді.

Термопластикалық және терморезистивті матрицаларды қысқа, ұзын немесе үздіксіз шыны немесе көміртекті талшықтар болсын, әртүрлі талшықты күшейткіштермен біріктіруге болады. Дегенмен, композиттер белгілі бір қолдану үшін оңтайлы құрамдас бөлік дизайнын табуға келгенде нақты мәселе болуы мүмкін. Өнімділіктің толық спектрін өте күрделі қасиеттері бар бөлшектерде сынау керек. Статикалық және динамикалық жүктемелер кезінде бұзылу кезіндегі қаттылық пен мінез-құлықты түсіну өте қажет. Шаршаудың қызмет ету мерзімін болжауға сұраныс артып келеді. Негізгі міндет-композиттің өнімділігімен салыстырғанда микроқұрылымның және қасиеттің құрамдас бөліктерінің (процестен туындаған немесе ішінара индукцияланған) әсерін түсіну. Берілген шектеулердегі нақты өнімділікті ескере отырып, ең жақсы дизайнды алу үшін, мысалы, жалпы салмақ, өңдеу кезеңін, құрылысты және тіпті материалдың өзін оңтайландыру циклдарынан өту маңызды. Рөлдің түпкілікті орындалуы олардың үшеуіне бір уақытта байланысты болады. Бүгінгі таңда күрделі, көп масштабты модельдеу жасауға болады. Барлық үш әсер бір-бірімен толығымен байланысты және осылайша бір ерекше тәсілмен зерттелуі мүмкін. [INTEGRATED NONLINEAR MULTI-SCALE MATERIAL MODELLING OF FIBER REINFORCED PLASTICS WITH DIGIMAT: APPLICATION TO SHORT AND CONTINUOUS FIBER COMPOSITES LAURENT ADAM* AND ROGER ASSAKER*].

Композиттердің механикалық қасиеттерін болжамды зерттеу үшін DIGIMAT бағдарламасында есептеу эксперименттері жүргізілді. Сандық модельдеу және физикалық эксперимент негізінде термопластикалық полимерлерден дисперсті толтырылған композиттердің деформация сипатын зерттеу. Шыны толтырғыш бөлшектерінің мөлшері мен пішінінің жобаланған композиттің механикалық қасиеттеріне әсерін анықтау. Қысқа туралған шыны талшықтары бар полимер мен полиамид негізіндегі композициялық материалдар мысалында зерттеу:

- қатты бөлшектердің құрамының композиттердің негізгі механикалық параметрлерінің өзгеруіне әсері;
- әр түрлі термопластикалық матрицалары бар және әртүрлі геометриялық қосындылары бар композициялардың қасиеттері.
- толтырғыш бөлшектердің пішінінің композициялық материалдардың деформациялық әрекетіне әсері;
- ақырлы элементтік торды бөлу әдісінің композиттердің механикалық қасиеттерін модельдеу нәтижелеріне әсері.

- сандық және физикалық эксперименттермен анықталған композициялық материалдың механикалық сипаттамаларын тексеру.

DIGIMAT АЖЖ көмегімен нарықта бар термопластикалық матрицалық композиттік материалдар зерттелді. DIGIMAT NX модулі матрица мен қосылымдар бойынша материалдарды бақылауға мүмкіндік берді. Талдау көрсеткендей, нарықта полиамид матрицасы және қысқа шыны қосындылары бар дайын композициялар басым. Зерттеудің міндеті композициялық материалдың механикалық сипаттамаларын анықтау үшін есептеу экспериментін жүргізу болды.

Екі фазалы композиттердің механикалық сипаттамаларын анықтаудағы теориялық тәсіл Эшелби теориясына негізделген. Эшелби қосындылары бар жүйелердің деформация энергиясын есептеу әдісін ұсынды. Ол алған формула кәдімгі көлемді интеграцияны беткі интеграцияға түрлендіреді. Теорияға сәйкес композиция екі компоненттен тұрады деп қабылданады. r және m индекстері сәйкесінше бекемдетіп қосуды және матрицаны білдіреді.

