

АКАДЕМИЯ НАУК ЛАТВИЙСКОЙ ССР  
Институт механики полимеров

На правах рукописи

СОКОЛОВ ЕВГЕНИЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ

ДЕФОРМАЦИОННЫЕ И ПРОЧНОСТНЫЕ СВОЙСТВА  
ВЫСОКОПРОЧНЫХ ОРГАНОПЛАСТИКОВ

ОГ.04.19 - физика и механика полимеров

Диссертация  
на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
кандидат технических наук,  
старший научный сотрудник

Р.Д.МАКСИМОВ

РИГА - 1980

О Г Л А В Л Е Н И Е

|   | стр. |
|---|------|
| В В Е Д Е Н И Е .....   | 5    |
| 1. Актуальность темы .....  | 5    |
| 2. Сравнительный обзор свойств основных армирующих волокон и композитов на их основе .....                      | 6    |
| 3. Постановка задачи исследования .....   | 16   |
| 4. Краткое содержание работы .....  | 17   |
| Г Л А В А I. ХАРАКТЕРИСТИКИ УПРУГОСТИ ОРГАНОПЛАСТИКА.....   | 20   |
| I.1. Вводные замечания .....  | 20   |
| I.2. Расчет характеристик упругости однонаправленно армированного органо-пластика .....                         | 23   |
| I.3. Расчет характеристик упругости слоистого органо-пластика .....   | 35   |
| I.4. Расчет характеристик упругости органо-стеклопластика .....   | 39   |
| Выводы по главе I .....   | 49   |
| Г Л А В А II. ПОЛЗУЧЕСТЬ ОРГАНОПЛАСТИКА ПРИ РАСТЯЖЕНИИ.....   | 50   |
| 2.1. Расчет ползучести однонаправленно армированного органо-пластика по реологическим свойствам компонент ..... | 50   |
| 2.2. Оценка ползучести слоистого органо-пластика по реологическим свойствам отдельного слоя .....               | 60   |

|  |     |
|--|-----|
| 2.3. Прогнозирование длительной ползучести<br>органопластика по данным экспресс-<br>испытаний .....                        | 73  |
| Выводы по главе II .....   | 80  |
| Г Л А В А III. ПРОЧНОСТЬ ОРГАНОПЛАСТИКА ПРИ КРАТКОВРЕМЕННОМ НАГРУЖЕНИИ.....  | 81  |
| 3.1. Технические средства и методика проведения испытаний .....  | 82  |
| 3.2. Прочность органопластика при комнатной температуре .....  | 96  |
| 3.3. Влияние температуры на прочность органопластика при плоском напряженном состоянии .....                               | 107 |
| 3.4. Прочность органостеклотекстолита в зависимости от относительного содержания органо- и стеклоткани .....               | 119 |
| Выводы по главе III .....  | 127 |
| Г Л А В А IV. ДЛИТЕЛЬНАЯ ПРОЧНОСТЬ ОРГАНОПЛАСТИКА .....  | 129 |
| 4.1. Экспериментальное определение длительной прочности однонаправленно армированного органопластика .....                 | 129 |
| 4.2. Поверхности равнодлительной прочности органопластика при плоском напряженном состоянии .....                          | 132 |
| 4.3. Возможности прогнозирования длительной прочности органопластика по данным испытаний при повышенных температурах ..... | 139 |

|   |     |
|---|-----|
| Выводы по главе IУ .....                                | 147 |
| ОБЩИЕ ВЫВОДЫ .....                                      | 148 |
| НАУЧНАЯ НОВИЗНА РАБОТЫ.....                             | 150 |
| ПРАКТИЧЕСКАЯ ЦЕННОСТЬ И РЕКОМЕНДАЦИИ К ПРИМЕНЕНИЮ ..... | 151 |
| ЛИТЕРАТУРА .....  | 152 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ .....  | 170 |

## В В Е Д Е Н И Е

### I. Актуальность темы.

К настоящему времени армированные пластики получили распространение в качестве конструкционных материалов. Наиболее широко используются стеклопластики. Однако развитие современной техники требует создания новых легких композитных материалов, превосходящих по своим упругим и прочностным свойствам традиционные металлы и сплавы. В начале 70-х годов появились первые сообщения о разработке нового класса армирующих наполнителей - высокопрочных и высокомодульных органических волокон на основе ароматических полиамидов, что, в свою очередь, привело к созданию новых конструкционных композитов - органопластиков. Предварительные исследования показали, что эти материалы обладают ценным комплексом свойств. Удельная прочность органопластика при растяжении в направлении армирования в 1,5 раза превышает прочность других композитов и 5-6 раз прочность металлов и сплавов. Удельный модуль упругости органопластика в 2 раза превышает модуль стеклопластика. Однако приведенные показатели еще не раскрывают потенциальных возможностей органопластиков как конструкционных материалов. Для рационального использования и обоснованной разработки конструкций из органопластика необходимы детальные исследования механических свойств этого материала с позиций механики композитных материалов.

## 2. Сравнительный обзор свойств основных армирующих волокон и композитов на их основе.

Развитие современной техники предъявляет все возрастающие требования к материалам. Перспективным видом новых конструкционных материалов являются композиты на основе полимерных и металлических матриц, упрочненных стеклянными, углеродными, борными и органическими волокнами. В 1980 году объем производства только стеклопластиков предполагается увеличить более чем в два раза по сравнению с 1975 годом /105/. Как отмечено в /30/, дальнейший прогресс в области конструкционных материалов будет связан с развитием композитов на основе полимерных и металлических связующих. Причины, обусловившие такое положение композитов перед металлами, достаточно очевидны: технологичность, низкая плотность, химическая стойкость, высокая вязкость разрушения.

Органические волокна получили распространение в качестве арматуры для конструкционных пластиков лишь после создания высокопрочных органических волокон на основе ароматических полиамидов /64, 84, 121, 129, 140, 144, 145, 156/. Прочность этих волокон в два раза, а модуль в 4 раза выше по сравнению с нейлоном /159/. Выпускаемые ранее пластики на основе органических волокон уступали стеклопластику по удельной прочности - в 1,5 раза, а по удельному модулю упругости - в 1,5-3 раза ( табл. I ).

Таблица I

Сравнение физико-механических свойств органопластиков и стеклотекстолита /60/.

| Наполнитель                          | Плотность,<br>г/см <sup>3</sup> | Прочн.,<br>МПа | Мод.упруг.,<br>МПа | Уд.прочн.,<br>км | Уд.модуль<br>упр.,<br>км |
|--------------------------------------|---------------------------------|----------------|--------------------|------------------|--------------------------|
| Полиамидное<br>волокно<br>( капрон ) | 1,15                            | 170            | 1700               | 14,8             | 147                      |

|                           |      |     |       |      |      |
|---------------------------|------|-----|-------|------|------|
| Полипропилен              | 1,00 | 60  | 2500  | 6,0  | 250  |
| Полиэфир (лавсан)         | 1,30 | 150 | 5000  | 11,5 | 385  |
| Полиимид (аримид)         | 1,16 | 117 | 7600  | 10,1 | 655  |
| Полиакрилонитрил (нитрон) | 1,22 | 113 | 6400  | 9,3  | 525  |
| Поливинил. спирт. (винол) | 1,24 | 180 | 11000 | 14,5 | 887  |
| Ароматич. полиамид        | 1,30 | 527 | 33000 | 40,5 | 2538 |
| Е-стекло                  | 1,80 | 443 | 25300 | 24,6 | 1405 |

В дальнейшем, говоря об органических волокнах, мы будем иметь ввиду высокопрочные органические волокна на основе ароматических полиамидов. Впервые такие волокна были получены независимо в СССР /69,70,84/ и в США /124,149/ в 1971 году. Производимые в США фирмой "Du Pont" высокопрочные органические волокна известны под названием PRD-49 /156/. Деформационные и прочностные свойства основных видов волокон, применяемых при изготовлении современных высокопрочных и высокомодульных композитов, приведены в табл.2.

Таблица 2

Упругие и прочностные свойства армирующих волокон.

| Волокно                         | Плотн.,<br>г/см <sup>3</sup> | Прочн.,<br>МПа | Мод.упр.,<br>ГПа | Уд.прочн.,<br>км | Уд.мод.,<br>упр.,<br>км | Литерат.<br>источн. |
|---------------------------------|------------------------------|----------------|------------------|------------------|-------------------------|---------------------|
| 1                               | 2                            | 3              | 4                | 5                | 6                       | 7                   |
| <u>Органическое</u><br>PRD-49-I | 1,38                         | 2400           | 140-175          | 173              | 10100-<br>12680         | /137/               |
| PRD-49-III                      | 1,45                         | 2800           | 133              | 193              | 9170                    | /137/               |

| I                  | 2    | 3    | 4   | 5   | 6     | 7     |
|--------------------|------|------|-----|-----|-------|-------|
| <i>PRD-49-IY</i>   | 1,45 | 3010 | 84  | 208 | 5730  | /137/ |
| <u>Стекло</u>      |      |      |     |     |       |       |
| <i>S-стекло</i>    | 2,49 | 4700 | 87  | 188 | 3500  | /113/ |
| <i>E-стекло</i>    | 2,49 | 2530 | 70  | 102 | 2820  | /113/ |
| <i>T-25(EM)-78</i> | 2,50 | 3900 | 93  | 156 | 3720  | /76/  |
| <u>Углеродное</u>  |      |      |     |     |       |       |
| <i>Modmor -I</i>   | 2,00 | 1750 | 420 | 88  | 21000 | /40/  |
| <i>Modmor -II</i>  | 1,75 | 2800 | 270 | 160 | 15400 | /40/  |
| <i>EMH-4</i>       | 1,75 | 2500 | 280 | 143 | 16000 | /76/  |
| <u>Борное</u>      | 2,63 | 3230 | 421 | 123 | 16040 | /113/ |

Как следует из таблицы волокна *PRD-49* выпускаются с широким диапазоном показателей прочности (2400-3000 МПа) и жесткости (84-175 ГПа). В последние годы семейство этих волокон получило торговое название *Kevlar*: *Kevlar-29* вместо *PRD-49-IY* и *Kevlar-49* вместо *PRD-49-III /148/*. Волокно *Kevlar-29* имеет более низкий модуль упругости (84 ГПа) по сравнению с *Kevlar-49* (133 ГПа), большее на 60 % удлинение (до 3,3 %) и лучшую пластичность /42/. *Kevlar-29* является более стойким к образованию трещин и применяется в тканях, тросах, оплетках кабелей /153/. *Kevlar-49* в основном предназначен для использования в качестве армирующего наполнителя в конструкционных композитах. Характерной особенностью органических волокон является небольшая плотность : они на 40 % легче стекловолокон, на 45 % легче волокон бора и на 17-30 % легче углеродных волокон. Сочетание низкой плотности и высоких значений прочности и модуля упругости приводит к весьма высоким удельным характеристикам (рис.1).



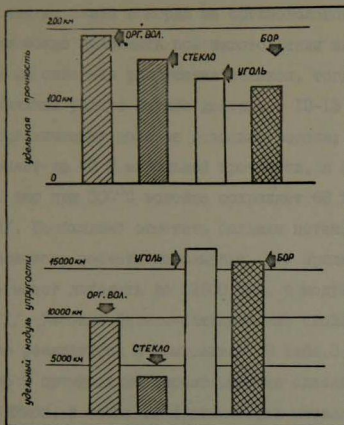


Рис. 1. Удельные характеристики основных армирующих волокон.

Удельная прочность органических волокон превышает прочность других видов волокон и достигает 208 кн; это в 10 раз выше чем у алюминия и стали и в 8 раз выше чем у лучших титановых сплавов. Удельный модуль упругости органических волокон в три раза превышает модуль высокопрочных стекловолокон, но уступает модулю углеродных и борных волокон. Быстрому внедрению органических волокон и широкому промышленному использованию способствует относительно низкая цена; к настоящему времени они стоят лишь вдвое дороже высокопрочных стекловолокон типа "S", годовое производство которых превышает 450 тыс. тонн /42/. Большим преимуществом органоволокон является их высокая технологичность. Все методы и оборудование текстильной промышленности пригодны для полу-

чения пряжи, ленты, ткани и корда из органоволокон /112/. Органические волокна можно применять при изготовлении изделий с резкими перегибами не опасаясь разрушения волокон, тогда как у борных волокон минимальный радиус изгиба достигает 12-13 мм /42/. Термостойкость органических волокон довольно высока; так при 300°C волокно сохраняет до 80 % начальной прочности, а после выдержки в течение 100 час при 300°C волокно сохраняет 68 % начальной прочности /84/. Необходимо отметить большие потенциальные возможности органоволокон; расчеты показывают, что предельно достигаемая прочность может доходить до 12000 МПа, а модуль упругости до 250 ГПа /71/. Высокие физико-механические свойства органоволокон эффективно реализуются в композитах. В табл.3 приводятся основные упругие и прочностные характеристики однонаправленно армированных пластиков, а также конструкционных металлов и сплавов. Удельные характеристики этих материалов сопоставлены на рис.2.

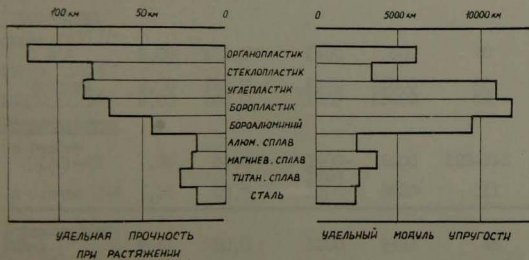


Рис.2. Удельные механические характеристики конструкционных материалов.

Таблица 3

Удельные характеристики однонаправленных композитов и металлов (объемное содержание арматуры в композитах 60 %, связующее - эпоксидное).

| Материал  | Плотн.,<br>г/см <sup>3</sup> | Мод.упр.,<br>ГПа  | Прочн.,<br>МПа | Уд.мод.<br>упр.,<br>кМ | Уд.прочн.,<br>кМ | Лит.<br>ис-<br>точн. |
|---|------------------------------|-------------------|----------------|------------------------|------------------|----------------------|
| <u>Стеклопластик</u>                                    |                              |                   |                |                        |                  |                      |
| на основе<br>Е-стекла                                   | 2,10                         | 57,3 <sup>ж</sup> | 1210           | 2730                   | 58               | /126/                |
| на основе<br>S-стекла                                   | 2,10                         | 73,0              | 1650           | 3480                   | 79               | /42/                 |
| на основе<br>стекла ВМ-I                                | 2,20                         | 58,0              | 1850           | 2636                   | 84               | /24/                 |
| <u>Углепластик</u>                                      |                              |                   |                |                        |                  |                      |
| на основе высо-<br>копрочн. волокна<br><i>Grafil</i> HT | 1,50                         | 123,0             | 1390           | 8200                   | 93               | /67/                 |
| на основе высо-<br>комод. волокна<br><i>Grafil</i> HM   | 1,60                         | 181,6             | 1160           | 11350                  | 73               | /67/                 |
| на основе во-<br>локон ВМН-5                            | 1,50                         | 170,0             | 1100           | 11300                  | 73               | /78/                 |
| <u>Боропластик</u>                                      |                              |                   |                |                        |                  |                      |
| фирма "AVCO"<br>С Ш А                                   | 2,00                         | 212,0             | 1400           | 10600                  | 70               | /32/                 |
| фирма "SNPE"<br>Франция                                 | 2,00                         | 220,0             | 1350           | 11000                  | 68               | /32/                 |
| КМБ/3, СССР   | 2,00                         | 260,0             | 1200           | 13000                  | 60               | /20/                 |
| <u>Обрэнпластик</u>                                     |                              |                   |                |                        |                  |                      |
| на основе<br><i>PRD</i> -49                             | 1,36                         | 84,4              | 1400-<br>1700  | 6200                   | 103-125          | /42,<br>149/         |
| на основе СВМ   | 1,35                         | 80,6              | 1500           | 5920                   | 111              | /78/                 |
| <u>Боралюминий</u>                                      |                              |                   |                |                        |                  |                      |
| ВКА-I   | 2,65                         | 250,0             | 1200           | 9433                   | 45               | /32/                 |
| Алюм. сплав<br>АК-4-I                                   | 2,75                         | 70,0              | 450            | 2500                   | 17               | /32/                 |
| Магн. сплав<br>ВМД-6                                    | 1,80                         | 50,0              | 380            | 2800                   | 21               | /32/                 |
| Титан. сплав<br>ВТЗ-I                                   | 4,50                         | 120,0             | 1200           | 2700                   | 27               | /32/                 |
| Сталь 30-XГСА   | 7,85                         | 210,0             | 1200           | 2600                   | 15               | /78/                 |

\* Упругие и прочностные характеристики композитов получены при растяжении в направлении армирования.

Из приведенных в табл. 3 данных следует, что органопластики превосходят другие композиты по удельной прочности в среднем в 1,6, а металлы более чем в 5 раз. Удельный модуль упругости органоластика примерно в 2 раза больше, чем у стеклопластика.

Важным показателем для конструкционных материалов является сохранение свойств при повышенных и пониженных температурах. Механические свойства армированных пластиков при повышенных температурах определяются в основном термостойкостью матрицы. Органоволокна обычно используют в композиции с эпоксидным связующим, обладающим рядом преимуществ по сравнению с другими смолами: технологичностью, дешевизной, хорошей адгезией /10,82/. Разработка термостойких эпоксидных смол привела к созданию имидо-эпоксидных связующих с рабочей температурой до 260-280°C /82/. Однако термостойкость пластиков на основе широко используемых эпоксидных связующих сравнительно невелика. Например, повышение температуры до 180°C снижает прочность эпоксидных текстолитов в среднем на 50% в зависимости от вида нагружения и армирующей ткани / 152 / ( рис.3 ).

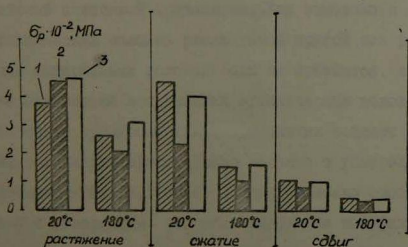


Рис.3. Зависимость прочности эпоксидных текстолитов от температуры /152/. 1 - стеклопластик (Е-стекло); 2 - органопластик (Kevlar-49); 3 - углепластик (Thornel-300).

Однонаправленно армированный органоупластик при растяжении в направлении волокон в диапазоне температур  $-34^{\circ}$   $+53^{\circ}$  почти не меняет начальную прочность и модуль упругости, а линейность диаграммы деформирования сохраняется в интервале от  $-253^{\circ}\text{C}$  до  $+240^{\circ}\text{C}$  /45,127/. При понижении температуры до  $-160^{\circ}\text{C}$  прочность при растяжении снижается незначительно /139/. Эта особенность позволяет применять органоупластики в криогенной технике.

Высокая работа разрушения обусловила введение органических волокон в высокомодульные композиты с целью увеличения их ударной вязкости /28,76,132,146,162/. Органоупластики превосходят стеклоупластики по диэлектрическим и теплоизоляционным свойствам /42,45,149/. Преимуществом органоупластиков перед стеклоупластиковыми является их коррозионная стойкость в плавиковой кислоте /112/.

Наиболее значительный недостаток органоупластиков - низкая прочность при сжатии вдоль волокон. Эта величина составляет около 20% ( $\approx 300$  МПа) от прочности при растяжении /128,129,136/. Как показывают исследования /81,120,136,143/, этот факт объясняется фибриллярной структурой анизотропных органических волокон и их низкой сдвиговой прочностью. Как отмечено в /66/, при сжатии органических волокон реализуется другой вид разрушения, чем в случае минеральных волокон, они не срезаются, а изгибаются. Для предотвращения искривления органических волокон и увеличения прочности органоупластиков при сжатии создают гибридные композиты, комбинируя органические волокна с углеродными и борными волокнами /76,112,149,161/. Органоупластик особенно хорошо сочетается с углеродным, так как продольные коэффициенты теплового расширения у них близки и внутренние термические напряжения незначительны /45/. Комбинируя эти виды волокон, можно получить композит с большей прочностью при сжатии, чем у органоупластика и

лучшей ударной вязкостью чем углепластик. Так, например, введение в однонаправленный органопластик на основе PRD -49 25 % угольных волокон HM6-50 повышает прочность органопластика при сжатии на 63 %, а органопластик с соотношением волокон 50 : 50 имеет вдвое большую ударную вязкость чем углепластик /76,149/.

Отличаясь сравнительно высокими показателями удельной прочности органопластик обнаруживает повышенную ползучесть /133, 139/. Наличие полимерной арматуры приводит к тому, что даже однонаправленно армированный органопластик проявляет заметную ползучесть при растяжении в направлении армирования.

Одной из важнейших задач остается повышение стабильности свойств органических волокон. Разброс прочности органоволокон в 2,5 раза превышает разброс стекловолокон. Это приводит к тому, что коэффициент вариации прочности конструкций из органопластиков примерно на 40 % выше, чем для конструкций из стеклопластиков /50/.

Основные области применения органопластика обусловлены его высокой прочностью и жесткостью, низкой плотностью, отличными диэлектрическими и термоизоляционными свойствами.

Высокие удельные характеристики особенно важны для авиационной и космической техники. В ближайшие 10-15 лет 24 % всех элементов конструкций пассажирских самолетов будет изготавливаться из композитов /118,151/. Впервые широкое применение органопластики получили в конструкции аэробуса L -1011 /137,151, 155/. Дальнейшие летные испытания продолжительностью свыше 10000 час. не выявили каких либо дефектов или потери свойств в деталях изготовленных из органопластиков /155/. Органопластики широко используются при замене алюминиевых частей крыла и фюзеляжа. Для радиопрозрачных обтекателей антенн применяются органопластики с их высокими диэлектрическими характеристиками

вместо дорогостоящих стеклопластиков на основе кварцевых волокон /149,150/. Фирма "Боинг-Вертол" широко использует органо-пластики в конструкции вертолета В0-105. По сравнению со стеклопластиком получена экономия веса от 20 % до 55 % /149/.

Еще более актуальна проблема снижения веса в космической технике. Для вывода 1 кг полезного груза на окололунную орбиту требуется 600 кг конструкций и топлива, на околоземную около 100 кг. Стоимость 1 кг груза выведенного на околоземную орбиту достигает 70000 долларов /42/. Примером использования органопластиков является проект челночного воздушно-космического летательного аппарата " *Space Shuttle Orbiter* ". Из органопластиков будут изготовлены баллоны высокого давления работающие при криогенных температурах и хвостовой закрылок. Ожидаемая экономия веса по сравнению с металлическим вариантом соответственно 48 % и 25 % /42/.

Наиболее полно свойства органических волокон реализуются в конструкциях работающих на растяжение, поэтому органопластик выгодно применять в баллонах высокого давления, изготовленных методом намотки. Снижение веса баллонов из органопластиков оценивается по сравнению со стеклопластиковыми баллонами на 30-38 % /50,123,125,138/. Органопластики успешно используются в намоточных сосудах давления при  $-196^{\circ}\text{C}$ . Ведется разработка тяжело нагруженных сосудов с рабочей температурой до  $-253^{\circ}\text{C}$  /112/.

Очень перспективно применение органических волокон в качестве корда для радиальных шин тяжелых грузовиков и самолетов. К 1983 году производство шин из органических волокон возрастет на 30 %. Преимущество шин из корда *Kevlar* заключается в меньшем весе, большей долговечности, возможности изготовления на существующем оборудовании. Прочность корда *Kevlar* в два раза

выше стеклокорда и в 5 раз — стального корда /I40, I48, I60/.

Объем выпуска органических волокон на основе ароматических полиамидов за 1977 год достиг 4000 тонн; в последующие 5 лет он увеличится в 10 раз /I6/.

### 3. Постановка задачи исследования.

Как следует из представленных выше данных органопластик является новым, перспективным конструкционным материалом. Высокие удельные характеристики, стойкость к ударным нагрузкам, отличные диэлектрические и теплоизоляционные свойства позволяют использовать органопластики в самых различных областях техники. Быстрому внедрению способствует высокая технологичность материала и возможность использовать существующее текстильное оборудование для производства ленты, пряжи, ткани из органических волокон. Объем производства органопластиков стремительно растет. Однако, свойства нового материала, особенно по данным отечественной литературы, изучены крайне недостаточно, что не позволяет полностью раскрыть потенциальные возможности органопластиков как конструкционных материалов. Большая часть известных работ опубликована лишь в последние три-четыре года. Полученные в них результаты носят разрозненный, отрывочный характер.

Целью данной работы является систематическое исследование основных физико-механических свойств органопластиков на основе отечественных высокопрочных органических волокон.

При этом ставились следующие задачи :

I. Провести экспериментальное исследование упругости высокопрочных органических волокон и армированных ими пластиков; проверить возможности определения характеристик упругости органо-пластиков по свойствам структурных элементов.



2. Экспериментально изучить ползучесть органопластиков при длительном воздействии нагрузок и рассмотреть пути определения ползучести по реологическим свойствам компонент; оценить возможности прогнозирования длительной ползучести по результатам экспресс-испытаний.

3. Исследовать кратковременную прочность органопластика при плоском напряженном состоянии с учетом влияния температуры.

4. Провести испытания с целью выявления температурно-временной зависимости прочности органопластика и дать оценку возможностей прогнозирования длительной прочности.

5. На основе разработанных при проведении исследований экспериментально-расчетных методов определения деформационно-прочностных свойств органопластиков составить конкретные методические рекомендации для использования в инженерной практике при проектировании конструкций из композитов.

#### 4. Краткое содержание работы.

В первой главе излагаются результаты исследования упругости высокопрочных органических волокон и органопластиков. Задача определения упругости слоистого композита рассмотрена на разных структурных уровнях. Показано, что для определения характеристик упругости однонаправленно армированного органопластика могут использоваться известные микроструктурные подходы, учитывающие анизотропию органических волокон. Упругие постоянные анизотропных волокон получены косвенным путем по найденным из опыта характеристикам модельного однонаправленно армированного материала. Установлено, что упругость слоистых органопластиков со сложной схемой укладки отдельных слоев по толщине может быть предсказана с допустимой для инженерной практики точностью методом



усреднения тензоров жесткости отдельных однонаправленных слоев.

Вторая глава посвящена изучению ползучести органопластиков. Показано, что ползучесть однонаправленного органопластика можно определить по реологическим характеристикам микропластика и связующего. Результаты расчетов подтверждены длительными (около 3 лет) контрольными испытаниями. Для расчета ползучести слоистого органопластика применен способ, основанный на усреднении тензоров жесткости отдельных слоев. Исходными данными являются опытные кривые ползучести однонаправленного пластика при нагружении под разными углами к направлению армирования. Возможности прогнозирования длительной ползучести органопластика по результатам кратковременных испытаний при повышенных температурах подтверждены контрольными опытами.

В третьей главе приводятся результаты экспериментального исследования кратковременной прочности органопластиков. В работе принят феноменологический подход. Описание опытных поверхностей прочности при плоском напряженном состоянии выполнено тензорно-полиномиальным рядом, предложенным в работах А.К.Малмейстера /57,58/. Показано, что удовлетворительная точность аппроксимации может быть достигнута при сохранении первых двух членов ряда. Для органотекстолита обнаружена существенная зависимость степени анизотропии прочности от вида напряженного состояния. Экспериментально определено семейство поверхностей прочности органотекстолита для случая плоского напряженного состояния при постоянных температурах в диапазоне 20 - 150°C. Установлено неизотропное сокращение поверхности прочности при увеличении температуры. Выявлена и описана температурная зависимость параметров, определяющих поверхность прочности органотекстолита. На основе анализа опытных поверхностей прочности гибридного текстолита

коэффициенты, входящие в условие прочности, представлены в виде непрерывных функций от относительного содержания органической ткани.

В четвертой главе обсуждаются результаты изучения влияния фактора времени на прочность органоупластика. Получены экспериментальные данные о временной зависимости прочности однонаправленно армированного органоупластика. Установлено подобие опытных кривых длительной прочности органотекстолита при семи частных случаях плоского напряженного состояния, что позволяет значительно сократить объем испытаний, необходимых для определения поверхности длительной прочности в общем случае плоского напряженного состояния. Проведены испытания с целью изучения температурно-временной зависимости прочности органотекстолита. Анализ опытных данных подтвердил гипотезу соблюдения температурно-временной аналогии прочности. Результаты прогноза длительной прочности подтверждены данными контрольных испытаний продолжительностью около 3,5 лет.

Содержание диссертации отражено в 16 публикациях. В первой главе использованы материалы работ /93,51,75/. Вторая глава включает в себя материалы работ /90,95,96/. Третья глава отражает результаты, опубликованные в работах /55,91,54,92,89,94,52,7/. Четвертая глава написана по материалам работ /53,74/.

## Г Л А В А I

## ХАРАКТЕРИСТИКИ УПРУГОСТИ ОРГАНОПЛАСТИКА

## I.I. Вводные замечания.

Для предсказания механических свойств армированных пластиков интенсивно разрабатываются теории деформирования и прочности с учетом структуры и свойств компонент. Наибольшие успехи достигнуты при решении задач упругости. Известно много работ в которых на примере пластиков армированных стеклянными, угольными и борными волокнами показана возможность предсказания независимых компонент тензоров податливости и жесткости по характеристикам упругости структурных компонент, их ориентации, упаковке и объемному содержанию. Однако, возможности оценки характеристик упругости органопластиков по свойствам компонент до сих пор почти не исследованы. Вопрос этот для органопластиков осложняется тем, что вследствие физико-химических процессов протекающих в системе полимер-полимер, в ряде случаев может происходить существенное изменение свойств компонент во время отверждения связующего.

К началу выполнения данной работы сведения о поведении высокопрочных органических волокон в полимерном композите отсутствовали, в то время как результаты полученные на других видах органических армирующих волокон указывали на образование размытого граничного слоя в области раздела полимерного волокна и связующего, что приводило к значительному изменению деформационно-прочностных свойств волокна в пластике /48,49/. Поэтому возникал вопрос о правомочности покомпонентного определения упругости для органопластиков армированных высокопрочными органическими волокнами.

Задачу определения характеристик упругости слоистого пластика

можно рассматривать на разных структурных уровнях. Один из вариантов состоит в том, что слоистый пластик рассматривается как композиция состоящая из различным образом ориентированных однонаправленно армированных слоев, то-есть в качестве структурного элемента принимается отдельный слой. На рис. I.I показана типичная схема такого композита.