Дж.Эшелби матрицадан алынған, пластикалық деформацияланған және оған жаңадан салынған изотропты эллипсоидты қосындыдағы кернеу өрісін анықтау мәселелерін шешті [82]. Кейінірек Мори мен Танака эллипсоидты қосылыстардың өзара әсерін ескере отырып, матрицадағы орташа кернеу өрісін шығарды. Эшебли теориясы мен Мори –Танака теоремасына сүйене отырып, Тандом мен Венг изотропты матрицамен талшықты және дисперсті қатайтылған композиттер үшін серпімділік модульдерін есептеді. Бұл модель бірінші және екінші типтегі Юнг модулін, толтырғыш пен матрицаның Пуассон коэффициентін және қосу формасының факторын $0 < \zeta < \infty$ ескереді. 1-6 теңдеулер Юнг модуліне, ығысу және көлемдік модульдерге және композициялық материалдың Пуассон коэффициентіне сәйкес келетін алты тәуелсіз тұрақтыны анықтайды.

$$\frac{E_{11}}{E_m} = \frac{1}{1+} \quad (1)$$

$$\frac{E_{22}}{E_m} = \frac{E_{33}}{E_m} = \frac{1}{1+} \quad (2)$$

$$\frac{\mu_{12}}{\mu_m} = 1 + \frac{c_r}{2c_m S_{1212} +} \quad (3)$$

$$\frac{\mu_{23}}{\mu_m} = 1 + \frac{c_r}{2c_m S_{2323} +} \quad (4)$$

$$\frac{\kappa_{23}}{\kappa_m} = \frac{(1+\nu_m)(1-2\nu_m)}{1-\nu_m(1+2\nu_{12})+c_r} \quad (5)$$

$$v_{12} = \frac{v_m A - c_r (A_3 - v_m A_4)}{A + c_r (A_1 + 2v_m A_2)} \quad (6)$$

A_1, A_2, \dots, A коэффициенттеріне және S_{ijkl} Эшелби тензор компонентіне қосындылардың пішініне және фазалардың серпімді сипаттамаларына тәуелді өрнектерді [82] табуға болады. Осылайша енгізілген серпімділік коэффициенттері материалдың макроскопиялық серпімді қасиеттерін анықтайтын тиімді шамалар болып табылады.

Ұсынылған әдіс бағдарламалық жасақтама кешенін қолданатын модельдеудің DIGIMAT үш негізгі кезеңін қамтиды. DIGIMAT бағдарламалық жасақтамасы - бұл композициялық материалдардың сипаттамаларын анықтау үшін микро деңгейлі тәсілді қолданатын әлемдегі жалғыз бағдарламалық жасақтама. DIGIMAT үшін бастапқы деректер әр фазаның қасиеттері, топологиясы және көлемдік/массалық мазмұны, сондай-ақ композициялық материалдың микроқұрылымы болып табылады. Бұл мәліметтер материалдың математикалық моделін әр фазаның және микроқұрылымның қасиеттеріне сезімтал микро деңгейде құрастырады және композициялық материалдың қажетті механикалық, жылу немесе электрлік сипаттамаларын анықтайды (1-сурет).



Сурет 1 – Композициялық материалдардың сипаттамаларын анықтауға арналған микродеңгейлі тәсіл

Бағдарламалық кешен көп фазалы материалдардың кең спектрін модельдеу мүмкіндігін қамтамасыз етеді және композициялық құрылымдарды жобалауда кешенді тәсілді қолдануға мүмкіндік береді: материалдарды әзірлеуден және үлгілерді виртуалды сынақтан өткізуден бастап, өндіріс технологиясын модельдеуге және құрылымның соңғы сипаттамаларын алуға дейін.

MSC Digimat MF модулі микро деңгей тәсілінде модельдеуді жүзеге асыру үшін пайдаланылды.