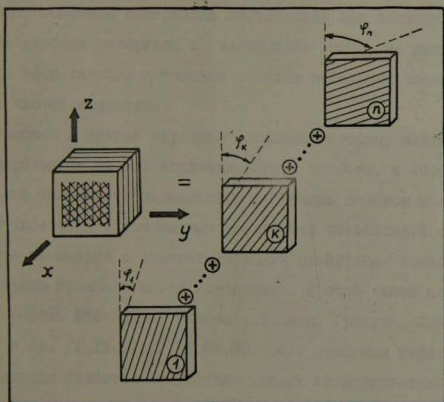


Рис. I.I. Расчетная схема слоистого пластика.

Практический путь решения задачи в этом случае сводится к определению независимых упругих постоянных слоя, выбору метода и расчету упругости слоистого пластика по характеристикам упругости и взаиморасположению отдельных слоев. Такой подход использован в работах Амбарцумяна, Васильева, Рабиновича, Тетерса, Цая и др. /6,55,79,100,119/; его преимущество заключается в том, что характеристики упругости слоя могут быть опреде-

лены экспериментально из сравнительно простых опытов, выполняемых по общедоступным методикам на модельном однонаправленном материале с коэффициентом армирования  $\mu$  равным  $\mu$  слоистого пластика. Кроме того, снимается вопрос об изменении свойств арматуры в процессе изготовления композита.

С другой стороны, как отмечено в /ИЗ/, подобный метод не учитывает объемное содержание компонентов как конструктивную степень свободы материала и, вследствие этого, не дает рекомендаций для эффективного улучшения свойств отдельных слоев как составных частей композита.

Возможен и другой вариант, согласно которому каждый слой рассматривается не как квазиоднородный элемент, а состоящий из отдельных компонент: параллельно уложенных волокон и отвержденного связующего. В таком случае появляется возможность связать свойства композита с соответствующими свойствами компонент, которые заранее предполагаются известными. В этой связи следует отметить работы Аболиньша, Булавса, Ванина, Грещука, Скудры, Уитни, Хашина и др. /1, 15, 17, 27, 86, 87, 88, 104/. Основным недостатком такого подхода является отсутствие прямых экспериментальных методов определения некоторых характеристик анизотропных волокон. Кроме того, возможные эффекты взаимодействия эпоксидного связующего и полимерного волокна ставят под сомнение правомочность использования характеристик упругости отдельных компонент для расчета упругости отвержденного композита.

В связи с изложенным представлялось целесообразным рассмотреть оба варианта: в п. I.2 исследуются возможности прогнозирования характеристик упругости однонаправленного органопластика по свойствам компонент; в п. I.3 и п. I.4 упругость слоистых композитов определяется, исходя из свойств анизотропного слоя.

## 1.2. Расчет характеристик упругости однонаправленно армированного органопластика.

Если задача определения упругости композита решается на структурном уровне отдельных компонент, то обычно полагается, что свойства компонент в исходном состоянии и в готовом композите одинаковы. В этом случае экспериментальному определению подлежат характеристики упругости волокна и связующего. Если в качестве арматуры применяются изотропные волокна (какими обычно считают борные или стеклянные), то из опыта требуется определить две характеристики волокон. Фибриллярная структура высокоориентированных органических волокон позволяет принять гипотезу об их анизотропии /81, 143/. Проверкой такого предположения может служить эксперимент проведенный непосредственно на волокнах. Однако, прямые экспериментальные методы определения некоторых характеристик упругости анизотропных волокон пока отсутствуют. Поэтому, в данной работе, исследовалась возможность косвенной оценки характеристик упругости органических волокон по найденным из испытаний характеристикам однонаправленно армированного органопластика и связующего. Затем, используя полученные характеристики волокна, расчетным путем определялась упругость однонаправленного пластика для другого коэффициента армирования. Результаты расчета сопоставлялись с данными контрольных испытаний пластика. Ранее подобный косвенный метод применялся при оценке характеристик упругости анизотропных углеродных волокон /131, 135, 141, 142/.

В общем случае характеристики упругости однонаправленного пластика можно представить, как функции от коэффициента армирования  $\mu$  и всех независимых компонент тензоров упругости волокна и матрицы. Допуская изотропию упругих свойств связующего и

трансверсальную изотропию упругости волокна можно записать :

$$\begin{aligned}
 E_3 &= F_1(E_{3a}, E_{2a}, G_{23a}, \nu_{23a}, \nu_{12a}, E_c, \nu_c, \mu); \\
 E_2 &= F_2(E_{3a}, E_{2a}, G_{23a}, \nu_{23a}, \nu_{12a}, E_c, \nu_c, \mu); \\
 G_{23} &= F_3(E_{3a}, E_{2a}, G_{23a}, \nu_{23a}, \nu_{12a}, E_c, \nu_c, \mu); \\
 \nu_{23} &= F_4(E_{3a}, E_{2a}, G_{23a}, \nu_{23a}, \nu_{12a}, E_c, \nu_c, \mu); \\
 \nu_{12} &= F_5(E_{3a}, E_{2a}, G_{23a}, \nu_{23a}, \nu_{12a}, E_c, \nu_c, \mu),
 \end{aligned}
 \tag{I.I}$$

где  $E_3, E_2, G_{23}, \nu_{23}, \nu_{12}; E_{3a}, E_{2a}, G_{23a}, \nu_{23a}, \nu_{12a}; E_c, \nu_c$  - характеристики упругости соответственно композита, волокна и связующего;  $\mu$  - коэффициент армирования; расположение осей симметрии пластика показано на рис. I.2; индекс "а" относится к характеристикам арматуры, индекс "с" - связующего.

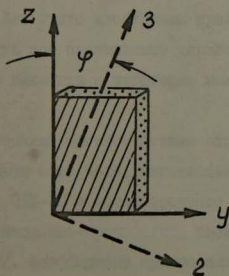


Рис. I.2. Расположение осей симметрии однонаправленного органопластика.

Известно много работ посвященных определению функциональных зависимостей (I.I). Обзор их приведен в /57,86/. Классификацию известных методов можно провести по двум основным факторам :



по методу определения напряженно-деформированного состояния в компонентах армированного пластика и по виду припимаемой симметрии упругих свойств арматуры. Так в работах /1,15,27,86/ напряженно-деформированное состояние определялось методами сопротивления материалов, а в /17,87,104/ - методами теории упругости. С учетом анизотропии армирующих волокон задача решалась в /15,87/. В этом случае необходимо определить две независимые компоненты тензора упругости изотропного связующего и пять компонент тензора упругости трансверсально изотропного волокна. Характеристики упругости связующего определяют обычно на специально изготовленных образцах из неармированного отвержденного связующего. В настоящее время нет методик определения непосредственно на моноволокнах пяти независимых компонент тензора упругости анизотропного волокна, в связи с чем ниже будет рассмотрен косвенный метод определения упругости волокна по характеристикам композита. Для этого необходимо предварительно экспериментально определить все независимые характеристики упругости однонаправленного пластика с некоторым коэффициентом армирования  $\mu_1$ .

Упругие постоянные органопластика определили на однонаправленно армированном материале, изготовленном на основе эпоксидного связующего ЭДТ-10 и высокопрочного органического волокна. Некоторые деформационно-прочностные свойства волокна приводятся в /2,3,7,117/. Коэффициент армирования составлял  $\mu_1 = 0,65$ . Образцы, вырезанные в направлении армирования, имели форму полосок с размерами  $4 \times 10 \times 180$  мм, а вырезанные под углами  $45^\circ$  и  $90^\circ$  к арматуре -  $5 \times 20 \times 200$  мм. Предварительно для указанных видов образцов определили прочность при простом, кратковременном, квазистатическом нагружении; методические особенности этих испыта-

ний будут рассмотрены ниже в п.3.1. Затем проводили испытания с целью определения характеристик упругости. Образцы нагружали до напряжений, соответствующих 0,2+0,3 от предела кратковременной прочности в соответствующем направлении. Деформации измерялись фольговыми тензодатчиками типа "ТФ" и "ФКП" с базой измерения от 5 до 20 мм, которые подключались к самопишущим потенциометрам КСП-4 через тензометрический усилитель ТУП-12-65. Схема нагружения образцов и направления измеряемых деформаций показаны на рис.1.3. Перечень определяемых компонент деформаций и характеристик упругости приводится в табл.1.1.

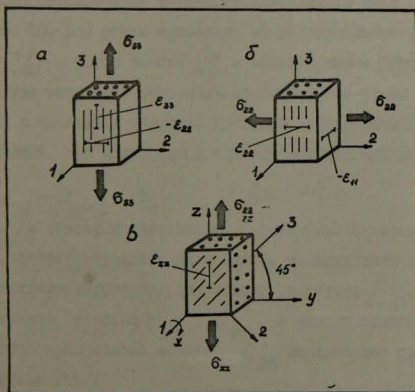


Рис.1.3. Схема нагружения плоских образцов трансверсально изотропного материала.

Таблица I.1

Определяемые деформации и характеристики упругости  
трансверсально изотропного материала.

| Прилагаемое напряжение | Измеряемая деформация           | Определяемая характеристика упругости | Схема нагружения на рис. I.3 |
|------------------------|---------------------------------|---------------------------------------|------------------------------|
| $\sigma_{33}$          | $\epsilon_{33}, -\epsilon_{22}$ | $E_{33}, \nu_{23}$                    | а                            |
| $\sigma_{22}$          | $\epsilon_{22}, -\epsilon_{11}$ | $E_{22}, \nu_{12}$                    | б                            |
| $\sigma_{22}$          | $\epsilon_{22}$                 | $E_{22}, G_{23}$                      | в                            |

Число параллельных испытаний для каждого вида образцов было не менее 10. Все опыты проведены на универсальной испытательной машине ZD - 40, в режиме  $\dot{\sigma} = 150 \text{ МПа/мин} = \text{const}$ .

Модули упругости материала определены по углам наклона касательных к начальным участкам диаграмм деформирования  $\sigma \sim \epsilon$ . Принималось, что касательные следуют обобщенному закону Гука:

$$\epsilon_{ij} = \alpha_{ijkl} \cdot \sigma_{kl} \quad i, j, k, l = 1, 2, 3 \quad (I.2)$$

где  $\alpha_{ijkl}$  - тензор податливости. Исследуемый материал рассматривался как трансверсально изотропный, имеющий пять независимых характеристик упругости: два модуля упругости  $E_3, E_2$ ; два коэффициента Пуассона  $\nu_{23}, \nu_{12}$  и модуль сдвига  $G_{23}$ .

Модуль продольного сдвига  $G_{23}$  определялся по известному соотношению /46/:

$$\frac{1}{G_{23}} = \frac{4}{E_{22}} - \frac{1}{E_3} (1 - 2\nu_{23}) - \frac{1}{E_2}, \quad (I.3)$$

где  $E_{22}$  - модуль упругости в направлении, составляющем угол  $45^\circ$  к оси армирования. Как показано в работе /120/, на основе анализа семи способов определения модуля сдвига  $G_{23}$ , такой метод для

органоластика дает результаты весьма близкие к данным полученным при кручении трубчатых образцов.

Найденные независимые характеристики упругости однонаправленно армированного органоластика приведены в табл. I.2; там же даны величины среднеквадратичных отклонений.

Таблица I.2

Характеристики упругости однонаправленного органоластика (коэффициент армирования  $\mu_1 = 0,65$ ).

| $E_3 \cdot 10^{-4}$       | $E_2 \cdot 10^{-4}$ | $G_{23} \cdot 10^{-4}$   | $\nu_{12}$      | $\nu_{23}$      |
|---------------------------|---------------------|--------------------------|-----------------|-----------------|
| 654000 <small>МПа</small> | 55000 МПа           | 20000 <small>МПа</small> |                 |                 |
| $6,54 \pm 0,59$           | $0,35 \pm 0,03$     | $0,20 \pm 0,02$          | $0,27 \pm 0,04$ | $0,30 \pm 0,05$ |

Изменение характеристик упругости при повороте осей симметрии относительно осей нагружения наглядно иллюстрируется диаграммами анизотропии. Будем различать две прямоугольные системы координат с общим началом  $O$ : система 1,2,3 совпадающая с осями симметрии материала, и вспомогательная система  $X, Y, Z$ , при повороте которой ось  $Y$  все время остается в плоскости 2,3 (рис. I.4). Угол между осями 2 и  $Y$  принят за одну координату  $\varphi$ , а угол между осью  $X$  и плоскостью 1,2 за другую  $\theta$ . Упругие характеристики затем представлены в виде функции двух переменных:  $\varphi$  и  $\theta$ . Графически такое представление показано на рис. I.5а-г; расчет и построение диаграмм анизотропии выполнены на ЭВМ HP-9600 с использованием графопостроителя.

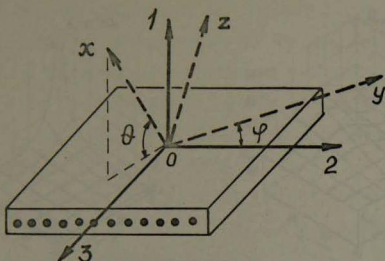


Рис. 1.4. Направление осей основной 1,2,3 и вспомогательной  $X, Y, Z$  систем координат.

Неизвестные характеристики упругости органического волокна определялись косвенным способом по найденным выше характеристикам упругости однонаправленно армированного пластика. Из прямых экспериментов были определены также модуль упругости и коэффициент Пуассона отвержденного связующего ЭДТ-10  $E_c = 3300$  МПа,

$\nu_c = 0,42$  и модуль упругости волокна в продольном направлении  $E_{3a} = 95000$  МПа. Тогда при допущении трансверсальной изотропии упругости волокна неизвестными остаются  $E_{2a}, G_{23a},$

$\nu_{12a}, \nu_{23a}$ . Определение этих величин проводилось решением системы нелинейных уравнений (I.I). Система (I.I) состоит из пяти уравнений; число входящих в уравнение неизвестных меньше; для трансверсально изотропных волокон остается четыре неизвестных; для изотропных - одна.

Система (I.I), строго говоря, несовместна и, следовательно, не может быть решена точно, а только с некоторой погрешностью, которая обусловлена случайным разбросом определяемых из прямых экспериментов характеристик упругости композита и связующего,

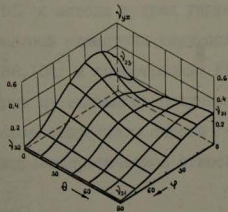
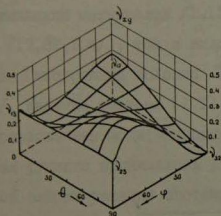
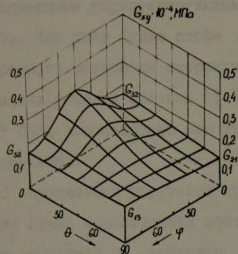
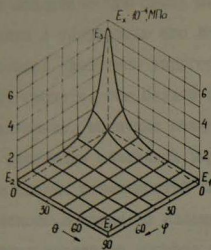


Рис. 1.5. Диаграммы анизотропии характеристик упругости однонаправленно армированного органопластика ( $\mu_1 = 0,65$ ). Обозначения вида характеристик приведены на рисунках.

а также приближенностью зависимостей  $F_i$ ,  $i = 1, \dots, 5$ , устанавливающих вид уравнений системы (1.1). Влияние разброса экспериментальных данных может быть уменьшено увеличением числа испытаний и правильной статистической обработкой их результатов. Иначе обстоит вопрос с влиянием вида расчетных схем устанавли-

важных аналитическую связь между осредненными характеристиками композита и упругостью его компонентов. Чем хуже будет соответствовать свойствам упругости конкретного материала выбранный вариант расчета, тем больше будет невязка решения системы (I.I). Следовательно, величина невязки может быть использована как критерий сравнения различных вариантов расчета.

Для оценки возможностей косвенного определения упругости органического волокна по изложенной выше схеме использованы восемь различных вариантов расчета упругости композита по свойствам компонент /1,15,17,27,51,86,87/.

Выбранные варианты различались как методами решений (методы сопротивления материалов /1,15,27,51,86/ и методы теории упругости /17,87,104/), так и видом принимаемой симметрии упругости волокон (изотропные волокна /1,17,27,86,104/ и анизотропные /15,51,87/. Решение системы (I.I) по каждому из вариантов получено с использованием модифицированного метода скорейшего спуска /43/. Целевая функция принималась в виде среднеквадратической относительной ошибки решения системы (I.I) :

$$S_H(\vec{X}) = \sqrt{\frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 \left(1 - \frac{F_i^P}{F_i^Э}\right)^2} \cdot 100, \% \quad (I.4)$$

где  $F_i^P$ ,  $F_i^Э$  - соответственно расчетные и экспериментальные характеристики упругости пластика. По алгоритму /43/ определялся вектор  $\vec{X}$  обеспечивающий минимум целевой функции (I.4). В вариантах с трансверсально-изотропной упругостью волокон искомым вектором являлся  $\vec{X}(E_{2a}, G_{23a}, \nu_{12a}, \nu_{23a})$ ; в вариантах с допущением изотропии упругости волокон -  $\vec{X}(\nu_a)$ . Расчеты проводились на ЭВМ ЕС-1030 по программам на языке PL - I\*. Резуль-

\* Составление программ и проведение расчетов выполнено Э.З.Плуме.

## Результаты косвенной оценки характеристик упругости органического волокна

| Номер варианта | Литературный источник | Принятый класс симметрии упругости волокна | Характеристики упругости органического волокна                      |      |      |             | $S_H$<br>% | Машинное время (мин) при 100 циклах приближения |             |
|----------------|-----------------------|--|---|------|------|-------------|------------|---|-------------|
|                |                       |  | $E_{3a} \cdot 10^{-4}, E_{2a} \cdot 10^{-4}, G_{23a} \cdot 10^{-4}$ |      |      | $\nu_{23a}$ |            |   | $\nu_{12a}$ |
|                |                       |  | МПа   |      |      |             |            |   |             |
| 1              | /1/                   |  | 9,50  | 9,50 | 0,36 | 0,32        | 0,32       | 127   | I           |
| 2              | /86/                  | Изотропия                                  | 9,50  | 9,50 | 0,34 | 0,39        | 0,39       | 195   | I           |
| 3              | /27/                  |  | 9,50  | 9,50 | 0,16 | 1,92        | 1,92       | 474   | 30          |
| 4              | /104/                 |  | 9,50  | 9,50 | 0,25 | 0,89        | 0,89       | 130   | I           |
| 5              | /17/                  |  | 9,50  | 9,50 | 0,34 | 0,38        | 0,38       | 157   | I           |
| 6              | /15/                  | Трансверсаль-                              | 9,50  | 0,33 | 0,28 | 0,23        | 0,23       | 1,76  | 10          |
| 7              | /87/                  | ная изотропия                              | 9,50  | 0,33 | 0,22 | 0,23        | 0,21       | 0,21  | 180         |
| 8              | /51/                  |  | 9,50  | 0,34 | 0,22 | 0,23        | 0,21       | 1,20  | 35          |



таты расчетов приведены в табл. I.3. Прежде всего обращает на себя внимание существенное различие результатов расчета полученных при допущении изотропии и трансверсальной изотропии упругости волокон. Ни один из вариантов расчета, основанных на допущении изотропии упругости волокна не позволяет получить приемлемого решения; невязка в этих случаях превышает 100%. В то же время при допущении трансверсальной изотропии невязку удается свести к пренебрежимо малой величине ( $\approx 1\%$ ), что позволяет считать систему уравнений (I.I) практически совместной.

Таким образом, из сказанного выше следует основной вывод о том, что свойства упругости исследованного высокопрочного органического волокна существенно анизотропны. Все три варианта расчета, в которых упругая симметрия волокон принята в виде трансверсальной изотропии дают почти совпадающие результаты, поэтому в дальнейшем использованы их средние значения, приведенные в табл. I.4.

Таблица I.4

Характеристики упругости высокопрочного органического волокна.

| $E_{3a} \cdot 10^{-4}$ | $E_{2a} \cdot 10^{-4}$ | $G_{23a} \cdot 10^{-4}$ | $\nu_{12a}$ | $\nu_{23a}$ |
|------------------------|------------------------|-------------------------|-------------|-------------|
| МПа                    |                        |                         |             |             |
| 9,50                   | 0,33                   | 0,24                    | 0,21        | 0,23        |

Найденные характеристики упругости волокна проверялись дополнительными опытами. С этой целью экспериментально определены характеристики упругости однонаправленно армированного органоупластика с коэффициентом армирования  $\mu_2$  отличающимся от  $\mu_1$  пластика, по упругости которого были определены свойства волокна;

в контрольном материале  $\mu_2$  был меньше чем  $\mu_1$  на 25% и составлял 0,49. Расчетные значения характеристик упругости контрольного материала получены по формулам работы /51/ с использованием приведенных в табл. I.4 характеристик упругости органического волокна. Предсказываемые и контрольные характеристики приводятся в табл. I.5.

Таблица I.5

Расчетные и опытные характеристики упругости  
однонаправленно армированного органопластика  
(  $\mu_2 = 0,49$  ).

| Характеристики упругости   | Предсказываемые ( по форм. работы /51/ ) | Контрольные (эксп. значения ) | Ошибка предсказания в % |
|----------------------------|--|-------------------------------|-------------------------|
| $E_3 \cdot 10^{-4}$ МПа    | 4,82                                     | $4,71 \pm 0,25$               | 2,4                     |
| $E_2 \cdot 10^{-4}$ МПа    | 0,37                                     | $0,33 \pm 0,03$               | 11,5                    |
| $G_{23} \cdot 10^{-4}$ МПа | 0,17                                     | $0,15 \pm 0,01$               | 18,6                    |
| $\nu_{12}$                 | 0,34                                     | $0,29 \pm 0,05$               | 17,2                    |
| $\nu_{23}$                 | 0,33                                     | $0,31 \pm 0,05$               | 6,5                     |

Из таблицы видно, что относительные ошибки предсказания всех пяти независимых характеристик упругости пластика укладываются в диапазоне от 3 до 18%, что с учетом статистического разброса экспериментальных данных следует считать вполне удовлетворительным.

В результате проведенного анализа установлено, что характеристики упругости однонаправленно армированного органопластика не могут быть определены без учета анизотропии упругости органических волокон; при этом оказалось приемлемым допущение о трансверсальной изотропии упругости волокон.

Сопоставим теперь полученные характеристики упругости высокопрочного органического волокна с характеристиками углеродных волокон, анизотропия которых исследовалась во многих работах, например /I3I, I35, I4I, I42/. Отношение  $E_3/E_2$  для разных марок углеродных волокон изменялось в диапазоне от 20 до 40; по приведенным выше данным для органического волокна это отношение составляет 28. Таким образом отношение жесткости в продольном и поперечном направлениях у каждого (органического и углеродного) волокна в отдельности примерно одинаковое. В то же время средние значения  $E_3$  и  $E_2$  углеродных волокон примерно в 4 раза больше соответствующих модулей органического волокна. Еще больше различаются модули сдвига этих волокон: средние значения модуля  $G_{23}$  угольных волокон примерно в 7 раз больше, чем у органического волокна.

### 1.3. Расчет характеристик упругости слоистого органопластика.

Как отмечалось в п.1.1, задачу определения упругости намоточного композиционного материала можно рассматривать на различных структурных уровнях. В отличие от подхода изложенного в п.1.2 возможен другой вариант, когда слоистый композит рассматривается как пакет, отдельные слои которого уложены под разными углами в плоскости армирования. В этом случае в качестве структурного элемента принимается отдельный, однородный, анизотропный слой. Характеристики упругости слоистого пакета могут быть определены методом усреднения тензоров жесткости отдельных однонаправленно армированных слоев /6, 44, 79, 97, 100/. Операция усреднения при одинаковой толщине всех слоев сводится к следующему:

$$A_{\alpha\beta\gamma\delta} = \frac{1}{m} \cdot \sum_{i=1}^n m_i \cdot A_{\alpha\beta\gamma\delta}^{(i)}, \quad (1.5)$$

где  $\alpha, \beta, \gamma, \delta = x, y, z$ ;  $m = \sum_{i=1}^n m_i$ ;  $m$  - общее количество слоев;  $m_i$  - количество слоев с одинаковой ориентацией арматуры;  $n$  - количество фиксированных направлений ориентации арматуры;  $A_{\alpha\beta\gamma\delta}$  и  $A_{\alpha\beta\gamma\delta}^{(i)}$  - компоненты тензоров жесткости соответственно пакета и отдельного слоя.

Неизвестные компоненты тензора жесткости отдельных слоев  $A_{\alpha\beta\gamma\delta}^{(i)}$  могут быть определены или из прямых испытаний модельного однонаправленно армированного материала с коэффициентом армирования равным коэффициенту армирования слоя или расчетным путем по характеристикам упругости арматуры и связующего в последовательности изложенной в п.1.2 или косвенным методом исходя из упругости пакета /38,80/. В данной работе рассматривается первый вариант.

Объектом исследования являлся слоистый органопластик полученный спирально тангенциальной намоткой. Слои волокон в пластике уложены в плоскости армирования в трех направлениях: вдоль оси и под углами  $\pm \varphi$  по отношению к этой оси (ось  $y$  направлена в плоскости армирования перпендикулярно к оси  $Z$ , ось  $X$  - перпендикулярно к плоскости армирования (рис. 1.6). Угол  $\varphi$  был равен  $45^\circ$ . Толщина отдельных слоев примерно одинакова. Коэффициент армирования пластика составлял 0,65, что позволило принять в качестве характеристик упругости слоя приведенные в табл.1.4 экспериментальные данные упругости однонаправленного органоластика с  $\mu = 0,65$ . Число слоев в пакете равнялось 10, в том числе под углом  $\varphi = 0^\circ$  - 4 слоя,  $\varphi = 45^\circ$  - 3 слоя и  $\varphi = -45^\circ$  - 3 слоя.

Диаграммы деформирования слоистого органоластика полученные в режиме  $\sigma$ -const при растяжении в направлениях  $Z$  и  $y$  показаны на рис. 2.14. В целом методика экспериментального опре-

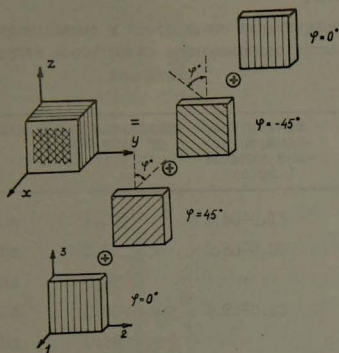


Рис. I.6. Схема укладки слоев косоугольно армированного органопластика.

деления упругости слоистого композита была аналогична описанному в п. I.2 определению характеристик упругости однонаправленно армированного органопластика.

Полученные из испытаний характеристики упругости намоточного органопластика и их среднеквадратичные погрешности приведены в табл. I.6. Там же показаны расчетные значения, полученные согласно (I.5), и относительные отклонения предсказываемых значений от контрольных. Переход от технических характеристик упругости к компонентам тензора жесткости и обратно сделан по формулам, приведенным в /33/. Из табл. I.6 видно, что ошибки предсказания несколько превышают разброс экспериментальных данных. Этот факт может быть связан не только с ошибками, вносимыми методом расчета; увеличение погрешности, вероятно, обусловлено

Таблица I.6

Предсказываемые и контрольные характеристики  
упругости косоугольно армированного органи-  
пластика.

| Характеристики<br>упругости  | Предсказываемые<br>(расчетные по<br>(1.5) ) | Контрольные<br>(эксперимен-<br>тальные зна-<br>чения ) | Ошибка<br>предсказания<br>в % |
|------------------------------|---|--|-------------------------------|
| $E_z \cdot 10^{-4}$ , МПа    | 3,08  | $2,50 \pm 0,15$  | 19                            |
| $E_y \cdot 10^{-4}$ , МПа    | 1,07  | $0,80 \pm 0,09$  | 25                            |
| $E_x \cdot 10^{-4}$ , МПа    | 0,37  | -  | -                             |
| $G_{yz} \cdot 10^{-4}$ , МПа | 1,09  | $1,23 \pm 0,13$  | 13                            |
| $G_{xy} \cdot 10^{-4}$ , МПа | 0,16  | -  | -                             |
| $G_{xz} \cdot 10^{-4}$ , МПа | 0,18  | -  | -                             |
| $\nu_{yz}$                   | 0,75  | $0,67 \pm 0,14$  | 12                            |
| $\nu_{xy}$                   | 0,22  | $0,35 \pm 0,08$  | 37                            |
| $\nu_{xz}$                   | 0,12  | $0,16 \pm 0,03$  | 25                            |

ошибками определения коэффициента армирования, а также тем, что однонаправленно армированный пластик, по которому определялась упругость слоя, и косоугольно армированный были изготовлены из разных партий материала. В целом для инженерных приложений полученную точность предсказания можно считать приемлемой.

На основе проделанного анализа можно сделать вывод о том, что метод усреднения тензоров жесткости может быть использован для приближенной оценки упругости многослойных органипластиков по характеристикам однонаправленно армированного пластика.

#### 1.4. Расчет характеристик упругости органо-стеклопластика.

Необходимость регулирования механических свойств конструкционных материалов обусловила разработку и исследование свойств так называемых гибридных композиционных материалов, содержащих различные армирующие наполнители. Наибольшее распространение получили трехкомпонентные материалы - стеклоборопластики, стеклоуглепластики, углеорганопластики и др. /28,76,77,85,122/. Подбор вида армирующих наполнителей, их объемного содержания и взаимной ориентации позволяет не только варьировать в широких пределах механические свойства композитов, но и снижать их стоимость за счет полной или частичной замены дорогих волокон более дешевыми.

В п.1.2 было показано, что органические волокна обладают существенной анизотропией упругости; модуль упругости в продольном направлении примерно в 30 раз больше поперечного модуля упругости. Значительная поперечная податливость органических волокон приводит к заниженным значениям модуля упругости органо-текстолита в направлении перпендикулярном плоскости армирования. В целях устранения этого недостатка создают гибридные схемы армирования, сочетая органические волокна со стеклянными, которые в отношении свойств упругости обычно полагают изотропными.

Подобный процесс конструирования гибридных материалов должен базироваться на экспериментально проверенных и достаточно надежных методах расчета их механических характеристик. Однако, возможности оценки деформационных и прочностных свойств гибридных композитов по свойствам компонент мало изучены. В связи с этим ставилась задача исследовать возможности прогнозирования характеристик упругости гибридного трехкомпонентного текстолита

по свойствам двухкомпонентных текстолитов.

Объектами исследования были органотекстолит, стеклотекстолит и органостеклотекстолит с различным относительным содержанием слоев органо- и стеклоткани. В органотекстолите армирующим наполнителем была ткань сатинового плетения из нитей высокопрочного органического волокна; в стеклотекстолите - ткань из стекловолокон на ТСУ-8/3-ВМ-78. Образцы органостеклотекстолита изготовлены при трех значениях относительного содержания слоев органоткани  $\mu_{от}$  и стеклоткани  $\mu_{ст}$ :  $\mu_{ст} / \mu_{от} = 0,3/0,7; 0,5/0,5; 0,7/0,3$ . При укладке слоев ткани в гибридном материале направления утка и основы одной ткани совпадали с направлением утка и основы другой. В качестве матрицы служил один и тот же вид эпоксидного связующего; относительное объемное содержание связующего во всех исследованных композитах составляло  $0,35 \pm 0,04$ .

Решение поставленной задачи осуществлялось в следующей последовательности: сначала экспериментально определяли все независимые характеристики упругости в отдельности для органотекстолита и стеклотекстолита; затем, используя полученные данные, рассчитывали ожидаемые характеристики упругости гибридного текстолита для трех указанных выше значений относительного содержания слоев органо- и стеклоткани, после чего полученные расчетные данные сопоставляли с контрольными результатами экспериментального определения упругости гибридного текстолита.

Независимые характеристики упругости органотекстолита определяли при квазистатическом нагружении в режиме  $\dot{\sigma} \approx 120$  МПа/мин по углам наклона касательных к диаграммам деформирования  $\sigma \sim \epsilon$  в точке (0,0). Как и выше принималось, что касательные к начальным участкам диаграмм  $\sigma \sim \epsilon$  следуют обобщенному закону Гука (1.2). Система координат 1,2,3 совмещена с осями симметрии ма-



териала : ось 1 направлена вдоль утка армирующей ткани, ось 2 - вдоль основы, ось 3 - перпендикулярно к плоскости армирования. Технология изготовления и схема армирования позволяют рассматривать органотекстолит как ортотропный материал, имеющий девять независимых характеристик упругости - три модуля упругости  $E_1, E_2, E_3$ ; три модуля сдвига  $G_{12}, G_{23}, G_{31}$  и три коэффициента Пуассона  $\nu_{21}, \nu_{32}, \nu_{31}$ . Для экспериментального определения девяти независимых характеристик упругости необходимо провести шесть испытаний при одноосном нагружении в которых должно быть измерено девять компонент деформации. Схема нагружения образцов показана на рис. 1.7. Перечень определяемых компонент деформаций и характеристик упругости приводится в табл.1.7.

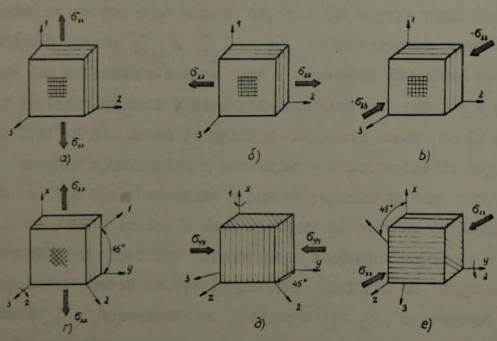


Рис. 1.7. Схемы нагружения плоских образцов ортотропного пластика. Определяемые компоненты деформаций и характеристики упругости для каждой схемы приведены в табл. 1.7.

Таблица I.7

Определяемые деформации и характеристики упругости  
ортоотропного материала при испытании плоских образцов

| Прилагаемое напряжение | Измеряемая деформация                           | Определяемые характеристики упругости | Схема нагружения на рис. I.7 |
|------------------------|---|---------------------------------------|------------------------------|
| $\sigma_{11}$          | $\epsilon_{11}, -\epsilon_{22}, -\epsilon_{33}$ | $E_{11}, \nu_{21}, \nu_{31}$          | $\alpha$                     |
| $\sigma_{22}$          | $\epsilon_{22}, -\epsilon_{33}$                 | $E_{22}, \nu_{32}$                    | $\beta$                      |
| $\sigma_{33}$          | $-\epsilon_{33}$                                | $E_3$                                 | $\nu$                        |
| $\sigma_{xx}$          | $\epsilon_{xx}$                                 | $E_x, G_{12}$                         | $z$                          |
| $\sigma_{yy}$          | $\epsilon_{yy}$                                 | $E_y, G_{23}$                         | $\partial$                   |
| $\sigma_{zz}$          | $\epsilon_{zz}$                                 | $E_z, G_{31}$                         | $e$                          |

Отметим некоторые особенности определения модуля упругости  $E_3$  и модулей сдвига  $G_{12}, G_{23}, G_{31}$ . Исследуемый органотекстолит был изготовлен в виде плит с размерами 550x450x5 мм. Из плит вырезали образцы в виде прямоугольных пластинок: с размерами 17x17x5 мм. Затем собирали и склеивали пакеты по 10 пластинок; склейку производили в специальном приспособлении под давлением  $\approx 0,5$  МПа. Пластинки в пакете укладывали так, чтобы направления утка и основы и двух соседних пластинок совпадали. Окончательную обработку осуществляли шлифовкой торцевых и боковых поверхностей пакета до размеров 15x15x50 мм. Модуль упругости  $E_3$  определяли из диаграммы  $\sigma \sim \epsilon$ , получаемой при сжатии склеенных образцов. Перед этими контрольными испытаниями было установлено отсутствие разномодульности органотекстолита при растяжении и сжатии вдоль утка и основы армирующей ткани. Оценку разномодульности проводили сравнением начальных участков

диаграмм  $\sigma \sim \varepsilon$  при растяжении и сжатии. Идентичность характеристик упругости стеклотекстолита при растяжении и сжатии в трансверсальном к плоскости армирования направлении показана в работе /25/.

Определение модулей сдвига проводили двумя методами - косвенным, основанным на использовании формулы (I.3), и прямым - испытанием на кручение трубчатых образцов. Косвенным методом определяли модули сдвига  $G_{12}$ ,  $G_{23}$ ,  $G_{31}$  из опытов на одноосное нагружение образцов в направлении, составляющем угол  $45^\circ$  к соответствующим осям симметрии материала (см. рис. I.7г-е и табл. I.7). Кроме того, проводили испытания на кручение трубчатых образцов органотекстолита длиной 250 мм, наружным диаметром 36 мм, толщиной стенки 1,5 мм. Направление утка армирующей ткани совпадало с продольным направлением образца, основа ткани ориентировалась в тангенциальном направлении трубчатого образца. На этих образцах были определены модули  $G_{12}$ ,  $E_1$ ,  $E_2$ ; испытания показали, что указанные характеристики упругости трубчатых и плоских образцов в пределах разброса опытных данных совпадают. Таким образом, для органотекстолита определение модулей сдвига косвенным методом (испытанием плоских образцов) можно считать вполне допустимым. Найденные независимые характеристики упругости органотекстолита приведены в табл. I.8, там же даны средние квадратические отклонения по пяти параллельным испытаниям. Для более наглядной иллюстрации изменения характеристик упругости при повороте осей симметрии относительно осей нагружения построены диаграммы анизотропии упругости органотекстолита. Расчет и построение проводили аналогично описанному выше в п. I.2. Полученные диаграммы показаны на рис. I.8.

Таблица I.8

Характеристики упругости органотекстолита и  
стеклотекстолита .

| Характеристики<br>упругости,<br>$E \cdot 10^{-4}, G \cdot 10^{-4},$<br>МПа | Органотекстолит | Стеклотекстолит |
|--|-----------------|-----------------|
| $E_1$  | $2,30 \pm 0,20$ | $3,50 \pm 0,30$ |
| $E_2$  | $1,40 \pm 0,13$ | $3,00 \pm 0,20$ |
| $E_3$  | $0,61 \pm 0,06$ | $0,90 \pm 0,10$ |
| $G_{12}$   | $0,15 \pm 0,02$ | $0,56 \pm 0,06$ |
| $G_{23}$   | $0,23 \pm 0,03$ | $0,36 \pm 0,04$ |
| $G_{31}$   | $0,24 \pm 0,03$ | $0,41 \pm 0,04$ |
| $\nu_{21}$   | $0,14 \pm 0,03$ | $0,15 \pm 0,04$ |
| $\nu_{32}$   | $0,53 \pm 0,06$ | $0,53 \pm 0,06$ |
| $\nu_{31}$   | $0,54 \pm 0,07$ | $0,30 \pm 0,04$ |

Определение характеристик упругости стеклотекстолита проводили аналогично описанному определению упругости органотекстолита. Найденные характеристики упругости стеклотекстолита приведены в табл. I.8. При сопоставлении упругости органотекстолита и стеклотекстолита обнаруживаются существенные различия модуля упругости в трансверсальном направлении  $E_3$ , что свидетельствует о большой трансверсальной податливости органических волокон по сравнению со стеклянными.

Располагая характеристиками упругости двухкомпонентных текстолитов (органо- и стеклотекстолита) можно попытаться предсказать жесткость органостеклотекстолита при разных значениях относительного содержания стеклоткани  $\mu'_{СТ}$  и органической ткани  $\mu'_{ОТ}$ . Расчет проводился методом усреднения тензоров жесткости

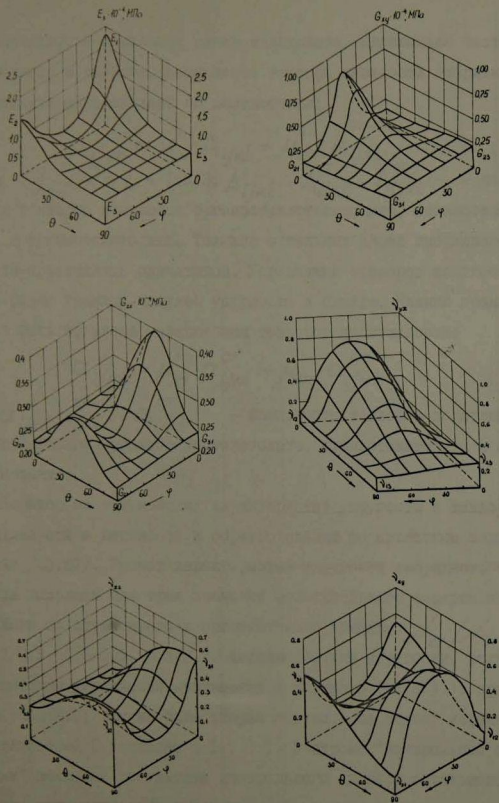


Рис. 1.8. Диаграммы анизотропии характеристик упругости органотекстолита. Обозначения вида характеристик приведены на рисунках.

и податливости отдельных слоев текстолита, являющихся частями гибридного композита. Компоненты тензора жесткости гибридного текстолита определялись по соотношению:

$$A_{ijkl} = \mu'_{ст} \cdot A_{ijkl} + \mu'_{от} \cdot A_{ijkl}^{от} \quad (1.6)$$

где  $i \cdot j \cdot k \cdot l = 1, 2, 3$ ;  $A_{ijkl}$ ,  $A_{ijkl}^{ст}$ ,  $A_{ijkl}^{от}$  - компоненты тензоров жесткости органостеклотекстолита, стеклотекстолита и органотекстолита. Толщина отдельных слоев гибридного композита принималась одинаковой. Усреднение тензоров жесткости дает верхнюю границу модулей упругости и сдвига. Нижняя граница может быть получена усреднением тензоров податливости:

$$\alpha_{ijkl} = \mu'_{ст} \cdot \alpha_{ijkl}^{ст} + \mu'_{от} \cdot \alpha_{ijkl}^{от} \quad (1.7)$$

где  $\alpha_{ijkl}$ ,  $\alpha_{ijkl}^{ст}$ ,  $\alpha_{ijkl}^{от}$  - компоненты тензоров податливости соответственно органостеклотекстолита, стеклотекстолита и органотекстолита.

Переход от технических характеристик упругости к тензорам податливости и жесткости и обратно сделан по известным зависимостям /33,57/. Расчет характеристик упругости гибридного текстолита выполнен для трех значений относительного содержания слоев ткани из стеклянного и органического волокна:  $\mu'_{ст} / \mu'_{от} = 0,7/0,3, 0,5/0,5, 0,3/0,7$ . Характеристики упругости, полученные методом усреднения жесткостей (согласно (1.6)), приведены в табл. I.9; там же дана вторая оценка - по методу усреднения податливостей (согласно (1.7)). В строке "контрольный эксперимент" показаны результаты контрольного экспериментального определения упругости этих гибридных материалов.

## Экспериментальные и расчетные характеристики упругости гибридного текстолита

| Относительное содержание ткани |           | Метод расчета           | Характеристики упругости |                     |                     |                        |                        |                        |                     |                     |                      |
|--------------------------------|-----------|-------------------------|--------------------------|---------------------|---------------------|------------------------|------------------------|------------------------|---------------------|---------------------|----------------------|
|                                |           |                         | $E_1 \cdot 10^{-4}$      | $E_2 \cdot 10^{-4}$ | $E_3 \cdot 10^{-4}$ | $G_{12} \cdot 10^{-4}$ | $G_{23} \cdot 10^{-4}$ | $G_{31} \cdot 10^{-4}$ | $\nu_{21}$          | $\nu_{32}$          | $\nu_{31}$           |
| $M'_{от}$                      | $M'_{сг}$ |                         | МПа                      |                     |                     |                        |                        |                        |                     |                     |                      |
| 0,3                            | 0,7       | По (I.6)                | $\frac{3,15}{3,4}$       | $\frac{2,52}{-0,4}$ | $\frac{0,82}{2,4}$  | $\frac{0,44}{-2,3}$    | $\frac{0,32}{-}$       | $\frac{0,36}{-}$       | $\frac{0,15}{16,7}$ | $\frac{0,60}{9,1}$  | $\frac{0,36}{35,7}$  |
|                                |           | По (I.7)                | $\frac{3,03}{7,1}$       | $\frac{2,23}{11,1}$ | $\frac{0,79}{5,9}$  | $\frac{0,31}{27,9}$    | $\frac{0,31}{-}$       | $\frac{0,34}{-}$       | $\frac{0,15}{16,7}$ | $\frac{0,53}{19,7}$ | $\frac{0,39}{30,3}$  |
|                                |           | Контрольный эксперимент | 3,26                     | 2,51                | 0,84                | 0,43                   | -                      | -                      | 0,18                | 0,66                | 0,56                 |
| 0,5                            | 0,5       | По (I.6)                | $\frac{2,91}{-1,7}$      | $\frac{2,20}{5,1}$  | $\frac{0,76}{-1,3}$ | $\frac{0,36}{-5,9}$    | $\frac{0,30}{-}$       | $\frac{0,33}{-}$       | $\frac{0,15}{0,0}$  | $\frac{0,53}{10,1}$ | $\frac{0,40}{23,1}$  |
|                                |           | По (I.7)                | $\frac{2,78}{2,8}$       | $\frac{1,91}{17,7}$ | $\frac{0,73}{2,7}$  | $\frac{0,24}{29,4}$    | $\frac{0,28}{-}$       | $\frac{0,30}{-}$       | $\frac{0,14}{6,7}$  | $\frac{0,53}{10,1}$ | $\frac{0,44}{15,4}$  |
|                                |           | Контрольный эксперимент | 2,86                     | 2,32                | 0,75                | 0,34                   | -                      | -                      | 0,15                | 0,59                | 0,52                 |
| 0,7                            | 0,3       | По (I.6)                | $\frac{2,67}{-1,1}$      | $\frac{1,88}{15,7}$ | $\frac{0,70}{11,3}$ | $\frac{0,27}{-8,0}$    | $\frac{0,27}{-}$       | $\frac{0,29}{-}$       | $\frac{0,14}{-7,7}$ | $\frac{0,53}{1,9}$  | $\frac{0,45}{-18,4}$ |
|                                |           | По (I.7)                | $\frac{2,56}{3,1}$       | $\frac{1,67}{25,1}$ | $\frac{0,68}{13,9}$ | $\frac{0,19}{24,0}$    | $\frac{0,26}{-}$       | $\frac{0,27}{-}$       | $\frac{0,14}{-7,7}$ | $\frac{0,53}{1,9}$  | $\frac{0,49}{-28,9}$ |
|                                |           | Контрольный эксперимент | 2,64                     | 2,23                | 0,79                | 0,25                   | -                      | -                      | 0,13                | 0,54                | 0,38                 |

Примечания. В числителе приведено расчетное значение характеристик упругости, в знаменателе - относительное отклонение в процентах от контрольного эксперимента.

Изменение значений  $E_1, E_2, E_3, G_{12}$  в зависимости от  $\mu'_{ст}$  и  $\mu'_{от}$  показано на рис. I.9, где штриховые линии соответствуют верхней и нижней оценкам предсказываемых характеристик; точки - контрольные экспериментальные значения.

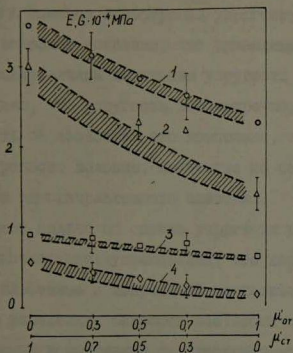


Рис. I.9. Зависимость характеристик упругости гибридного текстолита от относительного содержания слоев органо- и стеклоткани.

Приведенные в табл. I.9 данные свидетельствуют о том, что для исследованного материала интервалы между верхней и нижней оценками характеристик упругости сравнительно невелики. Расчетные значения упругости гибридного текстолита укладываются в доверительные интервалы контрольных опытных данных; несколько больше расхождение расчетных и опытных данных получено для коэффициентов Пуассона, что объясняется сравнительно большими ошибками воспроизводимости опытных значений этих коэффициентов ( см. табл. I.8 ).



Полученные результаты подтверждают возможность прогнозирования характеристик упругости трехкомпонентного гибридного текстолита по свойствам упругости двухкомпонентных текстолитов.

#### Выводы по главе I.

1. Выявлена и оценена анизотропия упругости высокопрочного органического волокна; показано, что приемлемым является допущение о трансверсальной изотропии упругости волокон.
2. Установлено, что упругость высокопрочного органопластика можно определить по свойствам его компонент, используя характеристики анизотропного волокна, найденные по опытным характеристикам упругости однонаправленного пластика.
3. Рассмотрена задача об оценке упругости косоугольно армированного органопластика; установлено, что характеристики упругости таких пластиков с допустимой точностью могут быть предсказаны методом усреднения тензоров жесткости отдельных слоев.
4. Контрольными испытаниями подтверждена возможность определения характеристик упругости гибридного композита - органо-стеклопластика по свойствам упругости двухкомпонентных материалов.

## Г Л А В А II

### ПОЛЗУЧЕСТЬ ОРГАНОПЛАСТИКА ПРИ РАСТЯЖЕНИИ

При проектировании элементов конструкций, подверженных действию длительных статических нагрузок, необходимо учитывать вязкоупругое поведение материала. В особенности это актуально для органических полимеров - композитов, состоящих из полимерных компонентов. В данной главе будет обсуждаться лишь одно из проявлений вязкоупругости - ползучесть при постоянном напряжении. Как и при решении задач упругости задачу определения ползучести композита можно решать на разных структурных уровнях. Ниже будут рассмотрены два варианта: во-первых, определение ползучести однонаправленно армированного органического пластика по свойствам арматуры и связующего и, во-вторых, оценка ожидаемой ползучести слоистого пластика, исходя из реологических характеристик отдельного однонаправленного слоя.

Кроме структурного подхода в главе II приведены результаты изучения возможностей прогнозирования длительной ползучести органического пластика по данным ускоренных испытаний при повышенных температурах.

#### 2.1. Расчет ползучести однонаправленно армированного органического пластика по реологическим свойствам компонент.

Решению задачи об определении ползучести однонаправленного композита по свойствам его компонент посвящены работы Борзовой, Ванниа, Скудры, Тетерса /12, 13, 17, 86, 98, 101/. Так, например, в / 86, 101/ получены выражения для деформаций и перераспределения напряжений в элементе, составленном из двух вязкоупругих

материалов, законы деформирования которых следуют модели типичного тела. В работах /12,13,17,86/ задача решается с использованием принципа Вольтерра<sup>a</sup>, согласно которому упругие постоянные при неизменном характере граничных условий заменяются соответствующими интегральными операторами. В качестве ядра ползучести в /17,86/ используется дробно-экспоненциальная функция Работнова. Особенности спектров времен релаксации композитов рассмотрены в /59,116/. При составлении расчетных схем композита, как правило, принимаются следующие допущения: арматура и связующее являются однородными и изотропными, а связь между деформацией и напряжением в них следует закону линейной вязкоупругости; между связующим и арматурой существует полное сцепление; при растяжении в направлении армирования компоненты однонаправленно армированного пластика находятся в одноосном напряженном состоянии (напряжения, возникающие в результате различия коэффициентов Пуассона, арматуры и связующего, принимаются ничтожно малыми). Необходимо отметить, что из всех перечисленных работ экспериментальная проверка предложенных решений производится только в /17,86,98/ на примере испытаний стеклопластика, связующего и стеклонитей. Что касается высокопрочных органических волокон и армированных ими пластиков, то в известной литературе такая проверка не описана. Между тем, отличаясь сравнительно высокими показателями удельной прочности, органопластики обнаруживают существенную ползучесть /133,139/. Кроме того, в /60,61/ отмечается, что в процессе пропитки органических нитей связующим и последующей полимеризации могут обнаруживаться эффекты физико-химического взаимодействия арматуры и связующего, что, в свою очередь, может вызвать изменение механических свойств компонентов в готовой композиции. Сказанное ставит под сомне-

ние возможность предсказания ползучести органопластиков по свойствам их компонент.

Предпринятая экспериментальная проверка изложенных предположений сделана в следующей последовательности: проведены длительные испытания на ползучесть структурных компонент органоластика; определены уравнения ползучести компонент, на основании которых согласно принятой расчетной схеме сделан расчет ожидаемой ползучести однонаправленно армированного органоластика при растяжении в направлении армирования; результаты расчета сравниваются с данными длительных (около 3 лет) контрольных испытаний.

Изучение ползучести структурных компонент проведено на образцах нитей из одного вида высокопрочных органических волокон, образцах эпоксидного связующего и образцах микропластика (нити, пропитанные смолой и затем подверженные термообработке)\*. Опыты проводились в комнатных температурно-влажностных условиях ( $T=20^{\circ}\text{C}$ ) при различных постоянных уровнях растягивающей нагрузки. Максимальные значения напряжений составляли для связующего 0,3, для нитей и микропластика 0,6 от предела кратковременной прочности. Полученные усредненные кривые длительной ползучести показаны на рис. 2.1-2.3. Аппроксимация опытных кривых проводилась выражением:

$$\varepsilon(t) = A \cdot \sigma + B \cdot \sigma \cdot \frac{1}{K} \cdot \sum_{i=1}^K [1 - \exp(-\frac{t}{\tau_i})] \quad (2.1)$$

где  $\varepsilon$ ,  $\sigma$  - соответственно деформация и напряжение;  $A$ ,  $B$ ,  $\tau$  - коэффициенты. Численные значения входящих в (2.1)

\* Испытания компонентов органоластика проведены А.Г.Адамовичем при выполнении работ /2,3/.

коэффициентов определены на ЭЕМ по опытным кривым с использованием алгоритма отыскания минимума функции многих переменных методом спуска /42/. Целевая функция принималась в следующем виде :

$$r = \sqrt{\frac{1}{N \cdot L} \cdot \sum_{n=1}^N \cdot \sum_{l=1}^L \left( \frac{\varepsilon_{nl}^{\varepsilon} - \varepsilon_{nl}^P}{\varepsilon_{nl}^{\varepsilon}} \right)^2} \cdot 100, \% \quad (2.2)$$

где  $L$  - количество усредненных точек на кривой ползучести при одном уровне напряжения;  $N$  - количество уровней напряжения;  $\varepsilon^P$  и  $\varepsilon^{\varepsilon}$  - соответственно расчетные и средние экспериментальные значения деформации. Найденные значения характеристик ползучести и ошибки аппроксимации приведены в табл. 2.1;

Таблица 2.1

Реологические характеристики структурных компонент  
однонаправленного органопластика.

| Характеристика          | Нить                        | Связующее            | Микропластик         |
|-------------------------|-----------------------------|----------------------|----------------------|
| $A$ , МПа <sup>-1</sup> | $0,9\text{E} \cdot 10^{-5}$ | $22,2 \cdot 10^{-5}$ | $0,71 \cdot 10^{-5}$ |
| $B$ , МПа <sup>-1</sup> | $1,96 \cdot 10^{-5}$        | $94,3 \cdot 10^{-5}$ | $0,88 \cdot 10^{-5}$ |
| $K$                     | 3                           | 3                    | 3                    |
| $\tau_1$ , сут.         | 0,21                        | 26,20                | 0,11                 |
| $\tau_2$ , сут.         | 4,81                        | 445,27               | 15,20                |
| $\tau_3$ , сут.         | 804,00                      | 445,33               | 366,10               |
| $r$ , %                 | 3,9                         | 11,0                 | 7,5                  |

аппроксимирующие кривые показаны на рис. 2.1-2.3, из которых следует, что в исследуемых диапазонах напряжений ползучесть указанных материалов с допустимой погрешностью можно описать соотношением линейной вязкоупругости.

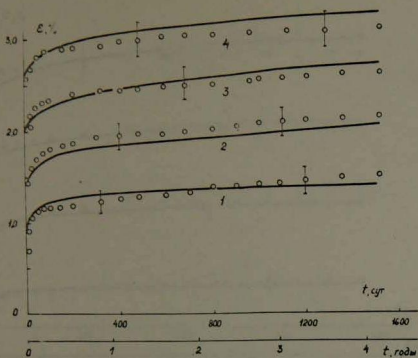


Рис. 2.1. Кривые ползучести полимерных нитей при разных уровнях напряжений :  $\sigma = 500$  МПа(1); 750(2); 1000(3); 1250(4); точки-эксперимент, линии-аппроксимация по (2.1).

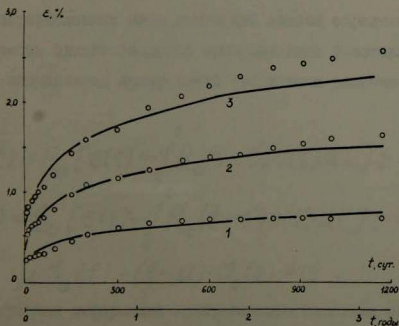


Рис. 2.2. Кривые ползучести образцов связующего при разных уровнях напряжения :  $\sigma = 6,8$  МПа(1); 13,6(2); 20,4(3); точки-эксперимент, линии-аппроксимация по (2.1).

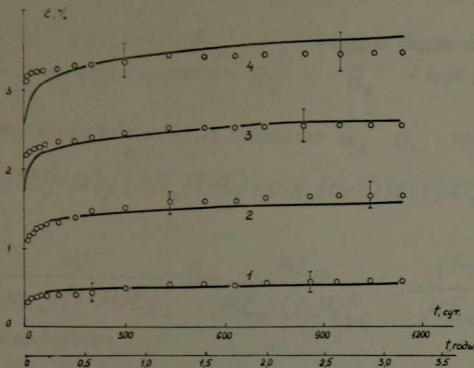


Рис. 2.3. Кривые ползучести микропластика при разных уровнях напряжений :  $\sigma = 331$  МПа(1); 1000(2); 1660(3); 2330(4); точки - эксперимент; линии - аппроксимация по (2.1).

С учетом перечисленных выше допущений задача определения ожидаемой ползучести однонаправленно армированного пластика при нагружении в направлении армирования сводится к решению системы уравнений:

$$\begin{aligned} \sigma_a(t) &= E_a \left[ \varepsilon(t) - \int_0^t R_a(t-t') \varepsilon(t') dt' \right]; \\ \sigma_c(t) &= E_c \left[ \varepsilon(t) - \int_0^t R_c(t-t') \varepsilon(t') dt' \right]; \\ \mu \sigma_a(t) + (1-\mu) \cdot \sigma_c(t) &= \sigma, \end{aligned} \quad (2.2)$$

где  $\varepsilon$  - средняя деформация армированного пластика под действием постоянного среднего напряжения  $\sigma$ ;  $\sigma_a(t)$ ,  $\sigma_c(t)$  - напряжения в произвольный момент времени соответственно в арматуре и в связующем (индекс "а" относится к характеристикам арматуры,

индекс "с" - связующего);  $E_\alpha$ ,  $E_c$  - модули упругости;  
 $\mu$  - коэффициент армирования;  $R_\alpha$ ,  $R_c$  - ядра релаксации.

Исключая из системы (2.2) напряжения  $\sigma_\alpha$ ,  $\sigma_c$ , получим:

$$\varepsilon(t) = \alpha + \int_0^t [bR_\alpha(t-t') + c \cdot R_c(t-t')] \varepsilon(t') dt', \quad (2.3)$$

где

$$\alpha = \frac{\sigma}{\mu E_\alpha + (1-\mu) E_c}; \quad b = \frac{\mu E_\alpha}{\mu E_\alpha + (1-\mu) E_c}; \quad c = \frac{(1-\mu) \cdot E_c}{\mu E_\alpha + (1-\mu) E_c}$$

Введем обозначение

$$R(t) = b \cdot R_\alpha(t) + c R_c(t). \quad (2.4)$$

Тогда (2.3) принимает вид:

$$\varepsilon(t) = \alpha + \int_0^t R(t-t') \varepsilon(t') dt'. \quad (2.5)$$

Уравнение (2.5) является линейным интегральным уравнением типа Вольтерра II рода. Из равенства (2.4) следует, что для определения ядра уравнения (2.5) необходимо знать ядра релаксации связующего  $R_c(t)$  и арматуры  $R_\alpha(t)$ . В связи с тем, что испытания компонентов органопластика проведены в режиме ползучести, параметры ядер релаксации  $R_c$  и  $R_\alpha$  определим из ядер ползучести  $K_c$  и  $K_\alpha$ . Следуя аппроксимации (2.1), ядра ползучести  $K_c$  и  $K_\alpha$  принимаем в виде суммы экспонент:

$$K_\alpha(t) = B_\alpha \sum_{i=1}^k \frac{1}{\tau_{\alpha i}} \cdot e^{-t/\tau_{\alpha i}}; \quad K_c(t) = B_c \sum_{j=1}^n \frac{1}{\tau_{c j}} \cdot e^{-t/\tau_{c j}}, \quad (2.6)$$



где  $B_{\alpha}, \tau_{ai}$  ( $i = I, \dots, K$ ) - параметры ядра ползучести арматуры;  $B_c, \tau_{cj}$  ( $j = I, \dots, n$ ) - то же для связующего. Тогда ядра релаксации  $R_{\alpha}(t)$  и  $R_c(t)$  также можно представить в виде суммы экспонент :

$$R_{\alpha}(t) = \sum_{i=1}^K D_{ai} \cdot e^{-q_{ai} \cdot t}; \quad R_c(t) = \sum_{j=1}^n D_{cj} \cdot e^{-q_{cj} \cdot t}, \quad (2.7)$$

где  $D_{ai}, q_{ai}$  ( $i = I, \dots, K$ ) - параметры ядра релаксации арматуры;  $D_{cj}, q_{cj}$  ( $j = I, \dots, n$ ) - то же для связующего.