Бастапқы деректер:

- шыны қосындыларының механикалық сипаттамалары;
- матрица материалының механикалық сипаттамалары;
- шыны қосындылардың мөлшері;
- шыны қосындылардың пішіні;

- нығайтатын бөлшектердің пайыздық мөлшері.
 Модельдеуге арналған деректер 5-кестеге келтірілген.
 Кесте 5 - Сандық эксперимент үшін механикалық деректер

Параметрлер	Мәндер
Полимердің серпімділік модулі, МПа	2360
Полимердің тығыздығы, кг/мм ³	$1,14 \cdot 10^{-9}$
Полимердің төменгі аққыштық шегі, МПа	75 МПа
Бринелль бойынша полимердің қаттылығы, МПа	95 МПа
Полиамидтің серпімділік модулі, МПа	3000
Полиамидтің Пуассон коэффициенті	0,37
Полиамидтің төменгі аққыштық шегі, МПа	65 МПа
Бринелль бойынша полиамидтің қаттылығы, МПа	85 МПа
Шыны серпімділік модулі, МПа	7200
Шыны тығыздығы, кг/мм ³	$7,8 \cdot 10^{-9}$
Шынының Пуассон коэффициенті	0,3

Бүгінгі таңда әртүрлі геометриялық қасиеттері бар туралған шыны талшықты жеткізетін көптеген компаниялар бар. Виртуалды эксперимент үшін 6-кестеге келтірілген талшықтардың маркалары, геометриялық сипаттамалары қолданылды.

Кесте 2 - туралған шыны талшықтың геометриялық көрсеткіштері [84-90]

Шыны талшықтарының маркасы	Талшықтардың диаметрі, мкм	Талшықтардың ұзындығы, мм
ECS 11-4.5-560A	11-0,011 мм	4,5-4500
ECS 13-3-552B	13-0,013 мм	6-6000
CS 7938	50 мкм	3000 мкм

Композиттің механикалық қасиеттеріне әсер ететін маңызды факторлардың бірі-кеңістіктегі талшықтардың бағыты. Бұл параметрдің көрсеткіші бағдарлау тензоры T .

$$T = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \quad (7)$$

мұндағы a_{ij} – x, y, z осьтер бойындағы бағыттарға сәйкес келетін бағдарлау тензорының компоненттері.

Композиттердің механикалық қасиеттерін анықтайтын параметрлер бағдарлама интерфейсінде келесі шамалар арқылы жүзеге асырылады:

- «Mass fraction» - қоспалардың жаппай мазмұны, мынадай жағдайлар қарастырылды 10 %, 20%, 30%;

- «Fixed aspect ratio» - қосу бөлшектерінің пішінін анықтайтын коэффициент, біздің жағдайда ұзындықтың бөлшек диаметріне қатынасы

$$k = \frac{l_f}{d_f} = 468; 187; 60;$$

- «Orientation tensor» - талшықты бағдарлау тензоры, үш жағдай қарастырылды:

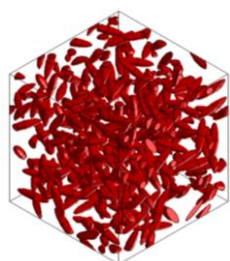
а) $a_{11} = 0,34; a_{22} = a_{33} = 0,33,$

б) $a_{11} = a_{22} = 0,5; a_{33} = 0;$

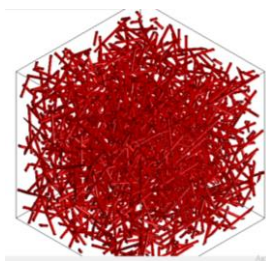
в) $a_{11} = 1; a_{22} = a_{33} = 0$ бағдарлау тензорының қалған мүшелері нөлге тең.

- «Shape» - қосу формасын өзгертуге мүмкіндік береді, біз эллиптикалық қосу формасын таңдадық.

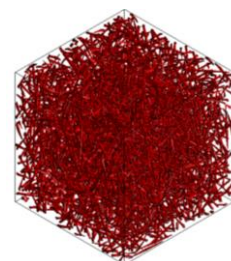
2-суретте қоспалардың сандық үлесінің өзгеруіне байланысты өкілдік элементтің фазалық құрылымының өзгеруі көрсетілген.