Параметры ядер релаксации могут быть определены по известным соотношениям /63/ -  $q_{ai}$  находятся как действительные корни полинома  $K$ -ой степени :

$$\sum_{i=1}^K \frac{B_{\alpha} / \tau_{ai}}{q_{\alpha} - 1 / \tau_{ai}} = 1, \quad (2.8)$$

а коэффициенты  $D_{ai}$  определяются из системы  $K$  линейных уравнений

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^K \frac{D_{ai}}{q_{ai} - 1 / \tau_{a1}} &= 1; \\ \sum_{i=1}^K \frac{D_{ai}}{q_{ai} - 1 / \tau_{a2}} &= 1; \\ \dots &\dots \dots \dots \\ \sum_{i=1}^K \frac{D_{ai}}{q_{ai} - 1 / \tau_{ak}} &= 1. \end{aligned} \quad (2.9)$$

Аналогично находятся параметры ядра релаксации связующего. После некоторых преобразований ядро уравнения (2.5) можно представить в следующем виде :

$$R(t) = \sum_{i=1}^{K+n} H_i \cdot e^{-\eta_i \cdot t}, \quad (2.10)$$

где  $H_i = b \cdot D_{\alpha_i}$  ;  $\eta_i = q_{\alpha_i}$  при  $i = 1, \dots, K$  и  $\eta_{K+j} = q_{c_j}$  ;  
 $H_{K+j} = c D_{c_j}$  при  $j = 1, \dots, n$  . Используя метод преобразования Лапласа, получаем решение уравнения (2.5) с ядром типа (2.10) в следующем виде :

$$\varepsilon(t) = \alpha \left\{ 1 - \sum_{i=1}^{K+n} \frac{\varphi_i}{\alpha_i} [1 - \exp(\alpha_i \cdot t)] \right\} . \quad (2.11)$$

Здесь  $\alpha_i$  являются действительными корнями полинома

$$P_2(p) = p^{K+n} + \sum_{i=1}^{K+n} p^{K+n-i} \cdot (C_i - G_i) , \quad (2.12)$$

где  $C_i$  ,  $G_i$  - коэффициенты; функции  $\varphi_i$  определяются из выражения

$$\varphi_i = \frac{P_1(\alpha_i)}{P_2'(\alpha_i)} , \quad (2.13)$$

где  $P_1(p) = \sum_{i=1}^{K+n} p^{K+n-i} \cdot G_i$  ;  $P_2'$  - производная полинома  $P_2(p)$  по переменной  $p$  , определяемая в точках  $\alpha_i$  .

Зависимости описывающие перераспределение во времени напряжений в арматуре и связующем, находятся подстановкой выражения (2.11) в исходную систему уравнений (2.2) :

$$\begin{aligned} \sigma_{\alpha}(t) = E_{\alpha} \left\{ \alpha \left[ 1 - \sum_{i=1}^{K+n} \frac{\varphi_i}{\alpha_i} \cdot (1 - e^{\alpha_i \cdot t}) \right] - \right. \\ \left. - \int_0^t \sum_{i=1}^K D_{\alpha_i} \cdot e^{-q_{\alpha_i} \cdot (t-t')} \cdot \alpha \left[ 1 - \sum_{i=1}^{K+n} \frac{\varphi_i}{\alpha_i} (1 - e^{\alpha_i t'}) \right] dt' \right\} ; \quad (2.14) \end{aligned}$$

$$\sigma_c(t) = E_c \left\{ a \left[ 1 - \sum_{i=1}^{K+n} \frac{\varphi_i}{\alpha_i} (1 - e^{\alpha_i t}) \right] - \int_0^t \sum_{j=1}^n D_{cj} \cdot e^{-q_{cj}(t-t')} \cdot a \left[ 1 - \sum_{i=1}^{K+n} \frac{\varphi_i}{\alpha_i} (1 - e^{\alpha_i t'}) \right] dt' \right\} \quad (2.15)$$

Для использования полученных зависимостей составлена программа для ЭВМ HP-9600.

Расчет ожидаемой ползучести однонаправленно армированного пластика при заданном коэффициенте армирования проводится по двум вариантам: в первом в качестве реологических характеристик арматуры принимались характеристики нитей, во-втором характеристики микропластика; значения характеристик связующего в обоих вариантах были одни и те же (см. табл. 2.1). Полученные по двум вариантам расчетные кривые ползучести пластика показаны на рис. 2.4; там же приводятся усредненные результаты длительных (около 3 лет) контрольных испытаний на ползучесть.

Контрольные опыты проводились на специальных стендах разработанных в Институте механики полимеров и предназначенных для изучения длительной ползучести высокопрочных композитов при растяжении. Более подробное описание этих стендов приводится в п.4.1. Опыты проведены при четырех уровнях напряжения в диапазоне до 0,6 от кратковременной прочности.

Сравнение расчетных и опытных кривых показывает, что предсказание ползучести пластика по свойствам нити и связующего дает систематически завышенные результаты; согласно расчетным кривым деформации оказываются в 1,5-1,7 раза больше наблюдаемых в экспериментах. В то же время результаты расчета ползучести по ха-

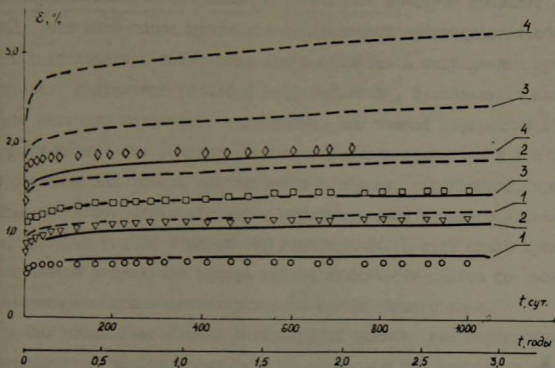


Рис. 2.4. Кривые длительной ползучести однонаправленного органопластика. Точки—контрольные испытания; линии—расчет по характеристикам нитей и смолы (---) и характеристикам микропластика и смолы (—) для соответствующих значений  $\sigma$ .  
 $\sigma = 300$  МПа (○, 1), 450 (▽, 2), 600 (□, 3), 800 (◇, 4).

характеристикам микропластика и связующего вполне удовлетворительно согласуются с данными контрольных испытаний; среднее относительное квадратическое расхождение расчетных и опытных данных для разных уровней напряжений изменяется от 6 до 15 %.

## 2.2. Предсказание ползучести слоистого органопластика по реологическим свойствам отдельного слоя.

Выше отмечалось, что к особенностям органопластика относится

повышенная ползучесть. Наличие полимерной арматуры приводит к тому, что даже однонаправленно армированный органический пластик обнаруживает заметную ползучесть при растяжении в направлении армирования; длительные (около 3 лет) испытания, проводимые в Институте механики полимеров, показывают, что полная деформация (с учетом ползучести) может превышать упругую более чем в 1.6 раза. В реальных намоточных конструкциях материал, как правило, представляет собой слоистый пакет, отдельные слои которого уложены под разными углами в плоскости армирования. В этой связи представляется актуальной задача оценки ползучести пакета по реологическим свойствам однонаправленно армированного слоя.

Как показывает анализ литературных данных, для определения вязкоупругих свойств композита по свойствам его компонент обычно используется известное решение соответствующей упругой задачи. Переход от упругого решения к вязкоупругому может быть осуществлен разными методами. Один из вариантов связан с заменой постоянных в упругом решении соответствующими линейными интегральными операторами /17,86/. В другом подходе используется принцип соответствия /115,154/. В этом случае упругие постоянные заменяются изображениями соответствующих вязкоупругих функций. После проведения необходимых преобразований в пространстве изображений делается обратный переход. Аналитическое обращение обычно затруднительно, поэтому применяются приближенные, численные методы /115/.

Для определения вязкоупругих свойств композитов получил экспериментальное подтверждение приближенный квазиупругий метод /114,115/. В основу метода положена замена характеристик, входящих в упругое решение временными зависимостями соответствующих величин. Что касается точности метода, то, как отмечено в /115/: "при его применении можно утверждать, что в большинстве слу-

чаев точность метода вполне удовлетворяет обычным инженерным требованиям".

В данной работе ставилась задача оценки ползучести слоистого органопластика по вязкоупругим свойствам отдельного однонаправленно армированного слоя. Последовательность решения выбрана следующей : проведены испытания и определены уравнения ползучести модельного однонаправленно армированного органопластика . Затем на основе полученных данных рассчитывалась ожидаемая ползучесть слоистого пластика с заданной укладкой слоев по толщине; переход от упругого решения, полученного усреднением тензоров жесткости отдельных слоев /44,100/, к вязкоупругому сделан квазиупругим методом /115/. Результаты прогноза сравнивались с данными контрольных испытаний.

Предположим, что отдельный слой является однородным, трансверсально-изотропным материалом находящимся в условиях плоского напряженного состояния. Расположение осей симметрии слоя показано на рис. 2.5.

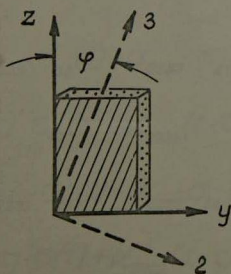


Рис. 2.5. Расположение осей симметрии однонаправленного слоя.

В случае линейной вязкоупругости связь между деформациями и напряжениями при плоском напряженном состоянии имеет вид :

$$\sigma_{33}(t) = A_{3333} \cdot \varepsilon_{33}(t) + A_{2233} \cdot \varepsilon_{22}(t) - \int_0^t [R_{3333}(t-\tau) \cdot \varepsilon_{33}(\tau) + R_{2233}(t-\tau) \cdot \varepsilon_{22}(\tau)] d\tau; \quad (2.16)$$

$$\sigma_{22}(t) = A_{2233} \cdot \varepsilon_{33}(t) + A_{2222} \cdot \varepsilon_{22}(t) - \int_0^t [R_{2233}(t-\tau) \cdot \varepsilon_{33}(\tau) + R_{2222}(t-\tau) \cdot \varepsilon_{22}(\tau)] d\tau; \quad (2.17)$$

$$\sigma_{23}(t) = A_{2323} \cdot \varepsilon_{23}(t) - \int_0^t R_{2323}(t-\tau) \cdot \varepsilon_{23}(\tau) d\tau, \quad (2.18)$$

где  $A_{ijkl}$  и  $R_{ijkl}(t)$  ( $i, j, k, l = 2, 3$ ) - соответственно компоненты тензора жесткости и тензора ядер релаксации.

Используя тензор податливости  $\alpha_{ijkl}$  и тензор ядер ползучести  $K_{ijkl}(t)$  выражения (2.16), (2.17), (2.18) можно записать в следующем виде :

$$\varepsilon_{33}(t) = \alpha_{3333} \cdot \sigma_{33}(t) + \alpha_{2233} \cdot \sigma_{22}(t) + \int_0^t [K_{3333}(t-\tau) \cdot \sigma_{33}(\tau) + K_{2233}(t-\tau) \cdot \sigma_{22}(\tau)] d\tau; \quad (2.19)$$

$$\varepsilon_{22}(t) = \alpha_{2233} \cdot \sigma_{33}(t) + \alpha_{2222} \cdot \sigma_{22}(t) + \int_0^t [K_{2233}(t-\tau) \cdot \sigma_{33}(\tau) + K_{2222}(t-\tau) \cdot \sigma_{22}(\tau)] d\tau; \quad (2.20)$$

$$\varepsilon_{23}(t) = \alpha_{2323} \cdot \sigma_{23}(t) + \int_0^t K_{2323}(t-\tau) \cdot \sigma_{23}(\tau) d\tau. \quad (2.21)$$

Компоненты тензоров жесткости  $A_{ijkl}$  и податливости  $\alpha_{ijkl}$  выражаются через технические характеристики упругости материала /33,57/ :

$$\alpha_{3333} = \frac{1}{E_3}; \quad \alpha_{2222} = \frac{1}{E_2};$$

$$\alpha_{2233} = \frac{\nu_{23}}{E_3}; \quad \alpha_{2323} = \frac{1}{4G_{23}};$$

$$A_{3333} = \frac{E_3}{1 - \nu_{23} \cdot \nu_{32}}; \quad A_{2222} = \frac{E_2}{1 - \nu_{23} \cdot \nu_{32}}; \quad (2.22)$$

$$A_{2233} = -\frac{\nu_{32} \cdot E_3}{1 - \nu_{23} \cdot \nu_{32}}; \quad A_{2323} = G_{23}$$

Величина  $\nu_{32}$  независимой не является и определяется из условия симметричности  $E_2 \cdot \nu_{23} = E_3 \cdot \nu_{32}$ .

Как следует из выражений (2.19)-(2.21) ползучесть слоя в произвольном направлении в плоскости 2,3 (см.рис.1.2) определяется 4 независимыми ядрами ползучести:  $K_{3333}(t), K_{2222}(t), K_{2233}(t), K_{2323}(t)$ , которые можно найти из следующих испытаний :

1. постоянное напряжение действует в направлении оси 3

$$\sigma_{33}(t) = \sigma_{33}^0 = const; \quad \sigma_{22}(t) = \sigma_{23}(t) = 0.$$

Из выражений (2.19), (2.20) получим

$$\frac{\epsilon_{33}(t)}{\sigma_{33}^0} = \frac{1}{E_3(t)} = \alpha_{3333} + \int_0^t K_{3333}(t-\tau) d\tau; \quad (2.23)$$

$$\frac{\epsilon_{22}(t)}{\sigma_{33}^0} = -\frac{\nu_{23}(t)}{E_3(t)} = \alpha_{2233} + \int_0^t K_{2233}(t-\tau) d\tau. \quad (2.24)$$



2. Постоянное напряжение действует вдоль оси 2.

$$\sigma_{22}(t) = \sigma_{22}^0 = \text{const}; \quad \sigma_{33}(t) = \sigma_{23}(t) = 0$$

Тогда из (2.20) получим :

$$\frac{\varepsilon_{22}(t)}{\sigma_{22}^0} = \frac{1}{E_2(t)} = \alpha_{2222} + \int_0^t K_{2222}(t-\tau) d\tau. \quad (2.25)$$

3. Напряжение приложено вдоль оси Z , угол  $\varphi = 45^\circ$  (см. рис. I.2).

$$\sigma_{zz}(t) = \sigma_{45}^0 = \text{const}.$$

Тогда

$$\frac{\varepsilon_{zz}(t)}{\sigma_{45}^0} = \frac{1}{E_{45}(t)} = \alpha_{zzzz} + \int_0^t K_{zzzz}(t-\tau) d\tau. \quad (2.26)$$

С помощью соотношения (2.26) можно определить  $G_{23}(t)$ :

$$\frac{1}{G_{22}(t)} = \frac{4}{E_{45}(t)} \left( \frac{1}{E_3(t)} + \frac{1}{E_2(t)} \right) + 2 \frac{\nu_{23}(t)}{E_3(t)}, \quad (2.27)$$

где выражения  $E_3(t)$ ,  $E_2(t)$ ,  $\nu_{23}(t)$  определяются по формулам (2.23)-(2.25).

Ядра ползучести  $K_{ijkl}(t)$  аппроксимируем суммой экспонент :

$$K_{ijkl}(t) = K_{ijkl}^0 \cdot \sum_{m=1}^{n_1} \frac{1}{\tau_{m_1}} \cdot e^{-t/\tau_{m_1}} \quad (2.28)$$

С учетом (2.28) выражения (2.23)-(2.26) представлены в виде :

$$\frac{1}{E_3(t)} = \alpha_{3333} + \int_0^t K_{3333}^0 \cdot \sum_{m_1=1}^{n_1} \frac{1}{\tau_{m_1}} \cdot e^{-\frac{t-\tau}{\tau_{m_1}}} \cdot d\tau = \quad (2.29)$$

$$= \alpha_{3333} + K_{3333}^0 \cdot \sum_{m_1=1}^{n_1} (1 - e^{-t/\tau_{m_1}});$$

$$\frac{1}{E_2(t)} = a_{2222} + K_{2222}^0 \cdot \sum_{m_2=1}^{n_2} (1 - e^{-t/\tau_{m_2}}); \quad (2.30)$$

$$\frac{v_{23}(t)}{E_3(t)} = -[a_{2233} + K_{2233}^0 \cdot \sum_{m_3=1}^{n_3} (1 - e^{-t/\tau_{m_3}})]; \quad (2.31)$$

$$\frac{1}{E_{45}(t)} = a_{zzzz} + K_{zzzz}^0 \cdot \sum_{m_4=1}^{n_4} (1 - e^{-t/\tau_{m_4}}). \quad (2.32)$$

Параметры ядер ползучести  $K_{ijkl}^0, \tau_m$  определены путем аппроксимации опытных кривых ползучести. Испытания на ползучесть проведены на образцах однонаправленно армированного органопластика с коэффициентом армирования 0,65. Образцы вырезались в направлениях  $\varphi = 0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ . Продолжительность испытаний 5 час. Деформации измерялись электромеханическими тензометрами: продольные на базе 65 мм, поперечные - на базе 15 мм. Одновременное измерение продольных и поперечных деформаций проводилось только при испытаниях образцов, вырезанных в направлении армирования  $\varphi = 0^\circ$ . Эти образцы имели вид пластинки с размерами 180x15x2 мм. Размеры образцов для  $\varphi = 45^\circ$  и  $\varphi = 90^\circ$  были 180x20x6 мм. Испытания на ползучесть проведены в следующих диапазонах напряжений:  $\varphi = 0^\circ$  - 6 уровней, в диапазоне от 0,4 до 0,8 от кратковременной прочности,  $\varphi = 45^\circ$  - 4 уровня в диапазоне 0,4+0,66,  $\varphi = 90^\circ$  - 3 уровня от 0,5 до 0,8 от прочности в данном направлении. Для каждого уровня напряжения проведено 3-5 параллельных испытаний.

Предварительный анализ результатов показал, что ползучесть исследуемого материала в разных направлениях характеризуется различными нормированными функциями времени  $F(t)$  (рис.2.6).

Подобные результаты были получены в работах /130,147,157/ на примере анизотропной ползучести стеклопластика, полиэтилена и эвтектического композита  $(C_0 C_r)(C_0 C_r)_7 C_3$ .

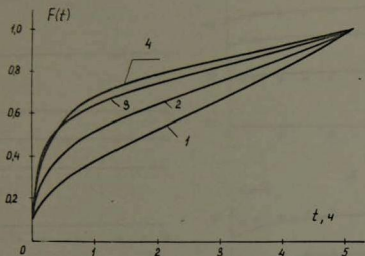


Рис. 2.6. Нормированные функции времени для разных направлений в плоскости армирования :  
 1-  $\varphi = 90^\circ$ ; 2-  $\varphi = 45^\circ$ ; 3,4-  $\varphi = 0^\circ$   
 соответственно поперечные и продольные деформации.

Аппроксимация опытных кривых проводилась выражениями (2.29)–(2.32). Численные значения параметров  $K_{ijkl}^0$ ,  $\tau_m$ , определены по опытным кривым с использованием алгоритма /43/. Целевая функция принималась в виде /2.2). Найденные значения параметров и ошибки аппроксимации приведены в табл. 2.2.

Опытные и аппроксимирующие кривые ползучести однонаправленно армированного органоластика для разных направлений в плоскости армирования показаны на рис. 2.7 и 2.8.

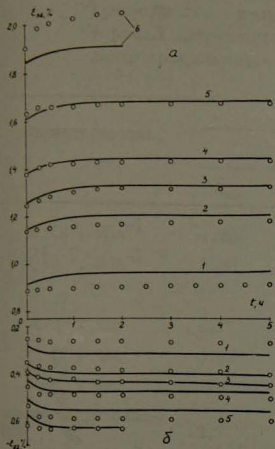


Рис.2.7. Кривые ползучести при растяжении в направлении армирования ( $\varphi = 0^\circ$ ) для разных уровней напряжения: 1-0,4, 2-0,5, 3-0,55, 4-0,6, 5-0,7, 6-0,8 от  $\sigma_{33}^p$ . (а) - продольные деформации; (б) - поперечные деформации. Линии - аппроксимация, точки - опыт.

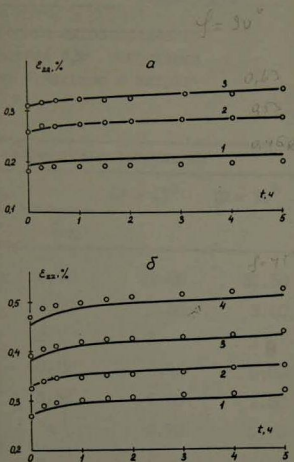


Рис.2.8. Кривые ползучести при растяжении под углом к направлению армирования: а -  $\varphi = 90^\circ$ , 1-0,4, 2-0,53, 3-0,63; б -  $\varphi = 45^\circ$ ; 1-0,4, 2-0,5, 3-0,56, 4-0,66.

Таблица 2.2

Реологические характеристики однонаправленно армированного органопластика при нагружении в разных направлениях по отношению к направлению армирования.

| Характеристика                        | Направление нагружения |                    |                      |                      |
|---------------------------------------|------------------------|--------------------|----------------------|----------------------|
|                                       | $\varphi = 0^\circ$    |                    | $\varphi = 45^\circ$ | $\varphi = 90^\circ$ |
|                                       | $\varepsilon_{33}$     | $\varepsilon_{22}$ |                      |                      |
| $\alpha \cdot 10^5, \text{ МПа}^{-1}$ | 1,53                   | 0,48               | 22,00                | 32,50                |
| $K^0 \cdot 10^5, \text{ МПа}^{-1}$    | 0,09                   | 0,07               | 2,85                 | 3,60                 |
| $n$                                   | 2                      | 2                  | 3                    | 3                    |
| $\tau_1, \text{ час}$                 | 0,17                   | 0,17               | 0,28                 | 0,80                 |
| $\tau_2, \text{ час}$                 | 3,88                   | 3,53               | 2,50                 | 2,50                 |
| $\tau_3, \text{ час}$                 | -                      | -                  | 2,70                 | 2,70                 |
| ошибка аппроксимации $n, \%$          | 3,7                    | 6,0                | 3,8                  | 5,7                  |

Как отмечалось выше, ожидаемая ползучесть слоистого пакета рассчитывалась на основе метода усреднения тензоров жесткости отдельных слоев. Определение характеристик упругости слоистого пластика этим методом проводится по структурной схеме, показанной на рис.2.9.

Эта же схема использована для расчета временной зависимости характеристик упругости. Для этого в соответствии с квазиупругим методом производилась замена независимых характеристик упругости слоя  $E_3, E_2, \nu_{23}, G_{23}$  временными зависимостями этих величин:

$$E_3 \rightarrow E_3(t); E_2 \rightarrow E_2(t); \nu_{23} \rightarrow \nu_{23}(t); G_{23} \rightarrow G_{23}(t). \quad (2.33)$$

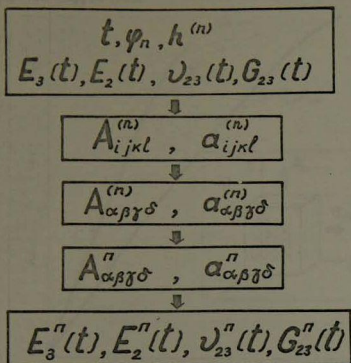


Рис. 2.9. Структурная схема последовательности расчета характеристик упругости слоистого композита методом усреднения тензоров жесткости.

Зависимости  $E_3(t)$ ,  $E_2(t)$ ,  $\nu_{23}(t)$ ,  $G_{23}(t)$  определяются выражениями (2.27), (2.29)–(2.32) с учетом коэффициентов приведенных в табл.2.2. Результатом расчета являются характеристики упругости слоистого пластика определенные для некоторого момента времени  $t$ . Затем весь расчет повторяется для  $t + \Delta t$  и т.д. Приведенная на рис. 2.9 структурная схема с учетом замены (2.33) была реализована в виде программы для ЭВМ HP-9600.

Контрольные испытания проведены на слоистом косоугольно армированном органопластике с укладкой  $[\pm 45/0_2/\pm 45/0_2/\pm 45]$ . Более подробно схема армирования пластика описана в п.1.3. Расположение осей симметрии материала показано на рис. 2.10. Об-

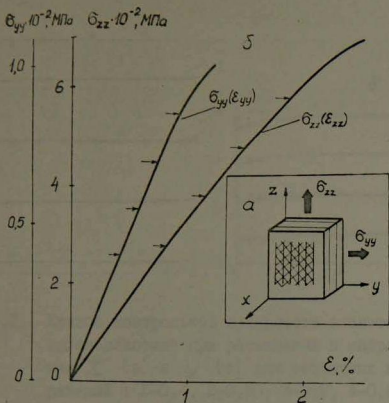


Рис. 2.10. Расположение осей симметрии (а) и диаграммы деформирования слоистого органоупластика при растяжении в направлении  $Z$  и  $Y$  (б).

разцы вырезались в направлениях  $Z$  и  $Y$  и имели вид пластинок с размерами  $180 \times 20 \times 2$  мм. Для каждого направления испытания проводились при 4 уровнях постоянного напряжения в диапазоне  $0,4-0,85$  от предела кратковременной прочности в соответствующем направлении. Для одного уровня напряжения испытывалось не менее 3-х образцов. Диаграммы деформирования материала, полученные при определении пределов прочности в направлениях  $Z$  и  $Y$  показаны на рис. 2.10. Стрелками отмечены уровни напряжений при которых проводились испытания на ползучесть.

На рис. 2.11 показаны результаты контрольных испытаний на ползучесть. Сплошными линиями обозначены расчетные кривые, полученные на основе метода усреднения тензоров жесткости по формулам (2.27), (2.29)-(2.32).

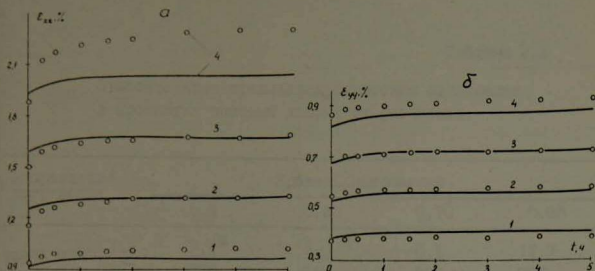


Рис. 2.11. Кривые контрольной ползучести слоистого органоластика при растяжении в направлении  $Z$  (а) и  $Y$  (б) для различных напряжений: 1-0,4, 2-0,55, 3-0,7, 4-0,85 от кратковременной прочности в соответствующем направлении. Линии-расчет, точки-эксперимент.

Как видно из рис. 2.11 наибольшее отклонение расчетных и опытных кривых ползучести получено для уровня напряжения  $\sigma = 0,85$ , что, по-видимому, можно объяснить увеличением влияния нелинейности. Средние относительные квадратические отклонения опытных данных от расчетных, полученных методами усреднения тензоров жесткости и податливости приведены в табл. 2.3.



Таблица 2.3

Относительные среднеквадратические отклонения  
в процентах опытных данных от расчетных.

| Направление<br>нагружения |   | Уровень напряжения  |                   |                   |                    |
|---------------------------|---|---------------------|-------------------|-------------------|--------------------|
|                           |   | 0,4                 | 0,55              | 0,70              | 0,85               |
| вдоль оси                 | Z | $\frac{7,4^*}{310}$ | $\frac{5,0}{340}$ | $\frac{5,1}{337}$ | $\frac{12,7}{295}$ |
|                           |   |                     |                   |                   |                    |
| вдоль оси                 | Y | $\frac{5,7}{193}$   | $\frac{6,7}{162}$ | $\frac{3,6}{169}$ | $\frac{8,8}{164}$  |
|                           |   |                     |                   |                   |                    |

### 2.3. Прогнозирование длительной ползучести органопластика по результатам температурных экспресс-испытаний.

Кроме структурного подхода к определению ползучести композита, изучались возможности прогнозирования длительной ползучести органопластика по результатам температурных экспресс-испытаний. На образцах однонаправленного органопластика при растяжении в направлении армирования проведены:

- 1) испытания на ползучесть ограниченной продолжительности (около 5 час) при разных постоянных напряжениях и температурах;
- 2) опыты при постоянном напряжении и температуре, изменяющейся по заданному закону; продолжительность испытаний 5 час;
- 3) длительные контрольные испытания на ползучесть при комнатной температуре (продолжительность около 3 лет).

\* В числителе показано отклонение от расчетной кривой, полученной на основе метода усреднения тензоров жесткости, в знаменателе - на основе усреднения тензоров податливости.

Кратковременные испытания на ползучесть выполнены при температурах  $T$ : 20, 40, 50, 60, 70, 80 и 90°C. Поскольку для анализа опытных данных предполагалось использовать соотношения линейной вязкоупругости, уровни напряжений выбирались такими, чтобы общая деформация (с учетом ползучести) не превышала 1%. Обратимость вязкоупругих деформаций проверялась наблюдением за обратной ползучестью. Продолжительность наблюдения составляла около суток. Величина остаточных деформаций к этому времени обычно не превышала 10% от максимально достигнутой вязкоупругой деформации. Для каждого уровня температур испытано не менее трех образцов. Опыты проведены на 3-х секционной испытательной машине ZST - 3/3 (производство народного предприятия *Werkstoffprüfmashinen*, ГДР), предназначенной для исследования ползучести металлов. Описание термокамеры, необходимой для обеспечения заданного температурного режима, а также приспособления для измерения деформаций приводится в п.3.1.

Полученные усредненные кривые податливости для некоторых значений температуры показаны на рис.2.12.

Аппроксимация семейства кривых податливости выполнена уравнением линейной вязкоупругости с ядром ползучести в виде суммы экспонент:

$$J(t, T) = J_0(T) + J_n \cdot \frac{1}{K} \cdot \sum_{i=1}^K [1 - \exp(-\alpha_T \cdot t / \tau_i)] \quad (2.34)$$

$$\ln \alpha_T = \frac{c_1 \cdot (T - T_0)}{c_2 + (T - T_0)}, \quad (2.35)$$

где  $\alpha_T$  - функция температурно-временного сдвига;  $J_0(T)$  - условно-мгновенная податливость, определяемая по первому замеру деформации, т.е. через 5 сек после приложения нагрузки.

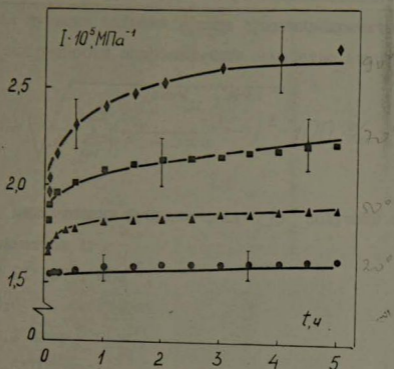


Рис.2.12. Зависимость податливости однонаправленного органоупластика от времени при  $T = 20^\circ\text{C}$  (●),  $50^\circ\text{C}$  (▲),  $70^\circ\text{C}$  (■),  $90^\circ\text{C}$  (◆).

Зависимость  $J_0(T)$  и модуля упругости  $E = \frac{1}{J_0}$  изображена на рис.2.13.

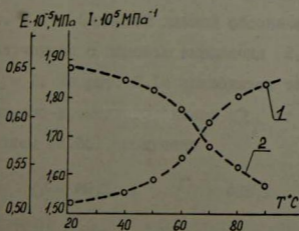


Рис.2.13. Зависимость условно-мгновенной податливости  $J_0$  (кривая 1) и модуля упругости  $E$  (кривая 2) органоупластика от температуры.

Для определения параметров  $J_n$  и  $\tau_i$  использовался алгоритм /43/. Целевая функция выбрана в виде среднеквадратической относительной погрешности аппроксимации семейства опытных кривых :

$$\Phi = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \left( \frac{J_j^{\text{расч.}} - J_j^{\text{эксп.}}}{J_j^{\text{эксп.}}} \right)^2} \cdot 100, \% \quad (2.36)$$

В результате минимизации функции цели  $\Phi$  получены следующие значения параметров :

$$J_n = 0,81 \cdot 10^{-5}, \text{ МПа}^{-1};$$

$$K = 5;$$

$$\tau_1 = 8,2 \text{ час};$$

$$\tau_2 = 6,5 \cdot 10^2 \text{ час};$$

$$\tau_3 = 6,4 \cdot 10^3 \text{ час};$$

$$\tau_4 = 6,4 \cdot 10^3 \text{ час};$$

$$\tau_5 = 6,5 \cdot 10^3 \text{ час}.$$

(2.37)

Найденным параметрам соответствует  $\Phi = 7,5 \%$ . Затем, согласно изложенной в /108/ методике, с учетом (2.37) была построена обобщенная кривая длительной ползучести органопластика, которая показана на рис. 2.14. Сплошной линией обозначена аппроксимирующая кривая, полученная с помощью выражения (2.34) с учетом (2.37) для  $\alpha_T = 1$ . На рис. 2.14 приводится также зависимость функции температурно-временного сдвига  $\alpha_T$  от температуры, описанная соотношением (2.35), получено :

$$C_1 = 60,2 \text{ и } C_2 = 408,1 \quad (2.38)$$

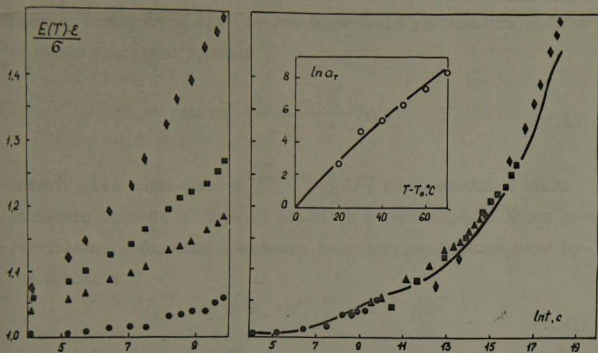


Рис. 2.14. Относительная податливость  $J(t, T) / J_0(T)$  органоластика при разных температурах  $T$ :  $20^\circ\text{C}$  (●),  $50^\circ\text{C}$  (▲),  $70^\circ\text{C}$  (■),  $90^\circ\text{C}$  (◆). Исходные кривые податливости, функция температурно-временного сдвига  $\alpha_T$ , обобщенная кривая податливости.

Возможность описания температурных кривых кратковременной ползучести органоластика с использованием функции температурно-временного сдвига свидетельствует о наличии температурно-временной аналогии (ТВА). Однако, для окончательного подтверждения существования ТВА необходимо на основе найденных ранее параметров (2.37), (2.38) проверить возможность описания опытов на ползучесть при нестационарных температурных режимах. Для этого проведены испытания на ползучесть при температуре изменяющейся по линейному закону и постоянном напряжении:

$$T(t) = T_0 + v_T \cdot t; \quad \sigma_0 = 350 \text{ МПа}, \quad (2.39)$$

где  $T_0 = 20^\circ\text{C}$ ;  $V_T = 16 \frac{^\circ\text{C}}{\text{час}}$ .

Влияние температуры при расчете ползучести учитывалось введением шкалы условного времени  $t'$  :

$$t' = \int_0^t \exp\left(\frac{c_1 \cdot V_T \cdot \tau}{c_2 + V_T \cdot \tau}\right) d\tau \quad (2.40)$$

Вязкоупругая податливость  $J(t, T) - J_0(T)$  определялась в шкале условного времени по формуле (2.34) с учетом (2.40). Кроме того, учитывалась деформация линейного температурного расширения органопластика

$$J_T(t) = \alpha_T \cdot V_T \cdot t, \quad (2.41)$$

где  $\alpha_T = -9,0 \cdot 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$ . Результаты расчета сравниваются на рис. 2.15 с усредненными данными контрольного опыта. Средне-

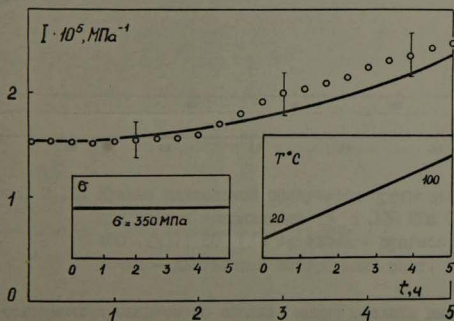


Рис. 2.15. Зависимость податливости образца из органо-пластика от времени при условиях (2.39.) Точки—эксперимент, линии — расчет.

квадратическое относительное отклонение опытных и расчетных данных составляет 9 %.

Выявленное соблюдение ТВА для случая линейной ползучести одноподнаправленного органоэластика позволило сделать прогноз длительной ползучести материала при температуре  $T = 20^{\circ}\text{C}$ . На рис. 2.16 результаты прогноза сопоставлены с данными контрольных испытаний на ползучесть продолжительностью около 3 лет. Среднеквадратическое относительное отклонение не превышает 14 %.

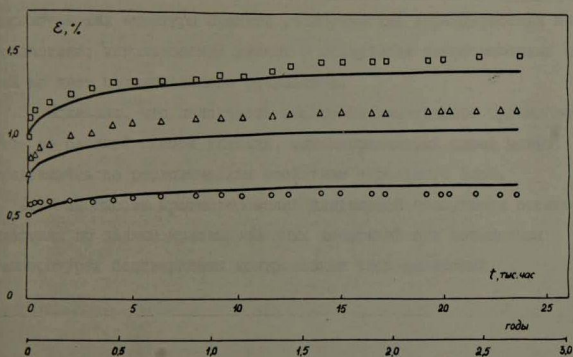


Рис. 2.16. Кривые длительной ползучести органоэластика при разных напряжениях  $\sigma_0$ : 300 МПа (○), 450 (Δ), 600 (□); линии – прогноз; точки – длительный контрольный опыт.

На основании проведенного анализа можно сделать вывод о том, что в исследованном диапазоне температур для прогнозирования температур длительной ползучести одноподнаправленного органоэластика можно использовать результаты температурных экспресс-испытаний.

Выводы по главе II.

1. На основании длительных (свыше 3 лет) испытаний однонаправленно армированного органопластика на ползучесть при растяжении в направлении армирования обнаружена повышенная по сравнению со стекло-, угле- и боропластками зависимость деформационных свойств от времени.

2. Установлено, что ползучесть однонаправленного органопластика можно определить по свойствам компонентов, если в качестве характеристик арматуры принять реологические характеристики микропластика; использование данных о ползучести непросмоленных нитей не дает положительного результата.

3. Показано, что ползучесть слоистого намоточного органопластика со сложной схемой укладки, однонаправленных слоев можно предсказать по реологическим свойствам отдельного слоя.

4. Возможности прогнозирования длительной ползучести органопластика по данным кратковременных испытаний при повышенных температурах подтверждены контрольными экспериментами.



## Г Л А В А III

ПРОЧНОСТЬ ОРГАНОПЛАСТИКА ПРИ КРАТКОВРЕМЕННОМ  
НАГРУЖЕНИИ

В современных теориях прочности композитов условно можно выделить два направления: феноменологическое и структурное. Структурный подход, связывающий прочностные характеристики композита со свойствами его компонент, в данной работе не рассматривается. Согласно феноменологическому подходу исследуемый материал полагается квазиоднородным и анизотропным. Для описания напряженно-деформационного состояния используется аппарат механики анизотропного твердого тела. Условие прочности интерпретируется в виде замкнутой поверхности в пространстве напряжений. Феноменологический подход при сложном напряженном состоянии развит в работах Ашкенази /8,9/, Бу /19/, Гольденבלата и Копнова /22,23/, Захарова /36/, Малмейстера /58/ и других. Известно, что подобное описание прочности, при котором композит рассматривается как однородный материал, не объясняет механизмов разрушения и не учитывает его конкретный вид. Однако, как отмечается в /109/, "несмотря на эти недостатки, в частности невозможность исчерпывающего понимания свойств композита, на сегодняшний день проектирование и анализ практически всех конструкций из этих материалов осуществляется с позиций представления слоя как однородного, анизотропного материала".

В данной работе аппроксимация экспериментальных поверхностей прочности органопластиков при плоском напряженном состоянии выполнена на основе условия прочности, предложенного в работах А.К.Малмейстера /57,58/. Параметры, входящие в условие прочности, рассчитывались на основе метода наименьших квадратов по алгорит-

му /72/. Опытные значения прочности получены из испытаний по характерным путям нагружения в режиме  $\dot{\sigma}$ -const. /57/. Поскольку важное значение имеет не только правильный выбор путей нагружения, но и соблюдение определенных требований к технике испытаний, то третья глава начинается с изложения методики испытаний органопластиков. Затем рассмотрены особенности кратковременной прочности органопластиков в условиях плоского напряженного состояния при комнатной (п.3.2) и повышенных температурах (п.3.3). В заключении главы III феноменологический подход использован для описания опытных поверхностей прочности гибридного композита - органостеклотекстолита.

### 3.1. Технические средства и методика проведения испытаний.

Основной объем экспериментальных работ выполнен на следующих материалах :

- однонаправленном органопластике армированном нитями из высокопрочного органического волокна;
- органотекстолите на основе ткани сатинового плетения из нитей того же типа;
- органостеклотекстолите с различным относительным содержанием слоев органо- и стеклоткани.

Во всех случаях использовался один и тот вид эпоксидного связующего - ЭДТ-10. Содержание связующего в текстолитах по объему составляло 0,35, а в однонаправленном пластике 0,35 и 0,51. Исследуемый материал поставлялся в виде плит. Резка плит осуществлялась алмазно-шлифовальным диском А16 160х1, 2х32х5 при скорости вращения 2900 об/мин. Дальнейшая обработка заготовок из однонаправленного органопластика производилась на плоско-шлифоваль-

ном станке электрокорундовым кругом Э9А СМІКІ 40 250x25x76. при скорости вращения круга 2800 об/мин. Шлифование производилось только перпендикулярно направлению армирования, так как при продольном шлифовании необходимой чистоты поверхности получить не удалось. Обработка заготовок образцов из органотекстолита производилась на фрезерном станке цилиндрической фрезой диаметром 110 мм при скорости вращения 50 об/мин с подачей 13 мм/мин. При механической обработке органоластика обязательным является охлаждение инструмента эмульсионной жидкостью. Как при резке заготовок, так и при обработке образцов со стороны выхода круга или фрезы к образцу должна плотно прижиматься полоска органического стекла, которая предохраняет кромку образца от "размочаливания" армирующих нитей. Такая технология позволяет получать образцы с достаточной чистотой поверхности при отклонении поперечных размеров от заданных не более  $\pm 0,02$  мм. После изготовления образцы выдерживались несколько суток в общей полиэтиленовой упаковке. с целью кондиционирования всей партии.

Программа экспериментального изучения органоластиков в условиях кратковременного и длительного нагружения предусматривала проведение испытаний при растяжении, сжатии, сдвиге и различных сочетаниях этих видов нагрузок, в режимах  $\dot{\epsilon}$ -const и  $\sigma$ -const. В случае  $\dot{\epsilon}$ -const для органотекстолита реализовано II путей нагружения в пространстве напряжений  $\sigma_{11}$ ,  $\sigma_{22}$ ,  $\sigma_{12}$ ; для однонаправленного органоластика восемь. Ввиду того, что некоторые виды испытаний предполагалось проводить при повышенных температурах, возникла задача разработки температурного обеспечения опытов.

При выборе формы и размеров образцов учитывались рекомендации изложенные в /34,99/, а также проводились предварительные

испытания с целью оценки влияния размеров образцов на значения прочности. В основном опыты проведены на плоских образцах, а часть испытаний органотекстолита на тонкостенных трубчатых образцах. Форма и размеры плоских образцов для испытаний на растяжение показаны на рис. 3.1а-г; на рис. 3.1а,б образцы для испытаний однонаправленного органопластика: рис. 3.1а - в направлении армирования; рис. 3.1б - в трансверсальном направлении; на рис. 3.1в,г - образцы из органотекстолита; рис. 3.1в - в направлении утка или основы армирующей ткани; рис. 3.1г - под углом  $45^\circ$  к утку.

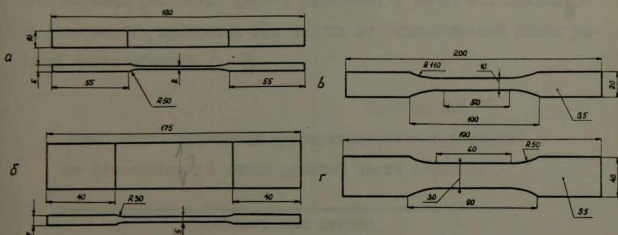


Рис. 3.1. Образцы органопластика для испытаний на растяжение.

Такая форма образцов позволяет получать высокие, воспроизводимые значения прочности материала; разрушение при этом происходит в расчетном сечении рабочей части образца (рис. 3.2).

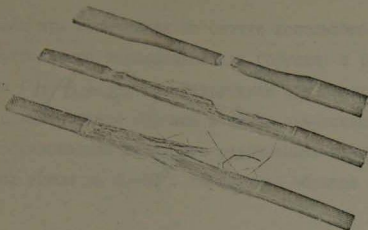


Рис. 3.2. Вид разрушения органоластика при растяжении в направлении армирования.

При проведении предварительных испытаний на сжатие опробовались образцы различных форм и размеров. В табл. 3.1 приводится зависимость прочности при сжатии от относительной длины рабочей части образца  $h/b$ .

Таблица 3.1

Зависимость прочности органотекстолита при сжатии от относительной длины рабочей части образца.

| Прочность при сжатии |                                    |            |                                    |
|----------------------|------------------------------------|------------|------------------------------------|
| вдоль основы         |                                    | вдоль утка |                                    |
| $h/b$                | $\sigma \cdot 10^{-2}, \text{МПа}$ | $h/b$      | $\sigma \cdot 10^{-2}, \text{МПа}$ |
| 1,4                  | 2,1                                | 1,4        | 1,9                                |
| 1,8                  | 2,0                                | 2,0        | 2,0                                |
| 2,3                  | 2,0                                | 2,3        | 2,0                                |
| 2,9                  | 1,5                                | 2,9        | 1,6                                |

$h$  - длина рабочей части;  $b$  - толщина образца.

В дальнейшем при испытаниях на сжатие использовались образцы в виде прямоугольного параллелепипеда (бруска) с размерами  $52 \times 10 \times 5$  мм ( $h/b \approx 2,2$ ). Разрушение при сжатии обычно происходило в средней части образца и имело отчетливый сдвиговой характер с образованием плоскости разрушения, наклоненной к осям образца под углом  $\approx 40-50^\circ$ . Разделения образца на части не наблюдалось.

Прочность органопластика при сдвиге определяли методом "сдвига" между рельсами /158/. Ранее этот метод применялся при изучении зависимости сдвиговой прочности стеклопластика от схемы армирования /106/. Размеры образцов для испытаний на сдвиг в плоскости армирования показаны на рис.3.3.

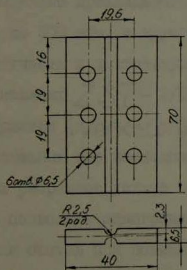


Рис.3.3. Образцы для испытаний на сдвиг.

Для некоторых путей нагружения прочность органотекстолита определялась на трубчатых образцах длиной 250 мм, наружным диаметром 36 мм, толщиной стенки 1,5 мм (рис.3.4). Направление утка армирующей ткани совпадало с продольной осью образца; основа ткани ориентировалась в тангенциальном направлении. Трубо-

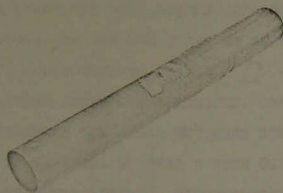


Рис. 3.4. Трубочатый образец из органотекстолита.

чатые образцы испытывались на универсальной гидравлической машине *ZDM -30* (производство народного предприятия *Werkstoffprüfmashinen*, Лейпциг, ГДР). Машина позволяет одновременно или раздельно прикладывать осевую нагрузку до 30 тс, внутреннее давление до 300 атм. и крутящий момент до 200 кгм.

Испытания на ползучесть и длительную прочность органопластиков проводились на машинах *ZST-2/3* и *ZST-3/3* (производство народного предприятия *Werkstoffprüfmashinen*, Лейпциг, ГДР), предназначенных для исследования ползучести металлов и обеспечивающих разрывное усилие соответственно до 2 тс и 3 тс. Каждая машина позволяет одновременно испытывать три образца. Для проведения опытов при повышенных температурах машины дооборудовались термокамерами и аппаратурой необходимой для поддержания заданного температурного режима.

Кратковременные испытания плоских образцов органопластика в режиме  $\dot{\epsilon} = \text{const}$  проведены на универсальной гидравлической машине *ZD -40* (производство народного предприятия *Werkstoffprüfmashin.* Лейпциг, ГДР). Машина обеспечивает разрывное усилие до 40 тс; минимальный масштаб торсионного силоизмерителя 0+4 тс с ценой деления 40 кгс. Крепление образ-

лов производилось с помощью специальных приспособлений. Вначале рассмотрим приспособление для испытаний на растяжение, затем - на сжатие и сдвиг. Испытательная машина  $ZD-40$  снабжена штатными самозатягивающимися клиновыми захватами, однако наличие грубой насечки на вкладышах при росте нагрузки приводило к выскальзыванию образцов из захвата. В связи с этим были разработаны и изготовлены промежуточные захваты, схематически изображенные на рис.3.5.

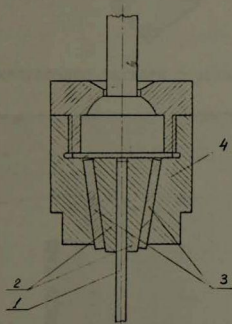


Рис.3.5. Промежуточный захват: 1 - образец;  
2 - клинья; 3 - вкладыши; 4 - корпус.

В дальнейшем для снижения трения между клиньями 2 и корпусом захвата 4 вкладыши 3 были заменены роликовыми обоймами (рис.3.6). Для испытаний на сжатие было изготовлено специальное приспособление, обеспечивающее необходимую устойчивость и ориентацию образца. Приспособление во время эксперимента показано на рис.3.7.



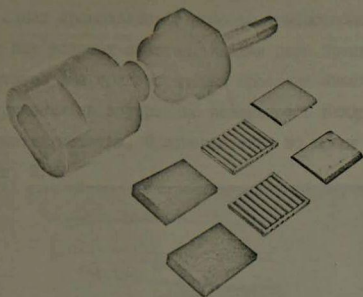


Рис. 3.6. Промежуточные захваты с роликовыми обоймами.

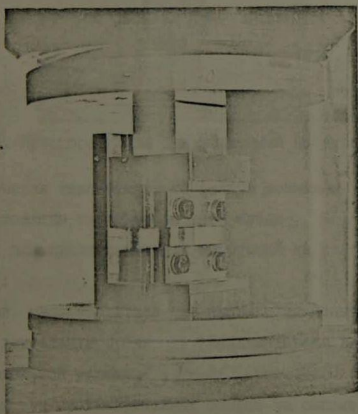


Рис. 3.7. Приспособление для испытаний на сжатие.

Опыты на сдвиг проводились с помощью приспособления, состоящего из двух пар упорных пластин. Каждая пара крепится к образцу тремя болтами. Для предотвращения проскальзывания образца во время нагружения на внутреннюю поверхность каждой пластины нанесена сетчатая накатка. Приспособление во время опыта изображено на рис. 3.8.

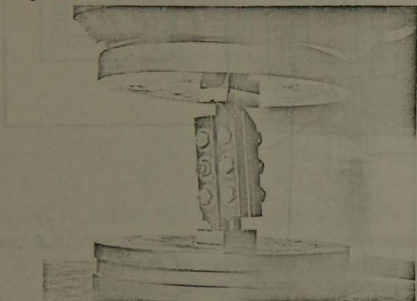


Рис. 3.8. Приспособление для испытаний на сдвиг.

Для обеспечения температурного режима испытаний были разработаны и изготовлены термокамеры трех типов :

- 1) разъемная, для кратковременных испытаний на растяжение (рис. 3.9);
- 2) неразъемная, малогабаритная для проведения испытаний на ползучесть и длительную прочность. Предназначена для использования на испытательной машине *ZST-3/3* (рис. 3.10);
- 3) термокамера для кратковременных опытов на сжатие и сдвиг (рис. 3.11). Эта камера использовалась совместно с испытательной машиной *ZD - 40*.

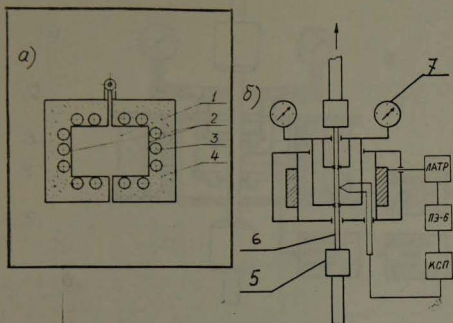


Рис. 3.9. Схема разъемной термокамеры для кратковременных испытаний на растяжение : а-поперечный разрез; 1-рабочий объем, 2-экран, 3-нагревательные элементы типа I ПЭВ-10-510, 4-термоизоляционный наполнитель; б-продольный разрез; 5-захват, 6-образец, 7-измеритель деформаций.

Все камеры съемные и позволяют поддерживать постоянную температуру в диапазоне  $20 \pm 150^\circ\text{C}$ . Термокамеры типа 1 и 2 обеспечивают однородное температурное поле только на рабочей базе образца. Захваты, измерители деформаций, хвостовики образцов находятся вне камеры. Конструкция камер такова, что разброс температуры на концах измеряемой базы образца не превышает 3 % от заданного уровня температуры. Для испытаний сравнительно небольших образцов на сжатие и сдвиг принцип нагрева только рабочей части образца неприемлем, поэтому камера типа 3 имеет большие размеры (560x399x370 мм), позволяющие разместить внутри образец,

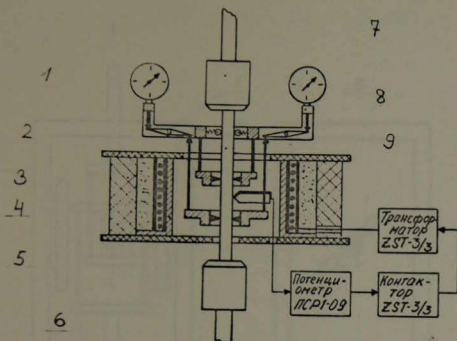


Рис. 3.10. Продольный разрез термокамеры для испытаний на ползучесть. 1—съемные крышки, 2—асбоцементный корпус, 3—теплоизолирующий наполнитель, 4—асбест, 5—нагревательный элемент, 6—экран, 7—захват, 8—измеритель деформаций, 9—образец.

реверсор и необходимые приспособления. Контроль и управление температурой при испытаниях проводимых на машине *ZD-40* осуществлялись с помощью термопары хромель-алюмель, потенциометра КСП-4, реле ПЭ-6 и трансформатора ЛАТР. Блоксхема установки показана на рис. 3.9б. При испытаниях на ползучесть и длительную прочность применялись штатные блоки машины *ZST-3/3*, обеспечивающие точность поддержания температуры в пределах  $\pm 1-2^{\circ}\text{C}$  (рис. 3.10).

Кратковременные испытания на растяжение и сжатие при комнатной температуре проводились с измерением продольных и поперечных (по ширине и толщине образцов) деформаций. При повышенных температурах измерялась лишь продольная деформация.

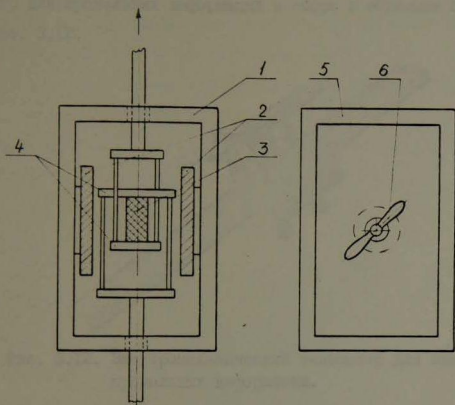


Рис. 3.II. Схема термокамеры для испытаний на сжатие и сдвиг : 1-корпус термокамеры, 2-нагревательные элементы, 3-образец, 4-реверсор, 5-крышка, 6-вентилятор.

Для тензометрии использовались тензодатчики типа ТФ с базой 3 и 5 мм и линейностью деформирования свыше 5 %. Датчики приклеивались к образцу кремнитроглифталевым клеем холодного отверждения I92-Т. С помощью I2 канальной тензостанции ТУП-I2-65 тензодатчики подключались для регистрации к самопишущим потенциометрам КСП-4. Для регистрации сигналов тензодатчиков также использовался цифровой тензомост ЦТМ-3. Кроме тензодатчиков для измерения продольных и поперечных деформаций применялись съемные электромеханические тензометры. Описанный в /18/ тен-

зометр для продольных деформаций в сборе с образцом показан на рис. 3.12.

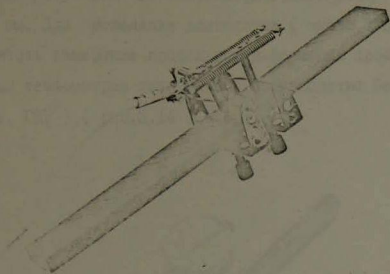


Рис. 3.12. Электромеханический тензометр для измерения продольных деформаций.

Этот тензометр позволяет измерять деформацию в пределах от 0 до 4 % на базе от 5 до 65 мм. Для измерения поперечных деформаций использовался тензометр изображенный на рис. 3.13.

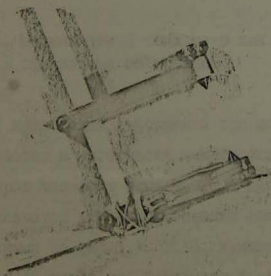


Рис. 3.13. Электромеханический тензометр для измерения поперечных деформаций.

Тарировка электромеханических тензометров производилась на специальном устройстве по микрометрическому винту с ценой деления 0,01 мм. При проведении длительных ( около 3 лет ) опытов на ползучесть измерение продольных деформаций производилось механическим тензометром типа МК-3 ( производство Бернхард Холлис, Магдебург, ГДР ) ( рис.3.14 ).

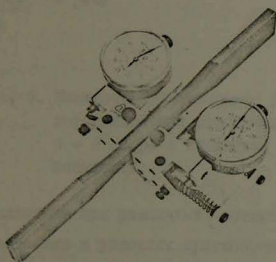


Рис.3.14. Механический тензометр для измерения продольных деформаций.

Для регистрации продольных деформаций при повышенных температурах был разработан и изготовлен механический тензометр на основе индикаторов часового типа Ч4-10 с ценой деления 0,01мм. Тензометр предназначен для использования совместно с термокамерами, показанными на рис.3.9, 3.10. Измерительная база может варьироваться от 10 до 55 мм. Тензометр в сборе с образцом изображен на рис.3.15а, а на рис.3.15б он показан вместе с термокамерой в момент испытаний.

Разработанный комплекс приспособлений позволил провести ис-

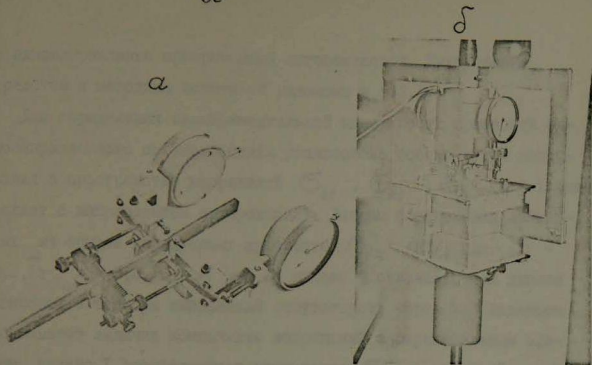


Рис. 3.15а, б. Механический тензометр для измерения деформаций при повышенных температурах: а - в сборе с образцом; б - в момент испытаний.

пытания органопластика при различных частных случаях плоского напряженного состояния в условиях кратковременного и длительного нагружения в температурном диапазоне 20–150°С.

### 3.2. Прочность органопластика при комнатной температуре.

Исследование кратковременной прочности органопластиков в комнатных условиях проведено в следующей последовательности : экспериментально определена прочность материала при различных путях простого, квазистатического нагружения, на основе выбранного критерия прочности описана опытная поверхность прочности и, наконец, получена оценка анизотропии прочности материала при разных видах напряженного состояния. Объектами исследования служили два вида органопластика с разными схемами армирования : органотекстолит на основе ткани сатинового плетения



и однонаправленно армированный органопластик. Технические средства и методика испытаний изложены в п.3.1.