а) $m_f = 10\%$



б) $m_f = 20\%$



с) $m_f = 30\%$

Сурет2 – Өкілдік элемент а) $m_f = 10\%$, б) $m_f = 20\%$, с) $m_f = 30\%$

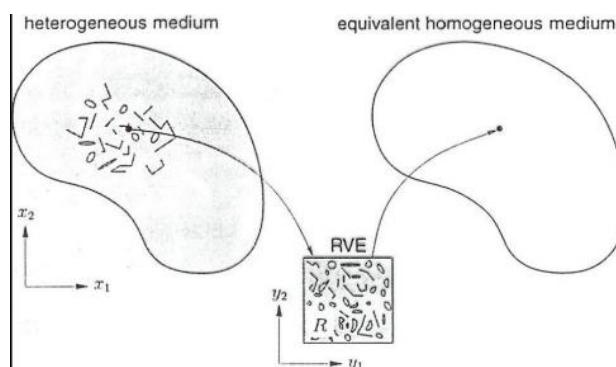
Зерттеу полимерлі және полиамидті матрицалар мен шыны қосындыларға негізделген композиттердің механикалық қасиеттеріне толтырғыш көлемінің әсері, MF модулін және 6-кестеде келтірілген деректерді қолдана отырып жүргізілді, полимердің және бөлшектердің өлшемдік қатынасы $k_r = 467$ болатын қысқа туралған шыны талшықтармен толтырылған композиттік материалдардың деформация қисықтарымен 8-суретте көрсетілген нәтижелер алынды.

Композиттік материалдардың механикалық сипаттамаларының сандық экспериментінің нәтижелері

Digmat құрамындағы композиттік материалдарды модельдеу технологиясы күрделі көп компонентті материалдардың мінез-құлқын дәл болжау үшін микромеханикалық тәсілдерге сүйенеді және композиттік материалды әзірлеу, өндіріс процесі және ақырлы элементтік есептеу арасындағы алшақтықты жоюға мүмкіндік береді.

Digmat әртүрлі матрицалары бар (полимерлі, металл, резеңке) термопластиктердің, терморективті пластмассалардың және композиттік материалдардың сипаттамаларын модельдеуге мүмкіндік береді. Материалдардың алынған сипаттамалары кейіннен ақырлы элементтер

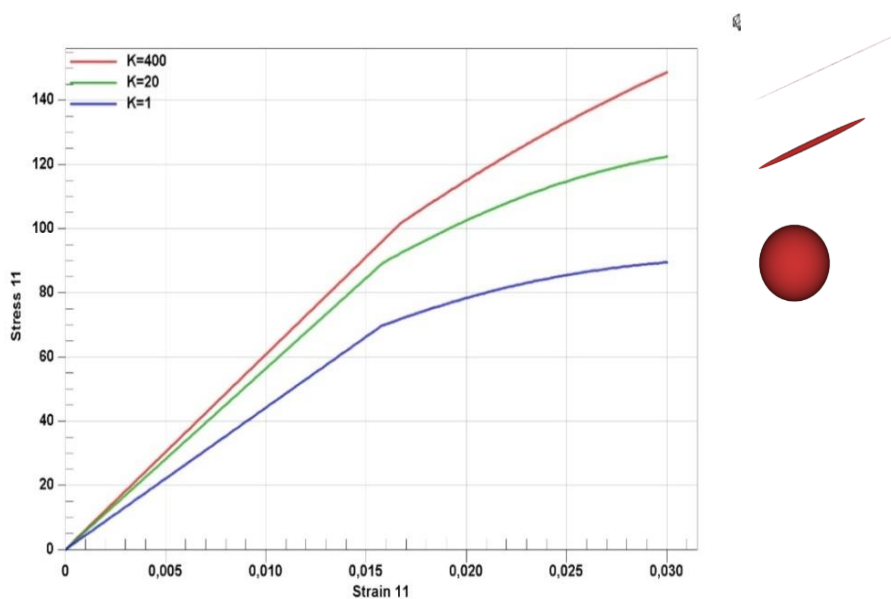
пакеттерінде есептеулер жүргізу үшін берілуі мүмкін. Композиттерді өндірудің технологиялық процестерімен байланысты материалдар сипаттамаларының гетерогенділігін ескеруге болады: қысыммен қалыптау, төсеу, престау. .



Сурет 3 - Термопластикалық полимерді көп масштабты талдау [92]

Полимер матрицасына негізделген композиттердің механикалық қасиеттеріне қосу формасының коэффициентінің әсері.