Для определения экспериментальной поверхности прочности однонаправленного органопластика реализовано восемь путей нагружения в пространстве напряжений  $\sigma_{11}$ ,  $\sigma_{22}$ ,  $\sigma_{12}$  (ось I совпадает с направлением армирования). Введем обозначения найденных из опытов характерных прочностей  $r_{ijk}$  /57/, где  $i = 0, \bar{1}, \bar{1}$ ;  $j = 0, 2, \bar{2}$ ;  $k = 0, 6$ ; индекс 0 означает, что данная компонента тензора напряжений отсутствует; черта над индексом показывает наличие компоненты напряжений с отрицательным знаком, индекс 1 соответствует компоненте  $\sigma_{11}$ ; индекс 2 - компоненте  $\sigma_{22}$  и индекс 6 -  $\sigma_{12}$ . Из испытаний получены следующие характерные прочности: растяжение вдоль волокон  $r_{100}$ , растяжение в трансверсальном направлении  $r_{020}$ , сжатие вдоль волокон  $r_{\bar{1}00}$ , сжатие в трансверсальном направлении  $r_{\bar{1}0\bar{2}0}$ , продольный сдвиг в плоскости осей симметрии  $r_{006}$ , одновременное растяжение в трансверсальном направлении и сжатие вдоль волокон  $r_{\bar{1}20}$ , одномерное растяжение и сжатие под углом  $45^\circ$  к осям материала - соответственно  $r_{126}$  и  $r_{\bar{1}\bar{2}6}$ . Кроме определения указанных характерных прочностей проводили дополнительные испытания на растяжение и сжатие под разными углами  $\varphi$  к направлению армирования:  $\varphi = 15^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 75^\circ$ . Результаты этих испытаний являлись контрольными и использовались при анализе анизотропии прочности материала.

Для органотекстолита всего реализовано 11 путей простого квазистатического нагружения в пространстве напряжений  $\sigma_{11}$ ,  $\sigma_{22}$ ,  $\sigma_{12}$  (ось I совпадает с направлением утка; ось 2 - с направлением основы армирующей ткани; ось 3 перпендикулярна плоскости армирования). Получены следующие характерные прочнос-

ти материала  $r_{ijk}$  : растяжение в направлении утка  $r_{100}$  и основы ткани  $r_{020}$  , сжатие вдоль утка  $r_{\bar{1}00}$  и основы  $r_{0\bar{2}0}$  , растяжение  $r_{126}$  и сжатие  $r_{\bar{1}\bar{2}6}$  под углом  $45^\circ$  к осям материала в плоскости армирования, сдвиг по перпендикулярным к плоскости армирования плоскостям симметрии материала  $r_{006}$  и сдвиг по диагональным площадкам: положительный  $r_{1\bar{2}0}$  и отрицательный  $r_{\bar{1}20}$  . Также проведены испытания трубчатых образцов органотекстолита на двухосное растяжение при двух значениях отношения  $\sigma_{11}/\sigma_{22}$  : 1/1 и 2/1. Идентичность прочностных свойств материала в плоских и трубчатых образцах подтверждена испытаниями на растяжение вдоль основы и утка ткани на обоих видах образцов. Полученные из опытов значения прочностей исследованных материалов приводятся в табл.3.2. Там же показаны среднеквадратические отклонения, определенные по результатам испытаний 3-7 образцов.

Таблица 3.2

Прочность органопластиков при комнатной температуре в условиях кратковременного нагружения в режиме

$$\dot{\sigma} = const \approx 80 \text{ МПа/мин.}$$

| № п/п | Характерная прочность $r_{ijk}$ | Прочность материала, МПа       |                 |
|-------|---------------------------------|--------------------------------|-----------------|
|       |                                 | однонаправленный органопластик | органотекстолит |
| 1     | 2                               | 3                              | 4               |
| 1     | $r_{100}$                       | $150 \pm 13$                   | $677 \pm 30$    |
| 2     | $r_{020}$                       | $15 \pm 1$                     | $404 \pm 18$    |
| 3     | $r_{\bar{1}00}$                 | $306 \pm 20$                   | $207 \pm 9$     |
| 4     | $r_{0\bar{2}0}$                 | $91 \pm 8$                     | $207 \pm 10$    |

Продолжение таблицы 3.2

| 1 | 2                     | 3           | 4            |
|---|-----------------------|-------------|--------------|
| 5 | $r_{006}$             | $37 \pm 4$  | $164 \pm 7$  |
| 6 | $r_{120}^{\bar{120}}$ | —           | $230 \pm 10$ |
| 7 | $r_{120}^{\bar{120}}$ | $25 \pm 2$  | $187 \pm 9$  |
| 8 | $r_{126}^{\bar{126}}$ | $29 \pm 3$  | $415 \pm 19$ |
| 9 | $r_{126}^{\bar{126}}$ | $102 \pm 9$ | $201 \pm 9$  |

Отметим некоторые особенности прочностных свойств однонаправленного органопластика, которые необходимо учитывать при выборе критерия прочности. Прежде всего обращает внимание тот факт, что в направлении армирования прочность на сжатие  $r_{100}^{\bar{100}}$  существенно меньше прочности на растяжение  $r_{100}$ ; отношение  $r_{100}^{\bar{100}} / r_{100}$  составляет всего 0,2; в то время как для однонаправленно армированных боро-, угле- и стеклопластиков по данным работ /20,29, 102,103,III/ это отношение существенно больше и изменяется в пределах 0,5+1,4. Таким образом критерии прочности, такие, как критерий Мизеса - Хилла /110/, Фишера /134/ и другие, в которых прочность анизотропного материала на растяжение и сжатие принимается одинаковой в данном случае не могут быть использованы.

Кроме того, анализ опытных данных в первом и третьем октантах пространства напряжений  $\sigma_{11}$ ,  $\sigma_{22}$ ,  $\sigma_{12}$  показал, что имеет место существенное взаимное влияние нормальных и касательных напряжений. Так, в первом октанте при сдвиговом разрушении предельные касательные напряжения в плоскости разрушения при одновременном воздействии растягивающих нормальных напряжений оказываются меньше значений  $r_{006}$ . Подобное взаимовлияние еще более четко обнаруживается в третьем октанте, где воздействие сжимающих нормальных напряжений в плоскости сдвигового разрушения приводит к существенному увеличению предельных

касательных напряжений по сравнению с  $\rho_{006}$ ; максимальное увеличение из полученных опытных данных составляло 1,5 раза. Таким образом для однонаправленного органопластика, строго говоря, не соблюдается также критерий максимального напряжения.

Учесть эти эффекты позволяет предложенная А.К.Малмейстером в работе /58/ общая тензорно-полиномиальная формулировка критерия прочности, согласно которой уравнение поверхности прочности в шестимерном пространстве напряжений представляется в следующем виде :

$$f(\sigma_{ij}) = \rho_{ij} \sigma_{ij} + \rho_{ijkl} \cdot \sigma_{ij} \sigma_{kl} + \rho_{ijklmn} \cdot \sigma_{ij} \sigma_{kl} \sigma_{mn} + \dots = 1 \quad (3.1)$$

где  $i, j, \dots = 1, 2, 3$ ;  $\rho_{ij}$ ,  $\rho_{ijkl}$  - тензоры поверхности прочности второго, четвертого и более высоких рангов. В уравнении (3.1) количество независимых коэффициентов соответствует количеству членов уравнения разных степеней и для случая объемного напряженного состояния будет /57/ : для первого члена 6, двух первых 27, трех первых 83, четырех первых 209.

Можно привести ряд работ /11, 19, 83, 100, 106, 107/, в которых показано вполне удовлетворительное описание опытных поверхностей прочности композитных материалов уравнением (3.1) при сохранении только первых двух членов. В этом случае для ортотропного тела уравнение (3.1) в пространстве напряжений  $\sigma_{11}$ ,  $\sigma_{22}$ ,

$\sigma_{12}$  можно представить в следующей форме :

$$\rho_{11} \cdot \sigma_{11} + \rho_{22} \cdot \sigma_{22} + \rho_{1111} \cdot \sigma_{11}^2 + \rho_{2222} \cdot \sigma_{22}^2 + 2\rho_{1122} \cdot \sigma_{11} \sigma_{22} + 4\rho_{1212} \cdot \sigma_{12}^2 = 1 \quad (3.2)$$

Следуя изложенным в /97/ рекомендациям, определение компонент тензоров  $\rho$  проведено с использованием экспериментальных точек, число которых было существенно больше числа неизвестных в уравнении (3.2). Расчет выполнен на ЭЦМ ЕС-1030 по алгорит-

му /72/\*, согласно которому компоненты  $\rho$  находились минимизацией по методу наименьших квадратов вектора невязки системы линейных уравнений, полученной подстановкой совокупности опытных данных в уравнение (3.2). Найденные значения компонент тензоров  $\rho$  представлены в табл. 3.3.

Таблица 3.3

Компоненты тензоров поверхности прочности  
органопластиков.

| Материал                                 | Число<br>опыт-<br>ных<br>точек | $\rho$ компоненты      |                        |                          |                          |                          |                          | $S_R$ | $S_{\text{восп}}$ |
|--|--------------------------------|------------------------|------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|-------|-------------------|
|  |                                | $\rho_{11} \cdot 10^3$ | $\rho_{22} \cdot 10^3$ | $\rho_{1111} \cdot 10^6$ | $\rho_{2222} \cdot 10^6$ | $\rho_{1122} \cdot 10^6$ | $\rho_{1212} \cdot 10^6$ |       |                   |
|  |                                | МПа <sup>-1</sup>      |                        |                          | МПа <sup>-2</sup>        |                          |                          | %     | %                 |
| Однонаправ-<br>ленный ор-<br>ганопластик | 44                             | -2,57                  | 33,29                  | 2,09                     | 488,31                   | -1,32                    | 180,91                   | 19,10 | 11,0              |
| Органотек-<br>столит                     | 45                             | -3,26                  | -2,29                  | 6,95                     | 11,70                    | -2,18                    | 8,96                     | 4,90  | 4,4               |

Погрешность аппроксимации оценивалась средней относительной квадратической ошибкой по радиусвектору точек поверхности прочности :

$$S_R = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \left( \frac{R_{i\rho} - R_{i\varepsilon}}{R_{i\varepsilon}} \right)^2} \cdot 100, \% \quad (3.3)$$

где  $R_{i\rho}$  и  $R_{i\varepsilon}$  - соответственно расчетные и экспериментальные значения радиусвектора  $i$ -ой точки поверхности прочности;  $M$  - число опытных точек. Значения  $S_R$  приводятся в табл. 3.3, там же показаны среднеквадратические ошибки воспроизводимости опытных данных  $S_{\text{восп}}$  и число полученных из испытаний опытных точек прочности. Из сравнения  $S_R$  и  $S_{\text{восп}}$

\* Здесь и в дальнейшем расчеты с использованием алгоритма /72/ выполнены Э.З.Плуме.

следует, что уравнение второго порядка в целом удовлетворительно описывает поверхности прочности исследованных материалов.

На рис. 3.16 показаны горизонтальные сечения поверхностей прочности в плоскости  $\sigma_{11}$ ,  $\sigma_{22}$  ( $\sigma_{12} = 0$ ). Вертикальные сечения на которых расположены остальные экспериментальные точки, здесь не приводятся.

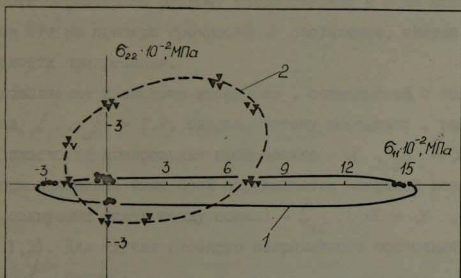


Рис. 3.16. Горизонтальное сечение ( $\sigma_{12} = 0$ ) поверхности прочности однонаправленно армированного органо-пластика (1) и органотекстолита (2); точки - эксперимент, линии - расчет по (3.2).

Из рис. 3.16 видно, что главные направления прочности исследованных материалов значительно различаются между собой и с осями симметрии прочностных свойств материалов не совпадают. Центры главных осей эллипсов прочности несколько смещены вправо, что иллюстрирует относительно слабое сопротивление органо-пластиков действию сжимающих нагрузок. Переход от однонаправленной схемы армирования к ортогональной приводит к некоторому снижению прочности на растяжение в направлении армирования (примерно в 2 раза) и значительному возрастанию прочности при растяже-

нии под углом к осям симметрии материала (для  $\varphi > 5^\circ$ ). Так, например, прочность в направлении оси 2 ( $\varphi = 90^\circ$ ) возрастает более чем в 26 раз по сравнению с соответствующей прочностью однонаправленного материала.

Располагая значениями компонент тензоров поверхности прочности, из (3.2) можно найти уравнения описывающие изменение прочности образцов по разному расположенных к осям материала. Покажем это на примере прочности на растяжение, сжатие и сдвиг в плоскости армирования.

В дополнение к системе координат, совмещенной с осями материала  $i, j = 1, 2$ , введем систему координат, расположенную в плоскости армирования произвольно —  $\alpha, \beta = X, Y$ . Взаиморасположение этих осей определяется матрицей коэффициентов (косинусами углов между осями) —  $l_{\alpha i}$  ( $\alpha = X, Y; i = 1, 2$ ). Для случая плоского напряженного состояния коэффициенты  $l$  равны:

$$l_{x1} = \cos \varphi; l_{y1} = -\sin \varphi; l_{x2} = \sin \varphi; l_{y2} = \cos \varphi, \quad (3.4)$$

где  $\varphi$  — угол между осями 1 и X (рис. 3.17).

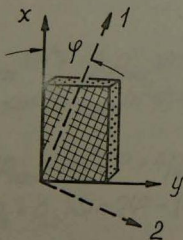


Рис. 3.17. Направление осей основной и произвольной систем координат.

При повороте осей координат компоненты тензоров  $\rho$  преобразуются следующим образом :

$$\rho_{\alpha\beta} = \rho_{ij} \cdot l_{\alpha i} \cdot l_{\beta j}; \quad (3.5)$$

$$\rho_{\alpha\beta\gamma\delta} = \rho_{ijkl} \cdot l_{\alpha i} \cdot l_{\beta j} \cdot l_{\gamma k} \cdot l_{\delta l}.$$

Тогда уравнение поверхности прочности с учетом (3.2) и (3.5) можно представить в виде :

$$\rho_{ij} \sigma_{\alpha\beta} l_{\alpha i} l_{\beta j} + \rho_{ijkl} \sigma_{\alpha\beta} \sigma_{\gamma\delta} l_{\alpha i} l_{\beta j} l_{\gamma k} l_{\delta l} = 1. \quad (3.6)$$

Рассмотрим случай одномерного растяжения при  $\sigma_{\alpha\beta} = \sigma_{xx}$  ; предельное напряжение обозначим  $\sigma_{xx}^*$ . Преобразуя выражение (3.6) с учетом (3.4) получаем уравнение второго порядка относительно  $\sigma_{xx}^*$  :

$$\sigma_{xx}^{*2} (\rho_{1111} \cdot \cos^4 \varphi + \rho_{2222} \cdot \sin^4 \varphi + \frac{1}{2} \rho_{1122} \cdot \sin^2 2\varphi + \rho_{1212} \cdot \sin^2 2\varphi) + \sigma_{xx}^* (\rho_{11} \cdot \cos^2 \varphi + \rho_{22} \cdot \sin^2 \varphi) - 1 = 0. \quad (3.7)$$

Поступая аналогично для сжатия и сдвига, получим соответствующие уравнения относительно предельных напряжений при сжатии  $\bar{\sigma}_{xx}^*$  и сдвиге  $\sigma_{xy}^*$  :

$$\bar{\sigma}_{xx}^{*2} (\rho_{1111} \cdot \cos^4 \varphi + \rho_{2222} \cdot \sin^4 \varphi + \frac{1}{2} \rho_{1122} \cdot \sin^2 2\varphi + \rho_{1212} \cdot \sin^2 2\varphi) - \bar{\sigma}_{xx}^* (\rho_{11} \cdot \cos^2 \varphi + \rho_{22} \cdot \sin^2 \varphi) - 1 = 0; \quad (3.8)$$

$$\sigma_{xy}^{*2} [(\rho_{1111} + \rho_{2222} - 2\rho_{1122}) \cdot \sin^2 2\varphi + 4\rho_{1212} \cdot \cos^2 2\varphi] + \sigma_{xy}^* (\rho_{11} + \rho_{22}) \sin 2\varphi - 1 = 0. \quad (3.9)$$

Решение уравнений (3.7)-(3.9) имеет вид :

$$\sigma^*(\varphi) = \frac{-\lambda_2 + \sqrt{\lambda_2^2 + 4\lambda_1}}{2 \cdot \lambda_1}, \quad (3.10)$$



где через  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  обозначены следующие выражения :  
для растяжения

$$\lambda_1 = p_{1111} \cdot \cos^4 \varphi + p_{2222} \cdot \sin^4 \varphi + \frac{1}{2} p_{1122} \cdot \sin^2 2\varphi + p_{1212} \cdot \sin^2 2\varphi; \quad (3.11)$$

$$\lambda_2 = p_{11} \cdot \cos^2 \varphi + p_{22} \cdot \sin^2 \varphi;$$

для сжатия

$$\lambda_1 = p_{1111} \cdot \cos^4 \varphi + p_{2222} \cdot \sin^4 \varphi + \frac{1}{2} p_{1122} \cdot \sin^2 2\varphi + p_{1212} \cdot \sin^2 2\varphi; \quad (3.12)$$

$$\lambda_2 = -p_{11} \cdot \cos^2 \varphi - p_{22} \cdot \sin^2 \varphi;$$

для сдвига

$$\lambda_1 = (p_{1111} + p_{2222} - 2 \cdot p_{1122}) \cdot \sin^2 2\varphi + 4 p_{1212} \cdot \cos^2 2\varphi; \quad (3.13)$$

$$\lambda_2 = (-p_{11} + p_{22}) \cdot \sin 2\varphi.$$

По формуле (3.10) с учетом (3.11)–(3.13) и приведенных в табл.3.3 значений компонент тензоров поверхности прочности определены полярные диаграммы анизотропии прочности органотекстолита для указанных выше видов нагружения. Расчет и построение диаграмм выполнялись на ЭВМ HP-9600. Полученные диаграммы показаны на рис. 3.18, Кривые на рис. 3.18 описывают изменение прочности при растяжении, сжатии и сдвиге в зависимости от направления нагружения в плоскости армирования материала. Для количественной оценки анизотропии прочности органотекстолита определялось отношение минимального радиусвектора прочности к максимальному : для растяжения  $\min R / \max R = 39,3/68,0 = 0,58$ ; для сжатия  $19,3/21,1 = 0,91$ ; для сдвига  $23,4/32,6 = 0,71$ . Из сравнения показателей анизотропии следует, что для органотекстолита характерна существенная зависимость степени анизотропии прочности от вида нагружения : наибольшая анизотропия обнаруживается при растяжении, наименьшая при сжатии, промежуточное значение при сдвиге.

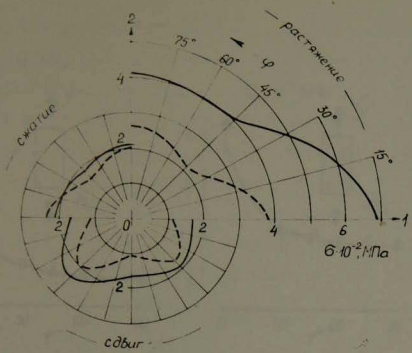


Рис. 3.18. Полярные диаграммы прочности для органотекстолита (—) и стеклотекстолита (- - -) в зависимости от направления нагружения в плоскости армирования при растяжении, сжатии и сдвиге.

Далее рассмотрим анизотропию прочности однонаправленно армированного органопластика. С помощью уравнений (3.7), (3.8) и компонент тензоров поверхности прочности (табл.3.3) предсказана ожидаемая прочность образцов, ориентированных под разными углами к осям симметрии материала. Полученные расчетные кривые анизотропии прочности материала показаны на рис. 3.19. Там же приводятся результаты испытаний (светлые кружки - контрольные данные, так как при расчете компонент тензоров  $\rho$  они не использовались). Среднее квадратическое относительное отклонение расчетных от опытных значений прочности составляет для случая растяжения 21 %, сжатия - 11 %.

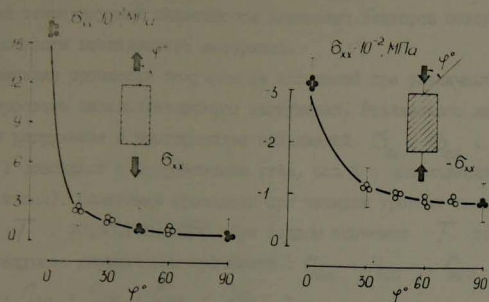


Рис.3.19. Анизотропия прочности однонаправленного органо-пластика при растяжении и сжатии; точки - эксперимент; ( — ) - расчет по ( 3.10 ).

### 3.3. Влияние температуры на прочность органо-пластика при плоском напряженном состоянии.

Прочность композитов на основе полимеров существенно зависит от температуры. С ростом температуры область безопасных напряженных состояний в пространстве напряжений сокращается. При этом степень и характер температурного влияния на прочность зависят от ориентации путей нагружения относительно направлений армирования. При проектировании конструкций, работающих при повышенной температуре, необходимо знать температурную зависимость параметров, определяющих поверхность прочности материала. Для этого экспериментально определена прочность органо-текстолита в условиях плоского напряженного состояния при различных фиксированных температурах, выполнено аналитическое описание полученных

из эксперимента поверхностей прочности и, наконец, проведен анализ температурной зависимости компонент тензоров поверхностей прочности исследуемого материала.

Значения прочности получены из испытаний при различных путях простого квазистатического нагружения. Реализовано девять путей нагружения в пространстве напряжений  $\sigma_{11}$ ,  $\sigma_{22}$ ,  $\sigma_{12}$  (ось 1 совпадает с направлением утка, ось 2 с направлением основы ткани). Испытания проведены при четырех уровнях температуры  $T$ : 20, 50, 100, 150°C. При каждом значении  $T$  получены следующие характерные прочности:  $\sigma_{100}$ ,  $\sigma_{100}^2$ ,  $\sigma_{020}$ ,  $\sigma_{020}^2$ ,  $\sigma_{006}$ ,  $\sigma_{120}$ ,  $\sigma_{120}^2$ ,  $\sigma_{126}$ ,  $\sigma_{126}^2$ .

Предварительный анализ опытных данных показал, что влияние температуры на прочность органостеклолита при разных видах напряженного состояния сказывается по-разному; изменение вида напряженного состояния влияет на характер температурных кривых прочности. Это отчетливо видно из рис. 3.20, где показано несколько температурных кривых прочности органостеклолита, полученных из испытаний при различных путях простого квазистатического нагружения. Для сравнения на рис. 3.21 изображена зависимость прочности однонаправленного органопластика от температуры при растяжении и сжатии в направлении армирования. Полученные из испытаний значения прочности органостеклолита при разных температурах представлены в табл. 3.4. Для каждого вида нагружения и фиксированного уровня температуры испытано не менее 3-5 образцов.

Описание экспериментальных поверхностей прочности при разных температурах проведено уравнением поверхности второго порядка (3.2). Для определения входящих в (3.2) компонент тензоров  $\rho$  использован алгоритм [72]. Расчет проводился на

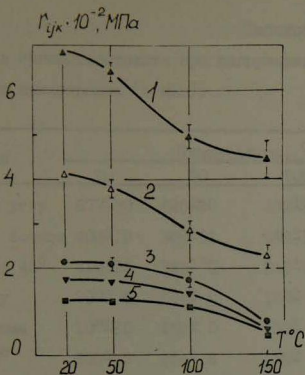


Рис. 3.20. Зависимость прочности органотекстолита при различных путях нагружения в плоскости армирования материала: растяжение вдоль утка (1) и основы (2), сжатие вдоль утка (3), чистый сдвиг по плоскостям симметрии (4), одновременное воздействие по плоскостям симметрии нормальных напряжений разного знака (5).

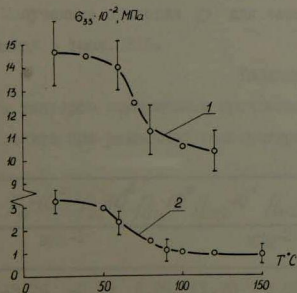


Рис. 3.21. Зависимость прочности однонаправленно армированного органопластика от температуры при растяжении (1) и сжатии (2) в направлении армирования.

Таблица 3.4

Прочность органотекстолита при нагружении в плоскости армирования (в МПа).

| Вид нагружения                   | Температура, °С |        |        |        |
|----------------------------------|-----------------|--------|--------|--------|
|                                  | 20              | 50     | 100    | 150    |
| Растяжение по утку               | 677±30          | 648±20 | 492±23 | 438±35 |
| Растяжение по основе             | 404±18          | 380±12 | 299±14 | 220±18 |
| Растяжение под 45°               | 415±19          | 322±10 | 249±12 | 135±11 |
| Сжатие по утку                   | 207±9           | 194±6  | 157±7  | 72±6   |
| Сжатие по основе                 | 107±10          | 192±6  | 153±7  | 43±4   |
| Сжатие под 45°                   | 201±9           | 194±6  | 178±8  | 61±5   |
| Сдвиг по плоск. симметрии        | 164±7           | 153±5  | 129±6  | 48±4   |
| Сдвиг по диаг. плоск. (полож.)   | 230±11          | 199±6  | 168±8  | 58±5   |
| Сдвиг по диаг. плоск. (отрицат.) | 187±9           | 178±5  | 142±7  | 53±4   |

ЭЦМ ЕС-1030. Полученные значения  $\rho$  для четырех уровней температур приводятся в табл. 3.5.

Таблица 3.5

Компоненты тензоров поверхности прочности органотекстолита при различных температурах.

| $T, ^\circ\text{C}$ | Число опытных точек, | $\rho \cdot 10^3$ |             |               | $\rho \cdot 10^6$ |               |               | $S_{\text{воен}}$ | $S_R$ |
|---------------------|----------------------|-------------------|-------------|---------------|-------------------|---------------|---------------|-------------------|-------|
|                     |                      | $\rho_{11}$       | $\rho_{22}$ | $\rho_{1111}$ | $\rho_{2222}$     | $\rho_{1212}$ | $\rho_{1122}$ |                   |       |
|                     |                      | МПа-1             |             |               | МПа-2             |               |               | %                 | %     |
| 20                  | 45                   | -3,26             | -2,29       | 6,95          | 11,70             | 8,96          | -2,18         | 4,4               | 4,9   |
| 50                  | 22                   | -3,33             | -2,66       | 7,66          | 14,28             | 9,38          | -2,48         | 2,8               | 4,8   |
| 100                 | 29                   | -3,92             | -2,82       | 11,99         | 20,55             | 13,87         | -4,78         | 4,6               | 7,6   |
| 150                 | 18                   | -11,57            | -15,07      | 31,56         | 91,55             | 89,47         | -6,33         | 8,1               | 29,5  |

Погрешность аппроксимации  $S_R$  оценивалась по формуле (3.3). Значения  $S_R$ , а также относительные среднеквадратические ошибки воспроизводимости опытных точек  $S_{\text{восн}}$  приводятся в табл. 3.5. Из сравнения  $S_R$  и  $S_{\text{восн}}$  видно, что с увеличением температуры ошибки описания несколько увеличиваются; однако с допустимым приближением можно считать, что уравнение второго порядка (3.2) в целом удовлетворительно описывает поверхности прочности органотекстолита в исследованном диапазоне температур.

Полученное при описании семейство поверхностей прочности, каждая из которых соответствует определенной температуре, показано на рис. 3.22.

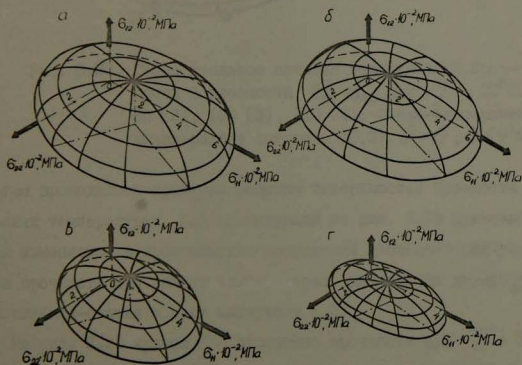


Рис. 3.22. Поверхности прочности органотекстолита при  $T = 20^{\circ}\text{C}$  (а),  $50$  (б),  $100$  (в),  $150$  (г).

Несколько сечений этих поверхностей прочности приводится на рис.3.23 и 3.24, на которых направление радиусвектора прочности характеризуется углами  $\varphi$  и  $\theta$  :  $\varphi$  отсчитывается от оси  $\sigma_{11}$  в плоскости  $\sigma_{11} \sigma_{22}$  ;  $\theta$  - угол к плоскости  $\sigma_{11} \sigma_{22}$  .

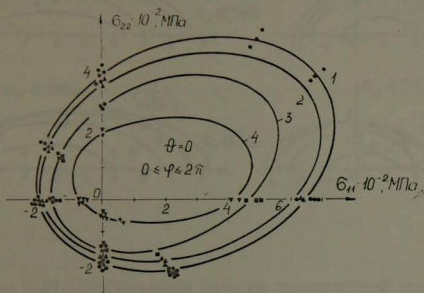


Рис. 3.23. Горизонтальное сечение поверхностей прочности в плоскости  $\sigma_{11} \sigma_{22}$  при  $T = 20^{\circ}\text{C}$  (1),  $50$  (2),  $100$  (3),  $150$  (4); точки-эксперимент; линии-расчет согласно (3.2).  $\theta = 0$  ;  $0 \leq \varphi \leq 2\pi$ .

Затем проводилась проверка подобия поверхностей прочности при разных температурах. Для иллюстрации на рис. 3.25 показано, как изменяется в пространстве напряжений отношение радиусвекторов прочности при разных температурах, для случая двумерного растяжения-сжатия в осях материала 1,2.

На рис. 3.25 кривая 1 - отношение прочности при  $T = 50^{\circ}\text{C}$  к прочности при  $T = 20^{\circ}\text{C}$ , кривая 2 - отношение прочности при температурах 100 и  $20^{\circ}\text{C}$ , кривая 3 - при температурах 150 и  $20^{\circ}\text{C}$ . Видно, что в диапазоне температур 20-100 $^{\circ}\text{C}$  кривые близки к окружности, т.е. поверхности прочности изменяются почти



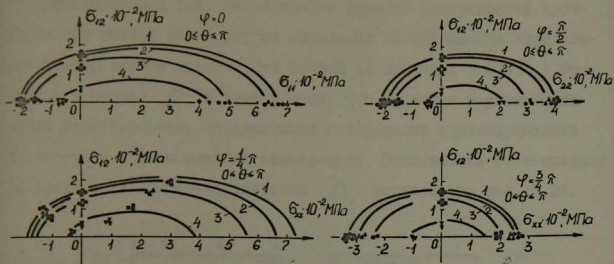


Рис. 3.24. Вертикальные сечения поверхностей прочности при  $T = 20^{\circ}\text{C}$  (1),  $50$  (2),  $100$  (3) и  $150$  (4); точки — эксперимент; линии — расчет согласно (3.2).