Қосындылардың пішінін, яғни қосындылардың шыны бөлшектерінің өлшемдерінің арақатынасын зерттеу нәтижелері 4-суретте көрсетілген.



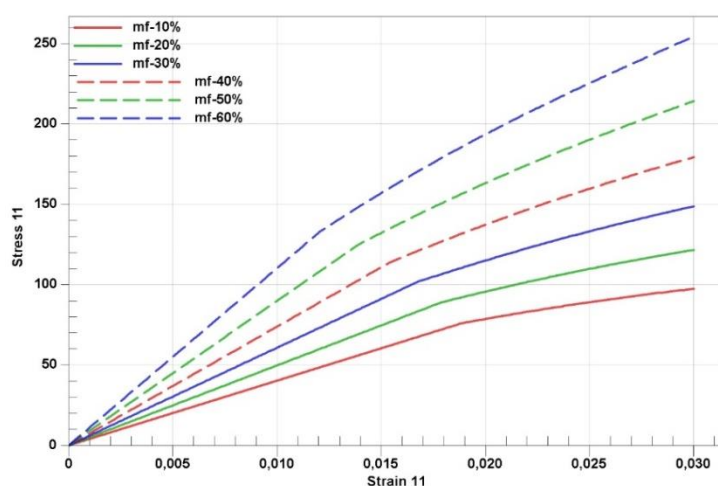
Сурет 4 - Құрамында полимер матрицасына негізделген композиттік материалға арналған кернеу-деформация диаграммалары

а) талшықтар (қызыл сызық) в) эллипсоидты қосындылар (жасыл сызық)
г) шыны сфера (көк сызық)

5-суретте көрсетілген диаграммалар қосылыстардың пішініне байланысты композиттің механикалық қасиеттерінің мәндерінің үлкен таралуын көрсетеді, ине пішініндегі ең үлкен мән.

Толтырғыш көлемінің полимер пен полиамид матрицасы мен шыны қоспаларына негізделген композиттердің механикалық қасиеттеріне әсері.

MF модулін және 6-кестеде келтірілген деректерді пайдалана отырып, бөлшектер өлшемінің қатынасы $k_r=400$ болатын полимерлі және қысқа туралған шыны талшықтармен толтырылған 6-суретте композиттік материалдардың деформация қисықтарымен нәтижелері алынды.



Сурет 5 а арналған кернеу-деформация диаграммалары а) 10% қосу (жасыл сызық) в) 20% қосу (қызыл сызық) г) 30% қосу (көк сызық)

Полимер матрицасының құрамындағы композиттің қасиеттерін модельдеу нәтижелері 7-кестеде келтірілген.

Кесте - 7 Инженерлік тұрақтылар

m_f - массалық үлес %	E МПа	G МПа	μ	ρ Кг/м ³
10	3200	1156	0,35	1.26E-009
20	4029	1498	0,33	1.33E-009
30	5060	1895	0.32	1.415E-009
40	7389	2769	0.32	1.511E-009
50	8991	3386	0.31	1.623E-009
60	11003	4175	0.31	1.74E-009

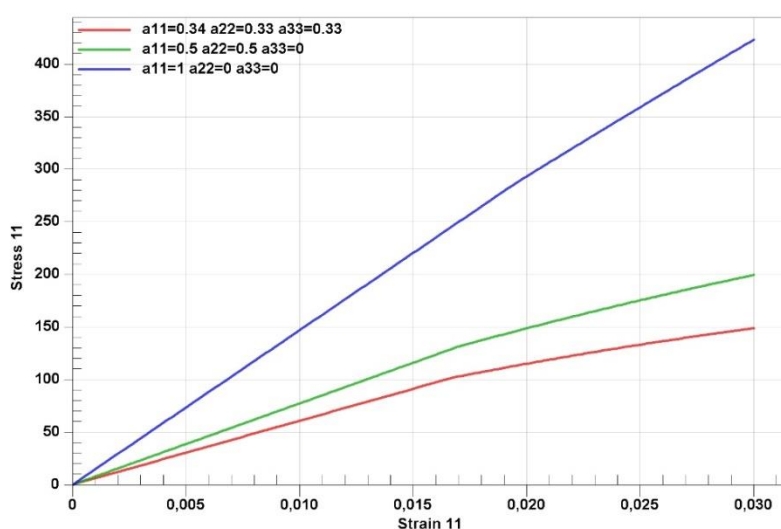
7-кестеде келтірілген деректер қосындылардың массалық үлесі ұлғайған сайын бірінші және екінші типтегі серпімділік модульдерінің ұлғаюын және Пуассон коэффициентінің шамасының төмендеуін көрсетеді, бұл серпімділіктің жоғалуын және материалдың сынғыштыққа деген ұмтылысын көрсетеді.

Полимер матрицасына негізделген композиттердің механикалық қасиеттеріне талшықтың бағытының әсері.

Композиттің механикалық қасиеттеріне әсер ететін маңызды факторлардың бірі – кеңістіктегі талшықтардың бағыты. Бұл параметрдің көрсеткіші бағдарлау тензоры T

$$T = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix}$$

Полимер матрицасы мен туралған шыны талшықтарға негізделген композициялық материалдардың механикалық қасиеттерін сипаттайтын әдебиеттерде және компьютерлік модельдерді құру бойынша зерттеулерде талшықтардың бағытын анықтау үшін нақты әдістер мен ұсыныстар болмағандықтан, модельдеу жазық, көлемді және бір осьті бағытта жүргізілді.



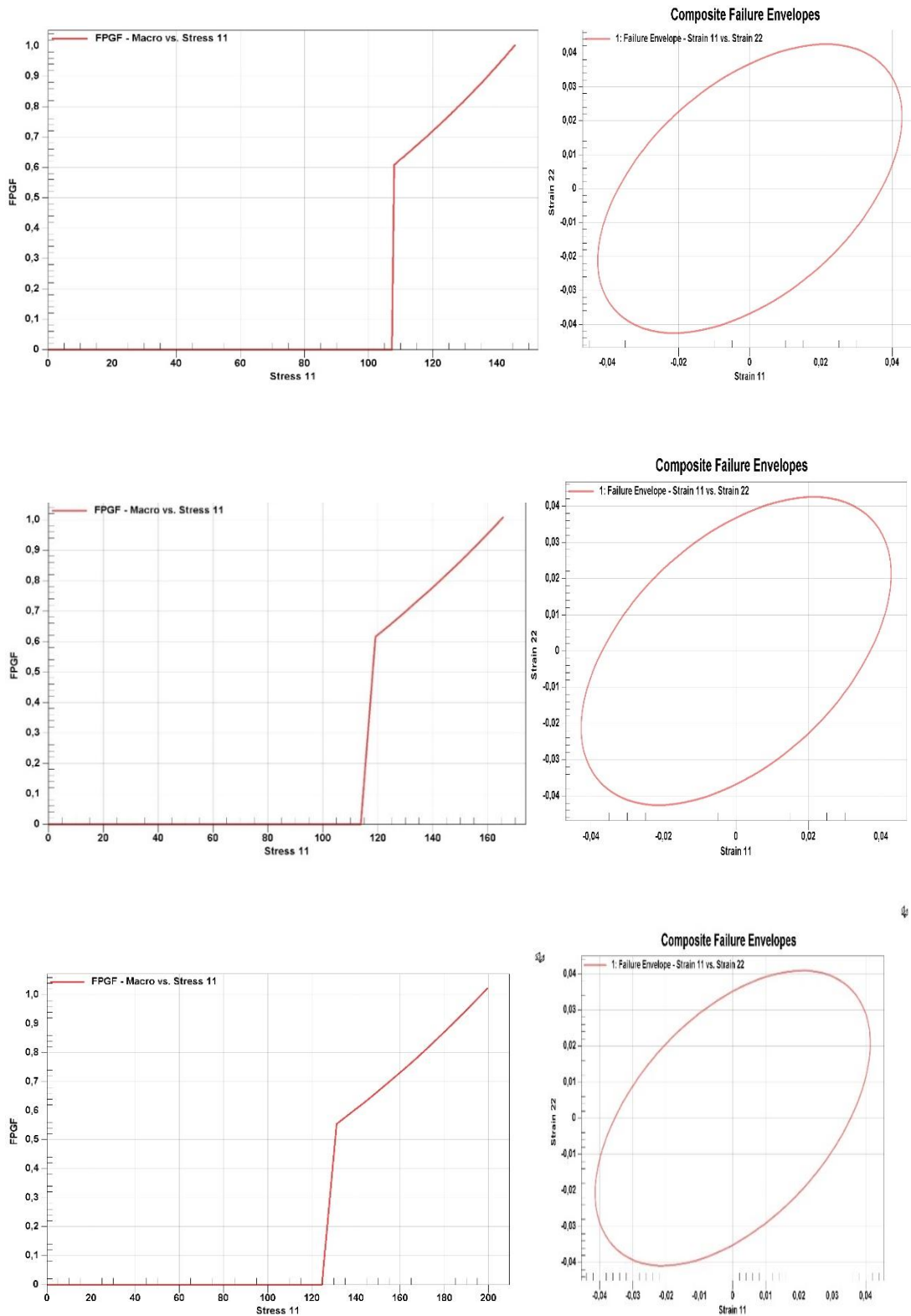
Сурет 6 - Полимер матрицасы бар композиттің созылу диаграммалары, талшықтардың әр түрлі бағыттары бар: : а – көлемдік бағытпен $a_{11} = 0.34$, $a_{22} = 0.33$, $a_{33} = 0.33$; б – жазықтық бағытымен $a_{11} = 0.5$, $a_{22} = 0.5$, $a_{33} = 0$; с – жазықтық бағытымен $a_{11} = 1$, $a_{22} = 0$, $a_{33} = 0$