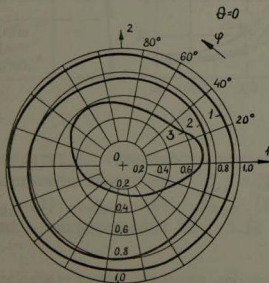


Рис. 3.25. Диаграммы изменения в пространстве напряжений отношений радиусвекторов прочности при разных температурах в плоскости  $\sigma_{11} \sigma_{22} \cdot \theta = 0$ .

подобно. При большей температуре подобие не соблюдается: прочность уменьшается относительно быстрее в третьем квадранте.

Установленный факт несоблюдения подобия поверхностей прочности при разных температурах обусловил необходимость определения температурной зависимости каждой из входящих в ( 3.2 ) компонент тензоров  $\rho$  в отдельности, что приводит к увеличению числа характеристик, определяющих поверхность кратковременной прочности с учетом влияния температуры. Зависимость от температуры всех шести компонент тензоров  $\rho$  показана на рис. 3.26.

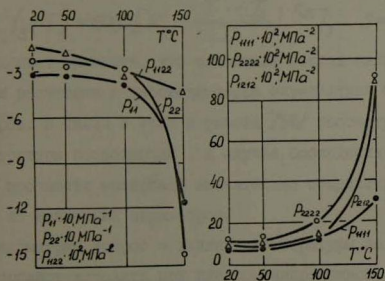


Рис.3.26. Температурная зависимость компонент тензоров поверхности прочности  $\rho_{11}$  (1),  $\rho_{22}$  (2),  $\rho_{1122}$  (3),  $\rho_{1111}$  (4),  $\rho_{1212}$  (5),  $\rho_{2222}$  (6). Линии - аппроксимация по ( 3.14 ).

Линии на рис.3.26 соответствуют описанию соотношением следующего вида:

$$\rho(T) = \rho(T_0) \cdot \exp \left[ k_1 \cdot \left( \frac{T - T_0}{T_0} \right)^{k_2} \right], \quad ( 3.14 )$$

где  $T_0$  принято равным  $20^{\circ}\text{C}$ ;  $K_1$  и  $K_2$  - коэффициенты. Значения входящих в (3.14) коэффициентов определены с использованием алгоритма /43/ и приводятся в табл. 3.6.

Выполненный анализ дает основание представить уравнение кратковременной прочности исследованного материала с учетом влияния температуры в следующем виде :

$$\begin{aligned} & p_{11}^0 \cdot f_1(T) \cdot \sigma_{11} + p_{22}^0 \cdot f_2(T) \cdot \sigma_{22} + p_{111}^0 \cdot f_3(T) \cdot \sigma_{11}^2 + p_{222}^0 \cdot f_4(T) \cdot \sigma_{22}^2 + \\ & + 4p_{1212}^0 \cdot f_5(T) \cdot \sigma_{12}^2 + 2 \cdot p_{1122}^0 \cdot f_6(T) \cdot \sigma_{11} \sigma_{22} = 1, \end{aligned} \quad (3.15)$$

где

$$f_s(T) = \exp \left[ K_{1s} \left( \frac{T - T_0}{T_0} \right)^{K_{2s}} \right], \quad s = 1, \dots, 6.$$

Следует, однако, признать, что описанный подход связан с весьма громоздкими расчетами и необходимостью определения большого числа параметров. В связи с этим в работе /56/ рассмотрен вариант учета температуры позволяющий, в случае соблюдения подобия поверхностей прочности материала значительно сократить число определяемых из испытаний параметров.

Далее рассмотрим вопрос о влиянии температуры на анизотропию прочности органотекстолита при плоском напряженном состоянии. Диаграммы анизотропии прочности при разных значениях температуры можно определить по формулам (3.10)–(3.13) с учетом температурной зависимости компонент тензоров поверхности прочности согласно (3.15). Результаты выполненных на ЭВМ HP-9600 расчетов показаны на рис. 3.27. в виде полярных диаграмм прочности органотекстолита при растяжении, сжатии и сдвиге в плоскости армирования для разных значений температуры в диапазоне  $20-150^{\circ}\text{C}$ . Из рисунков видно, что при одной и той же температуре наибольшая анизотропия наблюдается при растяжении, наименьшая - при сжатии. Кроме того, вполне отчетливо проявляется зависимость

Таблица 3.6

Значения коэффициентов, входящих в уравнение температурной зависимости  
компонент тензоров поверхности прочности

| Коэффициенты          | Компоненты тензоров поверхности прочности |                       |                      |                      |                      |                       |
|-----------------------|---|-----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|
|                       | $P_{11}$                                  | $P_{22}$              | $P_{111}$            | $P_{2222}$           | $P_{1212}$           | $P_{1122}$            |
| $\rho(T_0) = \rho_0$  | $-3,26 \cdot 10^{-1}$                     | $-2,29 \cdot 10^{-1}$ | $6,95 \cdot 10^{-4}$ | $11,7 \cdot 10^{-4}$ | $8,96 \cdot 10^{-4}$ | $-2,18 \cdot 10^{-6}$ |
| $K_1$                 | $7,44 \cdot 10^{-4}$                      | $3,35 \cdot 10^{-4}$  | $2,51 \cdot 10^{-2}$ | $1,18 \cdot 10^{-2}$ | $3,77 \cdot 10^{-3}$ | 0,19                  |
| $K_2$                 | 3,97                                      | 4,60                  | 2,18                 | 2,74                 | 3,42                 | 0,98                  |
| Ошибка<br>описания, % | 0,69                                      | 5,65                  | 1,36                 | 5,93                 | 1,19                 | 8,13                  |

- 116 -

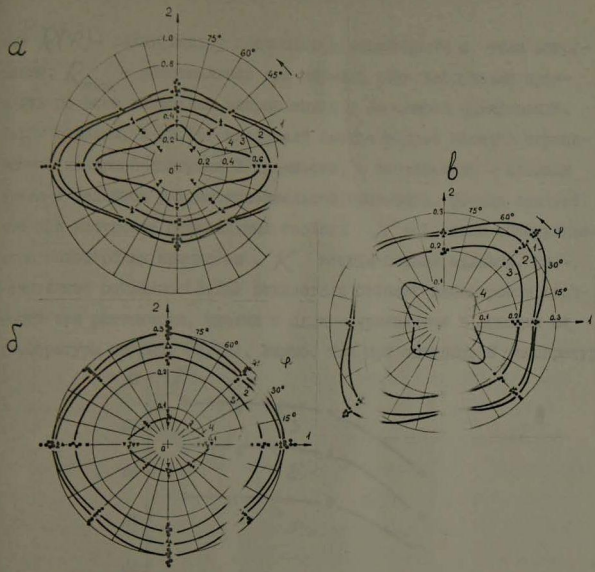


Рис. 3.27. Полярные диаграммы прочности при растяжении (а), сжатии (б) и сдвиге (в) для  $T = 100(3) 150(4)$ . Точки — экспериментальные, линии — расчет по (3.11)–(3.13)

прочности при сдвиге  $\sigma$  направления (3) как касательных напряжений (см. рис. 3.27в). Для оценки влияния температуры на степень анизотропии определяется следующий показатель  $K$  :

$$K = \frac{\frac{1}{2} \int_0^{2\pi} R^2(\varphi) d\varphi}{\pi R_{max}^2} \quad (3.16)$$

где  $R(\varphi)$  - радиусвектор прочности в зависимости от угла нагружения;  $R_{max}$  - максимальная для данного вида нагружения прочность по всем возможным направлениям в плоскости армирования. Таким образом, в (3.16) числитель соответствует площади ограниченной полярной диаграммой прочности, а знаменатель - площади круга с радиусом равным максимальной прочности. Отсюда следует, что при изотропии прочностных свойств  $K = 1$ , если обнаруживается анизотропия прочности,  $K$  всегда меньше единицы. Рассчитанные согласно (3.16) показатели степени анизотропии прочности при растяжении, сжатии и сдвиге приводятся в функции от температуры на рис. (3.28). Видно, что при одинаковой температуре

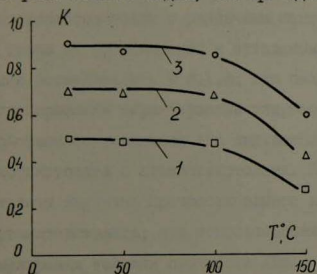


Рис. 3.28. Кривые температурной зависимости степени анизотропии прочности при растяжении (1), сдвиге (2) и сжатии (3),

степень анизотропии существенно зависит от вида нагружения. Изменение температуры в диапазоне 20-100°C не вызывает существенного изменения анизотропии прочности при всех трех видах нагружения; дальнейшее повышение температуры приводит к резкому увеличению степени анизотропии прочности материала.

### 3.4. Прочность органостеклотекстолита в зависимости от относительного содержания органо- и стеклоткани.

Как было показано в п.3.2, для органопластиков характерно низкое сопротивление действию сжимающих нагрузок. Перспективным путем устранения этого недостатка является создание гибридных схем армирования. Сочетая в одной матрице различные армирующие волокна, варьируя их состав, степень наполнения, ориентацию, можно придавать композиту требуемые физико-механические свойства.

Объектами исследования являлись органотекстолит, стеклотекстолит и органостеклотекстолит с различным относительным содержанием слоев ткани из органических и стеклянных нитей. Упругость этих материалов исследовалась в п.1.4, где были показаны возможности прогнозирования характеристик упругости гибридного текстолита по свойствам составляющих его двухкомпонентных текстолитов - органотекстолита и стеклотекстолита. В п.3.2,3.3 приводятся результаты изучения прочности одного из указанных материалов - органотекстолита; при использовании тензорно-полиномиальной формулировки условия прочности /58/, определены поверхности прочности этого материала для плоского напряженного состояния, показана зависимость компонент тензоров поверхности прочности от температуры и дан анализ анизотропии прочности.

В данной работе ставилась задача провести испытания гибридного текстолита с целью определения прочности при различных частных случаях плоского напряженного состояния и исследовать возможности описания поверхностей прочности с учетом зависимости их от относительного содержания слоев органо- и стеклоткани

$$\begin{aligned}
 & P_{\alpha\beta}(\mu'_{от}, \mu'_{ст}) \cdot \sigma_{\alpha\beta} + P_{\alpha\beta\gamma\delta}(\mu'_{от}, \mu'_{ст}) \cdot \sigma_{\alpha\beta} \cdot \sigma_{\gamma\delta} + \\
 & + P_{\alpha\beta\gamma\delta\epsilon\xi}(\mu'_{от}, \mu'_{ст}) \cdot \sigma_{\alpha\beta} \cdot \sigma_{\gamma\delta} \cdot \sigma_{\epsilon\xi} + \dots = 1 \quad (3.17)
 \end{aligned}$$

Здесь  $\alpha, \beta, \gamma, \dots = 1, 2, 3$ ;  $P_{\alpha\beta}, P_{\alpha\beta\gamma\delta}$  - тензоры поверхности прочности;  $\mu'_{от}, \mu'_{ст}$  - относительное содержание слоев соответственно органо- и стеклоткани ( $\mu'_{ст} = 1 - \mu'_{от}$ ).

Экспериментально определяли прочность при трех значениях относительного содержания слоев ткани из органического и стеклянного волокна  $-\mu'_{от}/\mu'_{ст} = 0,3/0,7, 0,5/0,5, 0,7/0,3$ . При укладке ткани направления утка и основы одной ткани совмещались с направлениями соответственно утка и основы другой ткани. Последовательность укладки слоев из разных тканей подобрана такой чтобы упаковка слоистого пакета была симметричной относительно его срединной плоскости. В качестве матрицы использовалось эпоксидное связующее ЭДТ-10; относительное объемное содержание связующего составляло  $0,35 \pm 0,04$ .

В п.3.2 было показано, что для описания поверхности прочности органотекстолита хорошее приближение дают первые два члена ряда (3.17); аналогичный результат был получен в работе /70/ при описании прочности стеклотекстолита. В этих случаях аппроксимация поверхностей прочности при плоском напряженном состоянии в системе координат, совпадающей с осями симметрии материала, может проводиться уравнением (3.2).

В данной работе решена задача определения зависимости компонент тензоров поверхности прочности гибридных текстолитов от  $\mu'_{ст}$  и  $\mu'_{от}$ . Для этого проведены испытания стеклотекстолита и трех разновидностей органостеклотекстолита при различных частных случаях плоского напряженного состояния; для каждого



материала проверялась возможность описания экспериментальных поверхностей прочности уравнением (3.2); найденные при описании компоненты тензоров  $\rho$  представлены в виде непрерывных функций  $\rho = \rho(\mu'_{от}, \mu'_{ст})$ .

Указанные материалы испытаны по девяти путям нагружения в пространстве напряжений  $\sigma_{11}, \sigma_{22}, \sigma_{12}$ . Для каждого материала и пути нагружения проведено по три-шесть параллельных испытаний. Полученные из опытов значения прочностей приведены в табл. 3.7. Характерные прочности исследуемых материалов в зависимости от содержания слоев органо- и стеклотканей показаны на рис. 3.29.

Таблица 3.7

Прочность гибридного органостеклотекстолита при различных видах нагружения (в МПа).

| Вид нагружения                      | Относительное содержание тканей ( $\mu'_{от}/\mu'_{ст}$ ) |              |              |              |              |
|-------------------------------------|---|--------------|--------------|--------------|--------------|
|                                     | 0/1   | 0,3/0,7      | 0,5/0,5      | 0,7/0,3      | 1/0          |
| растяжение по утку                  | 783 $\pm$ 82  | 612 $\pm$ 57 | 587 $\pm$ 54 | 632 $\pm$ 51 | 677 $\pm$ 30 |
| растяжение по основе                | 647 $\pm$ 61  | 535 $\pm$ 47 | 506 $\pm$ 42 | 467 $\pm$ 39 | 404 $\pm$ 18 |
| сжатие по утку                      | 575 $\pm$ 39  | 403 $\pm$ 28 | 346 $\pm$ 25 | 327 $\pm$ 21 | 207 $\pm$ 9  |
| сжатие по основе                    | 414 $\pm$ 26  | 345 $\pm$ 19 | 317 $\pm$ 12 | 282 $\pm$ 11 | 207 $\pm$ 10 |
| растяжение под 45 $^{\circ}$ к утку | 326 $\pm$ 34  | 271 $\pm$ 28 | 259 $\pm$ 27 | 263 $\pm$ 22 | 415 $\pm$ 19 |
| сжатие под 45 $^{\circ}$ к утку     | 252 $\pm$ 21  | 220 $\pm$ 18 | 228 $\pm$ 13 | 204 $\pm$ 12 | 201 $\pm$ 9  |
| сдвиг по плоск. симметрии           | 350 $\pm$ 31  | 300 $\pm$ 32 | 273 $\pm$ 14 | 240 $\pm$ 19 | 164 $\pm$ 7  |

|   |              |              |              |              |              |
|---|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| сдвиг по диаг.<br>площадкам<br>(полож).   | $400 \pm 42$ | $315 \pm 28$ | $285 \pm 37$ | $272 \pm 27$ | $230 \pm 10$ |
| сдвиг по диаг.<br>площадкам<br>(отрицат.) | $490 \pm 52$ | $350 \pm 37$ | $330 \pm 32$ | $275 \pm 26$ | $187 \pm 9$  |

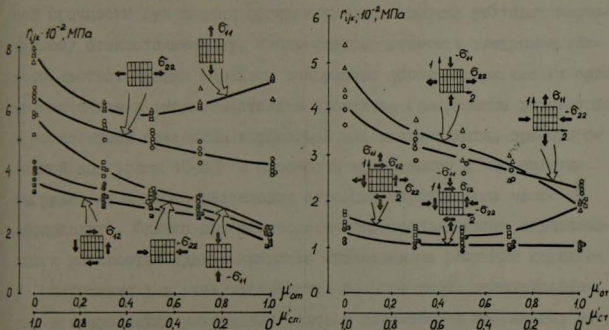


Рис. 3.29. Зависимость прочности гибридного текстолита от соотношения числа слоев органо- и стеклоткани при различных видах напряженного состояния в плоскости армирования материала.

Кривые на рис. 3.29 проведены по средним значениям прочности. Из рисунка видно, что характер зависимости прочности от содержания тканей различен и зависит от вида напряженного состояния. Остановимся подробнее на сравнении прочности при растяжении и сжатии. Исследуемый органотекстолит ( $\mu'_{ст} = 0$ ), имея меньшую по сравнению со стеклотекстолитом ( $\mu'_{от} = 0$ ) прочность при растяжении по утку и основе, в то же время по удельной прочности при

растяжении не уступает последнему. Значительно хуже прочностные свойства органотекстолита при сжатии. Так, прочность его при сжатии по утку и основе составляет от соответствующих значений прочности при сжатии стеклотекстолита всего 37 и 51 %; при сравнении удельной прочности эти оценки несколько изменяются и составляют соответственно 56 и 78 %; таким образом, и по значениям удельной прочности при сжатии органотекстолит заметно уступает исследуемому стеклотекстолиту. Здесь следует отметить следующее обстоятельство. Внешне характер разрушения образцов при сжатии органотекстолита и стеклотекстолита идентичен (разрушение выражается в образовании отчетливо выраженной плоскости сдвига, ориентированной под углом 40-50° к плоскости армирования и направлению нагружения; полного разделения образцов на отдельные части не происходит). Однако при микроскопическом обследовании образовавшихся плоскостей сдвига выявлено существенное различие характера разрушения: в стеклотекстолите большая часть ориентированных в направлении нагружения волокон оказывается срезанной; в органотекстолите срез органических волокон в плоскости сдвига практически не обнаруживается, происходит только искривление волокон и образование складок. Аналогичный характер разрушения при сжатии органопластика на основе волокон *Kevlar-49* описан в /81/, где высказано предположение, что главной причиной образования таких складок следует считать фибриллярную структуру высокоанизотропных органических волокон и их низкую сдвиговую прочность.

Микроскопическое обследование разрушенных при сжатии образцов гибридного текстолита показало, что при всех исследованных значениях содержания органо- и стеклоткани характер разрушения органических и стеклянных волокон остается аналогичным наблюдае-

мому в исходных двухкомпонентных текстолитах, т.е. стеклянные волокна ориентированные в направлении действия сжимающей нагрузки, оказываются срезанными, а органические только искривляются без заметных признаков разрушения. Очевидно, этот факт и объясняет характер кривых прочности гибридного текстолита на сжатие, показанных на рис. 3.29а, из которого видно, что при изменении  $\mu'_{от}$  от 0 до I прочность на сжатие трехкомпонентного текстолита в целом монотонно изменяется от уровня прочности стеклотекстолита до уровня прочности органотекстолита. В данном случае не проявляется "эффект гибридизации", за счет "матричного усиления" описанного в работе /76/, где показано, что при определенном содержании органических и угольных волокон прочность на сжатие в направлении армирования может быть выше, чем прочность исходных двухкомпонентных композитов - углепластика и органопластика.

Описание экспериментальных поверхностей прочности проведено уравнением (3.2). Расчет выполнен на ЭЦМ ЕС-1030 по алгоритму /72/. Полученные значения  $\rho$  приводятся в табл. 3.8.

Таблица 3.8

Компоненты тензоров поверхности прочности гибридного органостеклотекстолита при различном относительном содержании органо- и стеклоткани.

| $\mu'_{от}$ | $\mu'_{сж}$ | Относительное содержание тканей |                        |                          |                          |                          |                          | Чис-<br>ло<br>опыт-<br>ных<br>точек | $S_{босн},$<br>% | $S_R,$<br>% |
|-------------|-------------|---------------------------------|------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|-------------------------------------|------------------|-------------|
|             |             | $\rho_{11} \cdot 10^3$          | $\rho_{22} \cdot 10^3$ | $\rho_{1111} \cdot 10^6$ | $\rho_{2222} \cdot 10^6$ | $\rho_{1122} \cdot 10^6$ | $\rho_{1212} \cdot 10^6$ |                                     |                  |             |
|             |             | МПа <sup>2</sup> I              |                        |                          |                          | МПа <sup>-2</sup>        |                          |                                     |                  |             |
| 0           | 1,0         | -0,550                          | -1,071                 | 2,028                    | 3,312                    | -0,644                   | 2,276                    | 36                                  | 5,1              | 16,2        |
| 0,3         | 0,7         | -0,940                          | -1,331                 | 3,816                    | 5,258                    | -0,990                   | 3,092                    | 38                                  | 4,5              | 11,6        |
| 0,5         | 0,5         | -1,350                          | -1,515                 | 4,877                    | 5,998                    | -0,960                   | 3,529                    | 43                                  | 6,2              | 10,8        |
| 0,7         | 0,3         | -1,667                          | -1,627                 | 5,066                    | 7,728                    | -0,979                   | 4,594                    | 33                                  | 5,6              | 6,7         |
| 1,0         | 0           | -3,180                          | -2,231                 | 6,833                    | 11,559                   | -2,338                   | 9,021                    | 48                                  | 4,7              | 5,4         |

Погрешность аппроксимации  $S_R$  определена по формуле (3.3) и показана в табл.3.8; там же приводятся относительные средне-квадратические ошибки воспроизводимости опытных данных  $S_{\text{восп}}$  и число полученных из испытаний опытных точек. Из табл.3.8 видно, что по мере увеличения содержания в текстолите стеклоткани ошибка аппроксимации возрастает, однако в целом можно считать, что с допустимым приближением уравнение (3.2) удовлетворительно описывает экспериментальные значения прочности испытанных материалов. На рис. 3.30 показаны горизонтальные сечения поверх-

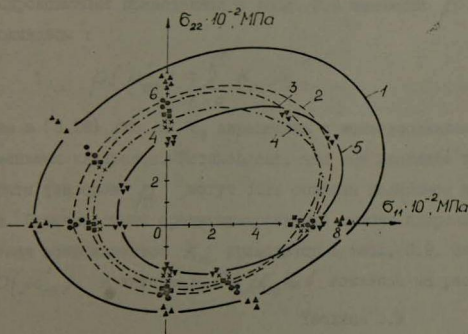


Рис. 3.30. Горизонтальное сечение поверхностей прочности в плоскости  $\sigma_{11} \sigma_{22}$  ( $\sigma_{12} = 0$ ) стеклотекстолита (1), гибридного текстолита при  $\mu'_{ст}/\mu'_{ст} = 0,7/0,3$  (2),  $0,5/0,5$  (3),  $0,3/0,7$  (4) и органотекстолита (5). Точки-эксперимент; линии - расчет согласно (3.2).

ностей прочности в плоскости  $\sigma_{11} \sigma_{22}$  ( $\sigma_{12} = 0$ ) для всех пяти материалов. Из рис. 3.30 видно, что главные направления прочнос-

ти исследованных материалов различаются между собой незначительно и с осями симметрии материала не совпадают; центр главных осей эллипса прочности органотекстолита несколько смещен в сторону первого квадранта осей  $\sigma_{11}, \sigma_{22}$  по сравнению с центром осей эллипсов прочности стеклотекстолита и гибридных текстолитов, что иллюстрирует относительно слабое сопротивление органотекстолита действию сжимающих нагрузок.

По аналогии с /106/, где была показана возможность описания зависимости компонент тензора  $p$  от структуры армирования, представим зависимость  $p = p(\mu'_{от})$  в виде непрерывных функций. Аппроксимация приведенных в табл. 3.8 значений  $p$  выполнена полиномом :

$$p(\mu'_{от}) = \sum_{n=0}^m K_n \cdot \mu'^n_{от} \quad (3.18)$$

Входящие в (3.18)  $m$  и  $K_n$  определены с использованием метода наименьших квадратов. Установлено, что все входящие в (3.18) компоненты тензоров  $p$  могут быть описаны полиномом второй степени. Относительные среднеквадратичные ошибки аппроксимации и значения коэффициентов  $K_n$  приводятся в табл. 3.9. Зависимости  $p(\mu'_{от})$  в интервале  $0 \leq \mu'_{от} \leq 1$  показаны на рис.3.31.

Таблица 3.9

Значения коэффициентов входящих в уравнение (3.18).

| Компоненты тензоров $p$ | Коэффициенты*          |                         |                        | Погрешность аппроксимации, % |
|-------------------------|------------------------|-------------------------|------------------------|------------------------------|
|                         | $K_0$                  | $K_1$                   | $K_2$                  |                              |
| $p_{11}$                | $-5,562 \cdot 10^{-4}$ | $-6,365 \cdot 10^{-4}$  | $-1,743 \cdot 10^{-3}$ | 6,51                         |
| $p_{22}$                | $-1,082 \cdot 10^{-3}$ | $-5,382 \cdot 10^{-4}$  | $-5,432 \cdot 10^{-4}$ | 3,41                         |
| $p_{1111}$              | $2,094 \cdot 10^{-6}$  | $4,835 \cdot 10^{-6}$   | $6,584 \cdot 10^{-3}$  | 6,09                         |
| $p_{2222}$              | $3,352 \cdot 10^{-6}$  | $3,984 \cdot 10^{-6}$   | $3,792 \cdot 10^{-6}$  | 4,50                         |
| $p_{1122}$              | $-2,294 \cdot 10^{-6}$ | $-2,672 \cdot 10^{-12}$ | $-5,700 \cdot 10^{-6}$ | 8,47                         |
| $p_{1212}$              | $-6,742 \cdot 10^{-7}$ | $-1,079 \cdot 10^{-8}$  | $-1,093 \cdot 10^{-6}$ | 18,19                        |

\* Для компонент  $p_{11}, p_{12}$  коэффициенты  $K$  имеют размерность МПа<sup>-1</sup>, для  $p_{1111}, p_{2222}, p_{1122}, p_{1212}$  - МПа<sup>-2</sup>

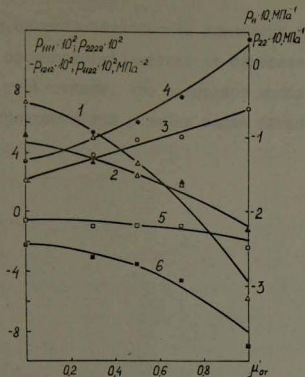


Рис. 3.3I. Зависимости компонент тензоров поверхности прочности от относительного содержания органической ткани :  $P_{11}$  (1),  $P_{22}$  (2),  $P_{1111}$  (3),  $P_{2222}$  (4),  $P_{1122}$  (5),  $P_{1212}$  (6). Линии-аппроксимация согласно (3.18) с учетом приведенных в табл.3.9 коэффициентов.

Выводы по главе III.

1. На основе экспериментального определения прочности органо-пластика при плоском напряженном состоянии показано, что поверхность прочности может быть описана тензорно-полиномиальным рядом, содержащим линейные и квадратичные члены.

2. Установлено, что температурное воздействие вызывает не-изотропное сокращение поверхности прочности : относительно быст-рее прочность уменьшается в третьем квадранте. Для учета этого эффекта проведено описание температурной зависимости входящих в условие прочности компонент тензоров поверхности прочности.

3. Выявлена и описана зависимость компонент тензоров поверхности прочности органо-стеклопластика от относительного содержания органо- и стеклоткани, что позволяет использовать полученное условие прочности при решении задач оптимизации.



## ДЛИТЕЛЬНАЯ ПРОЧНОСТЬ ОРГАНОПЛАСТИКА

## 4.1. Экспериментальное определение длительной прочности однонаправленно армированного органопластика.

В главе III рассматривалась прочность органопластиков в условиях кратковременного нагружения. Однако, при проектировании конструкций подверженных действию длительных статических нагрузок необходимо иметь опытные данные о временной зависимости прочности материала. Для органопластиков в известной литературе такие данные отсутствуют.

В этой связи ставилась задача экспериментального определения длительной прочности однонаправленно армированного органопластика в режиме ползучести при растяжении в направлении армирования. Такой вид напряженного состояния был выбран ввиду того, что однонаправленные органопластики широко используются в конструкциях работающих при длительном действии растягивающих нагрузок, например, в баллонах высокого давления /I24, I25/. Программой опытов предусматривалось испытание плоских образцов (рис.3.1а) однонаправленного органопластика с коэффициентом армирования

$\mu = 0,65$  в комнатных температурно-влажностных условиях при постоянных уровнях напряжений. Использовать имеющиеся испытательные стенды вследствие высокой прочности материала при растяжении вдоль волокон не представлялось возможным. Поэтому в Институте механики полимеров были разработаны и изготовлены специальные стенды для экспериментального изучения ползучести и длительной прочности современных высокопрочных композитов при нагрузках близких к разрушающим. Стенд имеет следующие характеристики :

- количество испытательных ячеек в одном стенде - I;
- рабочий ход подвижного захвата - 15 мм;
- расстояние между захватами:
  - максимальное - 250 мм;
  - минимальное - 100 мм;
- передаточное отношение рычажных механизмов - I:30;
- максимальное разрывное усилие - 3 тс;
- габариты: высота - 1870 мм, ширина - 620 мм, длина - 820 мм. Основными узлами и механизмами являются узел установки образца с измерителем деформаций, рычажно-блочный механизм нагружения, привод механизма нагружения. Узлы и механизмы смонтированы на общей раме из сортового проката (рис.4.1).

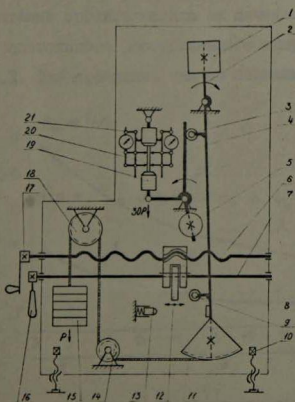


Рис.4.1. Кинематическая схема стенда для испытаний органопластиков на ползучесть.

Общий вид стендов показан на рис.4.2.



Рис. 4.2. Стенды для испытаний органопластиков на ползучесть.