7-суретте келтірілген диаграммада композиттің механикалық сипаттамалары нәтижелерінің үлкен дисперсиясы көрінеді, болашақта модельдеу нәтижелерін табиғи эксперименттердің нәтижелерімен тексеру қажет.

Композиттің сыну критерийі бойынша толтырғыштың массалық үлесінің беріктікке әсері.

Сандық эксперимент жүргізу үшін 30%, 40%, 50% толтырулары бар композициялар таңдалды, өйткені кернеу – деформация қисықтары біздің міндетіміздің жағдайына ең жақын болып табылады. Бірақ бұл қисықтар микро деңгейдегі материалдың беріктік шегі туралы сұраққа жауап бермейді. Материалдың бұзылу кернеулерінің мәндерін анықтау үшін біз MF қолданамыз, мұнда бұзылу критерийі бойынша қосымша параметрлерді енгізу қажет.

Құрылымның беріктігін болжау үшін эквивалентті кернеу критерийлері, сондай-ақ трансверсальды - изотропты денелер (3D) үшін Цай-Хилл критерийі қолданылды, бірінші жойылған FPGF псевдо-дәнінің өндірісі қолданылды .



Сурет7 - Құрамында полимер матрицасына негізделген композиттік материал үшін ПМ үшін сыну қисықтары, а) 30% қосу (жасыл сызық) в) 40% қосу (қызыл сызық) г) 50% қосу (көк сызық)

7-суретте бұзылу диаграммалары және микро деңгейдегі беріктік беттері көрсетілген. Толтырғыштың массалық үлесінің жоғарылауымен беріктіктің артуы анық, бірақ деформация деңгейінің төмендеуін байқауға болады. Композиттің бұзылуы $\sigma = 150$ МПа , $\varepsilon = 0,045$ – 30% толтырғышпен, $\sigma = 165$ МПа, $\varepsilon = 0,045$ - 40% толтырғышпен және $\sigma = 150$ МПа , $\varepsilon = 0,04$ -50% толтырғышпен жүреді.

Бақылау сұрақтары

- 1 Композиттерде модельдеу дегеніміз не ?
- 2 Композиттерді модельдеуге арналған бағдарламалық өнімді атаңыз .
- 3 Қосуды модельдеу бағдарламасына қандай деректер енгізіледі
- 4 Матрицаны модельдеу үшін қандай деректер енгізіледі DIGIMAT бағдарламасы қандай нәтижелер шығарады
- 5 Композиттің қандай қасиеттері компьютерлік экспериментпен анықталады