Результаты испытаний органопластика на длительную прочность при разных уровнях постоянного растягивающего напряжения представлены на рис. 4.3. Для сравнения там же показаны опытные кривые

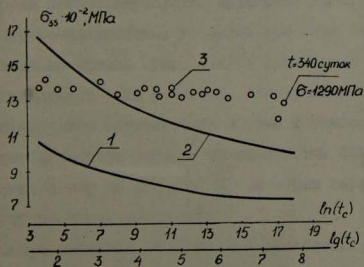


Рис. 4.3. Кривые длительной прочности однонаправленных пластиков при растяжении в направлении армирования Стеклопластик на основе Е-стекла(1) и S-стекла(2) /150/, органопластик (3).

длительной прочности однонаправленных стеклопластиков на основе Е-стекла и S-стекла /150/. Из сопоставления приведенных на рис. 4.3 данных видно, что по сравнению со стеклопластиком временная зависимость прочности органопластика выражена значительно меньше. На базе времени 8000 час однонаправленный органопластик выдерживает нагрузку составляющую 0,90 от прочности при кратковременном нагружении, тогда как стеклопластики на основе S-стекла и Е-стекла соответственно 0,63 и 0,72. Как отмечено в работе /61/, при усталостных испытаниях на базе  $10^7$  циклов показатели прочности органопластика на 25 % выше чем стеклопластика.

#### 4.2. Поверхности равнодлительной прочности органопластика при плоском напряженном состоянии.

Целью данной работы являлось экспериментальное изучение длительной прочности органотекстолита. Испытания проведены в комнатных температурно-влажностных условиях при семи видах напряженного состояния материала (рис. 4.4) : одномерное растяжение и сжатие в направлениях утка и основы, одновременное растяжение и сжатие в направлениях соответственно утка и основы, двумерное растяжение с одновременным сдвигом по плоскостям симметрии материала и, наконец, сдвиг по плоскостям симметрии перпендикулярным плоскости армирования материала.

Форма и размеры образцов, а также приспособления, использовавшиеся при испытаниях, описаны в п.3.1. Все длительные опыты проводились на трехканальных испытательных машинах ZST-2/3, ZST-3/3 (производство народного предприятия VEB : Werkstoffprüfmashin., ГДР). При проведении испытаний на сжатие

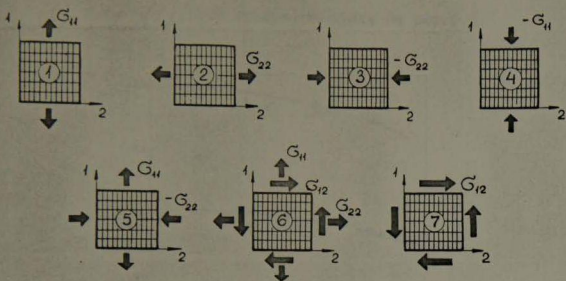


Рис. 4.4. Схемы напряженного состояния органотекстолита, при которых проводились испытания на длительную прочность. Оси 1, 2 совпадают с направлениями армирования: 1-направление утка, 2-направление основы.

и сдвиг эти машины дооборудовались реверсорами, в которых размещались необходимые приспособления. Для каждого варианта напряженного состояния экспериментально определяли кривую длительной прочности. С этой целью испытывали серию образцов под действием постоянных напряжений составляющих 0,60 - 0,95 от предела кратковременной прочности. В работе приводятся и анализируются опытные данные, соответствующие максимальному времени до разрушения  $\approx 425$  суток.

Для удобства дальнейшего изложения используем понятия характерных прочностей  $r_{ijk}$ ,  $i = 0, \bar{1}, \bar{1}$ ;  $j = 0, 2, \bar{2}$ ;  $k = 0, 6$ ; как и выше, индекс 1 соответствует компоненте  $\sigma_{11}$ , индекс 2 - компоненте  $\sigma_{22}$  и индекс 6 -  $\sigma_{12}$ . Таким образом, испытания по схемам показанным на рис. 4.4 позволили определить следующие опытные кривые:  $r_{100}(t)$ ,  $r_{020}(t)$ ,  $r_{\bar{1}00}(t)$ ,  $r_{02\bar{2}}(t)$ ,  $r_{\bar{1}20}(t)$ ,

$r_{126}(t)$ ,  $r_{006}(t)$ . Эти кривые показаны на рис.4.5.

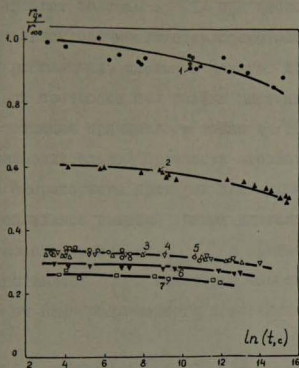


Рис.4.5. Кривые длительной прочности органотекстолита при разных видах напряженного состояния материала; номера кривых соответствуют номерам схем на рис.4.4. Точки - эксперимент; линии - аппроксимация согласно (4.2).

Из рис.4.5 видно, что кривые длительной прочности при разных видах напряженного состояния в целом имеют одинаковый характер. В связи с этим представлялось целесообразным проверить их подобие. Можно назвать целый ряд работ [II, 2I, 35, 4I], в которых подобие кривых длительной прочности анизотропных композитов при разных видах напряженного состояния было установлено экспериментально или допускалось при описании границ длительного сопротивления материалов. Так в [II] показано, что кривые длительной прочности стеклопластиков КАСТ-В и ППН при разных соотношениях компонент тензоров напряжений  $\sigma_{11}$  и  $\sigma_{22}$  в третьем

квадранте напряжений (двухосное сжатие) приблизительно подобны. Аналогичный результат получен в /21/ при экспериментальном исследовании длительной прочности стеклотекстолитов различных марок в условиях растяжения, сжатия и сдвига. Допущение подобия кривых длительной прочности при разных частных видах плоского напряженного состояния принималось также в /35/ при определении поверхностей равнодлительной прочности стеклотекстолита и в /41/ при разработке операторного критерия длительной прочности стеклопластиков. Соблюдение подобия кривых длительной прочности означает, что отношение значений  $r_{ijk}(t)$  к кратковременной прочности  $r_{ijk}^0$  представляет собой некоторую монотонно изменяющуюся и не зависящую от вида напряженного состояния функцию времени

$$r_{ijk}(t)/r_{ijk}^0 = f(t) \quad (4.1)$$

Соблюдение условия (4.1) дает возможность построить единую обобщенную кривую длительной относительной прочности материала. Такая кривая показана на рис.4.6.

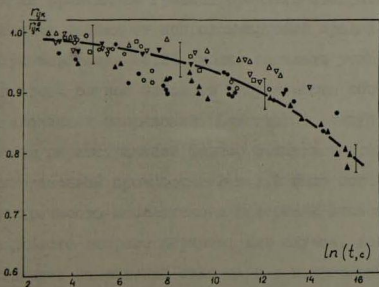


Рис.4.6. Обобщенная по видам напряженного состояния кривая длительной относительной прочности. Обозначения точек соответствуют рис.4.5; линия - аппроксимация согласно (4.2).

Если учесть, что в испытаниях на длительную прочность неизбежным является сравнительно большой расброс результатов даже при одном виде напряженного состояния, то показанная на рис.4.6 точность обобщения данных при семи видах напряженного состояния в целом может оцениваться как удовлетворительная. Следуя работам /II,2I,35/, аппроксимацию обобщенной кривой проведем выражением

$$f(t) = A + B \cdot \exp(-\alpha \cdot t^\beta) = r_{ijk}(t) / r_{ijk}^0, \quad (4.2)$$

где  $A \cdot B \cdot \alpha \cdot \beta$  - коэффициенты;  $t$  - время; при  $t = 0$   $A + B = 1$ ; при  $t \rightarrow \infty$   $r_{ijk}(t) \rightarrow r_{ijk}^0 \cdot A$ . Численные значения входящих в (4.2) коэффициентов определены по приведенным на рис.4.6 точкам с использованием алгоритма отыскания минимума функции многих переменных методом спуска /43/. Минимизировалась средняя относительная квадратическая ошибка аппроксимации  $S_R^{-\beta}$  (3.3). Найдено, что  $A = 0,458$ ,  $B = 0,542$ ,  $\alpha = 0,017 \text{ с}^{-\beta}$ ,  $\beta = 0,209$ ; при этом  $S_R = 3,03\%$ . Кривая, соответствующая уравнению (4.2) с найденными коэффициентами, показана на рис.4.6 линией, там же приводятся границы среднего квадратического отклонения опытных данных от аппроксимирующей кривой.

Используя выражение (4.2), можно записать условие длительной прочности в общем случае плоского напряженного состояния при постоянных значениях напряжений. Для этого, следуя работам /35, 39,86/, введем параметрически фактор времени в уравнение поверхности кратковременной прочности. В п.3.2 было показано, что кратковременная прочность исследуемого материала описывается уравнением поверхности второго порядка; для случая, когда направление действующих напряжений совпадает с направлением осей симметрии прочностных свойств, уравнение принималось в следующем



виде :

$$p_{11}^0 \cdot \sigma_{11} + p_{22}^0 \cdot \sigma_{22} + p_{1111}^0 \cdot \sigma_{11}^2 + p_{2222}^0 \cdot \sigma_{22}^2 + 4p_{1212}^0 \cdot \sigma_{12}^2 + 2p_{1122}^0 \cdot \sigma_{11} \cdot \sigma_{22} = 1 \quad (4.3)$$

Здесь  $p^0$  - компоненты тензоров поверхности кратковременной прочности, выражаемые через характерные прочности следующим образом /57/ :

$$\begin{aligned} p_{11}^0 &= \frac{r_{100}^0 - r_{100}^0}{r_{100}^0 \cdot r_{100}^0} ; & p_{22}^0 &= \frac{r_{020}^0 - r_{020}^0}{r_{020}^0 \cdot r_{020}^0} ; \\ p_{1111}^0 &= \frac{1}{r_{100}^0 \cdot r_{100}^0} ; & p_{2222}^0 &= \frac{1}{r_{020}^0 \cdot r_{020}^0} ; \\ p_{1122}^0 &= \frac{1}{2} \left[ \left( \frac{r_{100}^0 - r_{100}^0}{r_{100}^0 \cdot r_{100}^0} - \frac{r_{020}^0 - r_{020}^0}{r_{020}^0 \cdot r_{020}^0} \right) \cdot \frac{1}{r_{120}^0} + \right. \\ &+ \frac{1}{r_{100}^0 \cdot r_{100}^0} + \frac{1}{r_{020}^0 \cdot r_{020}^0} - \frac{1}{(r_{120}^0)^2} \left. \right] ; \\ p_{1212}^0 &= \frac{1}{(2 \cdot r_{020}^0)^2} . \end{aligned} \quad (4.4)$$

Уравнение поверхности длительной прочности при действии постоянных напряжений  $\sigma_{11}$ ,  $\sigma_{22}$  и  $\sigma_{12}$  получаем представлением компонент тензоров поверхности прочности, как функций времени.

Для этого в (4.4) вместо  $r_{ijk}^0$  подставляем в соответствии с

$$(4.1) \quad r_{ijk}(t) = r_{ijk}^0 \cdot f(t) \quad . \text{ В результате получим :}$$

$$\begin{aligned} p_{11}(t) &= p_{11}^0 \cdot \frac{1}{f(t)} ; & p_{22}(t) &= p_{22}^0 \cdot \frac{1}{f(t)} ; \\ p_{1111}(t) &= p_{1111}^0 \cdot \frac{1}{f^2(t)} ; & p_{2222}(t) &= p_{2222}^0 \cdot \frac{1}{f^2(t)} ; \\ p_{1122}(t) &= p_{1122}^0 \cdot \frac{1}{f^2(t)} ; & p_{1212}(t) &= p_{1212}^0 \cdot \frac{1}{f^2(t)} . \end{aligned} \quad (4.5)$$

С учетом (4.3) и (4.5) уравнение поверхности длительной прочности при постоянных напряжениях принимает вид:

$$\frac{1}{f(t)} \cdot (p_{11}^0 \cdot \sigma_{11} + p_{22}^0 \cdot \sigma_{22} + \frac{1}{f^2(t)} \cdot (p_{1111}^0 \cdot \sigma_{11}^2 + p_{2222}^0 \cdot \sigma_{22}^2 + 4p_{1212}^0 \cdot \sigma_{12}^2 + 2 \cdot p_{1122}^0 \cdot \sigma_{11} \cdot \sigma_{22})) = 1 \quad (4.6)$$

Численные значения входящих в (4.6) компонент тензоров  $p^0$ , характеризующих поверхность кратковременной прочности, приводятся в табл.3.3; функция  $f(t)$  определяется выражением (4.2).

Таким образом, уравнение (4.6) описывает поверхности равнодлительной прочности для заданных значений времени, а также позволяет определить время до разрушения для заданных постоянных напряжений в плоскости армирования материала. В качестве примера на рис.4.7 показано сечение поверхностей равнодлительной проч-

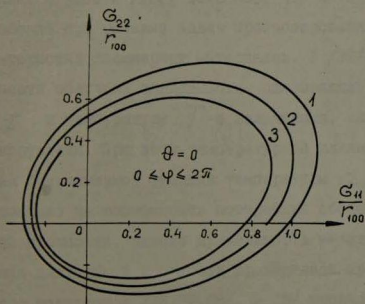


Рис.4.7. Сечение поверхностей равнодлительной прочности в плоскости  $\sigma_{11} \sigma_{22}$  при кратковременном нагружении (1) и длительном действии постоянных напряжений, соответствующих времени до разрушения 50 (2) и 2500 ч (3).  $\theta = 0$ .  $0 \leq \varphi \leq 2\pi$ .

ности органотекстолита в плоскости  $\sigma_{11}$   $\sigma_{22}$  ( $\sigma_{12}=0$ ).

#### 4.3. Возможности прогнозирования длительной прочности органопластика по данным испытаний при повышенных температурах.

Согласно классификации, принятой в работе /4/, существующие методы описания температурно-временной зависимости прочности можно условно разделить на четыре основные группы: 1) методы, основанные на использовании физических, полуэмпирических и эмпирических соотношений; 2) параметрические методы; 3) методы температурно-временной аналогии (ТВА); 4) методы, основанные на знании законов ползучести, кинетики роста трещин и накопления повреждений. В работе /108/ показано, что метод ТВА нашел широкое применение при решении задач прогнозирования деформационных характеристик полимерных материалов. В /37/ из соотношений размерности получены зависимости, связывающие время до разрушения  $\tau$  и температуру  $T$  с величинами, характеризующими режим нагружения. При этом температурное влияние учитывалось введением безразмерной функции температуры  $\alpha_T$ . Имеются работы, указывающие на возможность построения обобщенных кривых длительной прочности, однако применимость метода ТВА для прогнозирования длительной прочности проверялась на весьма ограниченном классе материалов /26,31,68/. В /5/ проведено экспериментальное исследование температурно-временной зависимости прочности компонентов органопластика: высокопрочных органических нитей, микропластика и эпоксидного связующего ЭДТ-10.

Целью данной работы являлось изучение влияния температуры на прочность органотекстолита в условиях ползучести при одноосном растяжении в направлении основы армирующей ткани, а также

оценка возможностей использования ТВА для прогнозирования длительной прочности этого материала. Были проведены следующие эксперименты:

- определены диаграммы деформирования органотекстолита в условия кратковременного растяжения в режиме  $\dot{\epsilon} - const$  при постоянных значениях температуры в интервале 20-150°C;
- получены кривые длительной прочности материала при следующих температурах: 20, 50, 80, 100°C; продолжительность испытаний при повышенных температурах не превышала 3 суток; длительность контрольного опыта при  $T = 20^\circ$  около 3,5 лет;
- проведены испытания по определению долговечности органотекстолита в случае нестационарных температурных и силовых режимов.

Определение кратковременной прочности материала при повышенных температурах необходимо для выбора постоянных напряжений при испытаниях на длительную прочность. Техническое обеспечение экспериментов и методика определения кратковременной прочности рассматривались в пп. 3.1-3.3. Значения прочности органотекстолита при растяжении вдоль основы в режиме  $\dot{\epsilon} - const$  при разных температурах приведены в табл. 3.4. На рис. 4.8 показаны соответствующие кривые деформирования материала. Из рисунка видно, что при повышении температуры до 150°C прочность и модуль упругости снижаются в среднем на 50 % по сравнению с исходными значениями при комнатных условиях. В то же время предельная деформация органотекстолита несколько возрастает с 3,3 % до 4,2 %.

Затем проводили испытания по определению зависимости времени жизни образцов  $\tau$  от постоянного растягивающего напряжения  $\sigma$  и температуры  $T$ . Испытания выполнены при температу-

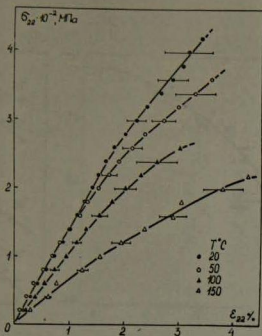


Рис. 4.8. Диаграммы деформирования органотекстолита при растяжении вдоль основы в режиме  $\dot{\epsilon} = \text{const}$  в зависимости от температуры:  $T = 20^\circ\text{C}$  (●),  $50^\circ\text{C}$  (○),  $100^\circ\text{C}$  (▲),  $150^\circ\text{C}$  (△).

рах  $50, 80, 100^\circ\text{C}$  на базе времени до трех суток; при  $T = 20^\circ\text{C}$  максимальное наблюдавшееся время до разрушения составляло 425 суток; при более низких напряжениях эксперименты продолжают. Вопросы связанные с техническим обеспечением испытаний при повышенных температурах более подробно рассмотрены в п.3.1. На рис. 4.9 представлены неусредненные экспериментальные данные показывающие зависимость времени жизни образцов органотекстолита от приложенного постоянного напряжения и температуры.

Предварительный анализ полученных данных показал, что по результатам испытаний ограниченной продолжительности методом ТВА можно построить обобщенную кривую температурно-временной зависимости прочности, изображенную на рис. 4.9 для температуры приведения  $T_0 = 20^\circ\text{C}$ .

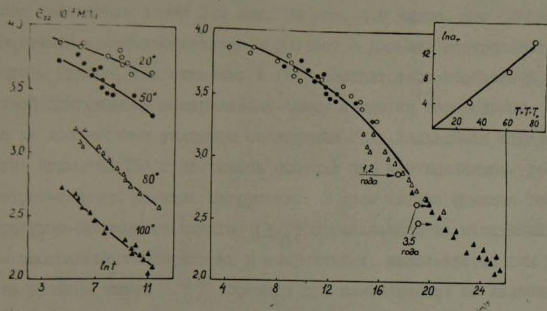


Рис. 4.9. Температурно-временная зависимость прочности органотекстолита, обобщенная кривая длительной прочности и функция температурно-временного сдвига  $\alpha_T$ .

Построение обобщенной кривой выполнено по методике изложенной в /108/. Зависимость  $\alpha_T(T)$  аппроксимирована соотношением

$$\ln \alpha_T(T) = C(T - T_0). \quad (4.7)$$

Значение параметра  $C$  определено методом наименьших квадратов. Для представленных на рис. 4.9 данных  $C = 0,166 \frac{1}{^\circ\text{C}}$ ;  $T_0 = 20^\circ\text{C}$ .

По аналогии с вязкоупругостью соблюдение ТВА прочности проверялось двумя способами: сопоставлением обобщенной кривой длительной прочности с данными контрольного опыта при  $T = 20^\circ\text{C}$  и проведением контрольных испытаний при изменяющихся по заданным законам температуре и напряжении /108/.

Усредненные результаты длительного контрольного опыта при постоянных напряжениях показаны на рис. 4.9 сплошной линией.

Максимальное наблюдавшееся время до разрушения 425 суток, общее время наблюдения около 3,5 лет. Из рис. 4.9 видно, что обобщенная кривая удовлетворительно совпадает с данными контрольного опыта. Однако, как отмечено в /4/, соответствие обобщенной кривой длительному контрольному опыту является необходимым, но еще не достаточным условием соблюдения ТВА. Дальнейшее подтверждение принципа ТВА проверялось опытами при нестационарных температурно-силовых режимах нагружения. В этом случае функция температурно-временного сдвига  $\alpha_T$ , определенная из испытаний при постоянных температурах и напряжениях, используется для расчета времени жизни  $t^*$  образцов при изменяющихся по заданным законам температуре и напряжении. Были проведены два вида контрольных опытов\*.

В п.4.2 было показано, что уравнение длительной прочности органотекстолита при плоском напряженном состоянии в случае постоянных напряжений имеет вид :

$$\frac{1}{f(t^*)} \cdot (p_{11}^0 \cdot \sigma_{11} + p_{22}^0 \cdot \sigma_{22}) + \frac{1}{f^2(t^*)} \cdot (p_{111}^0 \cdot \sigma_{11}^2 + p_{222}^0 \cdot \sigma_{22}^2 + 4p_{1212}^0 \cdot \sigma_{12}^2 + 2p_{1122}^0 \cdot \sigma_{11} \cdot \sigma_{22}) = 1, \quad (4.8)$$

где  $t^*$  - время до разрушения;  $p^0$  - компоненты тензоров поверхности кратковременной прочности; функция  $f(t)$  представлена выражением

$$f(t) = A + B \cdot \exp(-\alpha \cdot t^\beta). \quad (4.9)$$

\* Опыты выполнены В.М.Пономаревым.

Параметры  $A, B, \alpha, \beta$  имеют следующие значения :

$A = 0,458; B = 0,542; \alpha = 0,017 \text{ с}^{-\beta}; \beta = 0,209$ . Так как в рассматриваемом случае отличной от 0 является одна компонента тензора напряжения :  $\sigma_{22}$ , то уравнение (4.8) можно несколько сократить

$$\frac{\rho_{22}^0 \cdot \sigma_{22}}{f(t^*)} + \rho_{2222}^0 \cdot \left[ \frac{\sigma_{22}}{f(t^*)} \right]^2 = 1 \quad (4.10)$$

Согласно принципу ТВА влияние температуры учитывается введением шкалы условного времени

$$z = \int_a^t \alpha_T [T(u)] du, \quad (4.11)$$

в которой свойства материала не будут зависеть от температуры.

Подставляя (4.11) в (4.10) получим

$$\rho_{22}^0 \cdot \frac{\sigma_{22}}{f(z^*)} + \rho_{2222}^0 \left[ \frac{\sigma_{22}}{f(z^*)} \right]^2 = 1 \quad (4.12)$$

Уравнение (4.12) внешне ничем не изменяется при различных постоянных и переменных температурах, на самом деле отражает сильное влияние температуры.

Контрольные опыты проводили при постоянном растягивающем напряжении  $\sigma_{22} = \sigma_{22}^0 = 200 \text{ МПа} \approx 0,5 \sigma_{22}^p$  и температуре возрастающей с постоянной скоростью  $V_T$  от  $20^\circ\text{C}$  до момента разрушения  $t^*$  :

$$\tilde{T}(t) = \tilde{T}_{\text{нач}} + V_T \cdot t \quad (4.13)$$

где  $\tilde{T}_{\text{нач}} = T_{\text{нач}} - T_0$ ;  $V_T = 30,4 \text{ град/час}$ ;  $T_0 = 20^\circ\text{C}$ .

Преобразование шкалы времени для закона изменения температуры (4.13) с учетом (4.7) и (4.11) будет :



$$Z = \frac{e^{c \cdot \tilde{T}_{\text{нач}}}}{c \cdot v_T} \cdot (e^{c \cdot v_T \cdot t} - 1). \quad (4.14)$$

Для определения времени до разрушения решали уравнение длительной прочности (4.12) в шкале условного времени

$$P_{22}^0 \cdot \frac{\sigma_{22}^0}{A + B \cdot \exp(-\alpha \cdot Z^{*\beta})} + p_{2222}^0 \cdot \left( \frac{\sigma_{22}^0}{A + B \cdot \exp(-\alpha \cdot Z^{*\beta})} \right)^2 = 1 \quad (4.15)$$

Уравнение (4.15) решено на ЭВМ HP-9600 методом деления отрезка пополам /14/. Переход к истинному времени  $t$  сделан по формуле

$$t = \frac{1}{c \cdot v_T} \cdot \ln(c \cdot v_T \cdot e^{-c \cdot \tilde{T}_{\text{нач}} \cdot Z} + 1). \quad (4.16)$$

Полученное при расчете значение времени до разрушения сопоставлено с опытным в табл.4.1.

2. Второй контрольный опыт проводили при возрастающих с постоянными скоростями напряжении и температуре:

$$\sigma_{22}(t) = v_G \cdot t; \quad v_G = 60.3 \text{ МПа/час};$$

$$\tilde{T}(t) = \tilde{T}_{\text{нач}} + v_T \cdot t; \quad \tilde{T}_{\text{нач}} = T_{\text{нач}} - T_0 = 8^\circ\text{C}; \quad v_T = 20,5 \frac{\text{град}}{\text{час}} \quad (4.17)$$

В /74/ было показано, что для изменяющегося во времени напряжения уравнение (4.10) может быть представлено в следующем виде:

$$P_{22}^0 \cdot \int_0^{t^*} \frac{d\sigma(u)}{f(t^* - u)} + p_{2222}^0 \cdot \left[ \int_0^{t^*} \frac{d\sigma(u)}{f(t^* - u)} \right]^2 = 1 \quad (4.18)$$

Учитывая связь между условным и истинным временем (4.16), запишем закон изменения напряжения в шкале условного времени:

$$\sigma(Z) = \frac{v_G}{c \cdot v_T} \cdot \ln(c \cdot v_T \cdot e^{-c \cdot \tilde{T}_{\text{нач}} \cdot Z} + 1). \quad (4.19)$$

Тогда уравнение (4.18) с учетом (4.9) и (4.19) примет вид

$$p_{22}^0 \int_0^{z^*} \frac{v_G \cdot \exp(-c \cdot \tilde{T}_{нач}) du}{[c \cdot v_T \cdot \exp(-c \cdot \tilde{T}_{нач}) \cdot u + 1] \cdot \{A + B \cdot \exp[-\alpha \cdot (z^* - u)^\beta]\}} +$$

$$+ p_{2222}^0 \left( \int_0^{z^*} \frac{v_G \cdot \exp(-c \cdot \tilde{T}_{нач}) du}{[c \cdot v_T \cdot \exp(-c \cdot \tilde{T}_{нач}) \cdot u + 1] \cdot \{A + B \cdot \exp[-\alpha \cdot (z^* - u)^\beta]\}} \right)^2 = 1 \quad (4.20)$$

Уравнение (4.20) решали относительно  $Z^*$  на ЭВМ HP-9600 методом деления отрезка пополам. Переход к истинному времени осуществляли по формуле (4.16). Результаты расчет и усредненные данные контрольного опыта приведены в табл.4.I.

Таблица 4.I.

Результаты контрольных испытаний органотекстолита при  $T = T(t)$  и  $\sigma = \sigma(t)$

| Режим<br>нагрузки   | Времи до разрушения,<br>(час) |        |
|---|-------------------------------|--------|
|   | опыт                          | расчет |
| $\sigma_{22} = \sigma_{22}^0 - const$<br>$T(t) = T_H + v_T \cdot t$ | 3.5±0.7                       | 4.0    |
| $\sigma_{22}(t) = v_G \cdot t$<br>$T(t) = T_H + v_T \cdot t$        | 3.8±0.5                       | 4.I    |

Выполненный анализ подтверждает возможность использования метода ТВА для прогнозирования длительной прочности органотекстолита по результатам экспресс-испытаний при повышенной температуре.

Выводы по главе IV.

1. Проведены испытания на длительную прочность органотекстолита при семи частных случаях плоского напряженного состояния; установлено, что опытные кривые длительной прочности приблизительно подобны. Условие длительной прочности представлено в виде уравнения кратковременной прочности, в которое параметрически введен фактор времени.

2. Выявлена и подтверждена контрольными испытаниями возможность прогнозирования длительной прочности органопластика по данным температурных испытаний ограниченной продолжительности.

## ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

Основные результаты проведенного исследования заключаются в следующем:

1) выявлена и оценена анизотропия упругости высокопрочного органического волокна на основе ароматических полиамидов; установлено, что упругость органопластика можно определить по свойствам его структурных элементов, используя характеристики упругости анизотропного волокна, найденные из испытаний модельного однонаправленно армированного пластика. Этот вывод доказан сравнением контрольных испытаний с расчетом характеристик упругости органопластика как по свойствам компонент, так и по свойствам отдельного слоя;

2) на основании впервые полученных данных о длительной (свыше 3 лет) ползучести органопластиков установлена повышенная по сравнению со стекло-, угле- и боропластиковыми зависимость деформационных свойств от времени; подтверждены возможности определения ползучести по реологическим свойствам структурных элементов и возможности прогнозирования длительной ползучести по результатам температурных экспресс-испытаний;

3) по результатам изучения температурной зависимости прочности органопластика при плоском напряженном состоянии установлено неизотропное сокращение поверхности прочности с ростом температуры. Показано, что поверхность прочности можно аппроксимировать уравнением поверхности второго порядка, а температурное влияние учесть описанием температурной зависимости компонент тензоров поверхности прочности;

4) на основании анализа полученных экспериментальных данных о длительной прочности органопластика установлена возможность допущения о подобии кривых длительной прочности при разных видах

напряженного состояния, что позволяет существенно сократить объем испытаний, необходимых для определения условия длительной прочности в общем случае плоского напряженного состояния;

5) для практического использования результатов работы разработаны и внедрены методические рекомендации по определению характеристик упругости слоистых намоточных органопластиков, методические рекомендации по испытаниям композитных материалов на ползучесть и длительную прочность и рекомендации по определению прочности анизотропных материалов при плоском напряженном состоянии.

## НАУЧНАЯ НОВИЗНА РАБОТЫ

В работе впервые получены и обобщены экспериментальные данные об основных механических свойствах эпоксидного пластика на основе высокопрочного и высокомодульного органического волокна. Выявлены и экспериментально подтверждены возможности определения упругости и ползучести высокопрочного органопластика по свойствам его компонент. Сопоставлением с длительными ( свыше 3 лет ) контрольными испытаниями доказана возможность прогнозирования ползучести и длительной прочности органопластика при растяжении по данным экспресс-испытаний при повышенных температурах.

ПРАКТИЧЕСКАЯ ЦЕННОСТЬ И РЕКОМЕНДАЦИИ  
К ПРИМЕНЕНИЮ

Полученный в работе и обобщенный из сравнимых экспериментальных исследований комплекс основных механических характеристик высокопрочных органопластиков использован при разработке конструкций из этих материалов, что подтверждено актами внедрения. Кроме того, на основе полученных результатов разработаны и внедрены методические рекомендации по определению упругости слоистых намоточных органопластиков, методические рекомендации по испытаниям композитных материалов на ползучесть и длительную прочность и рекомендации по определению прочности анизотропных материалов при плоском напряженном состоянии. Данные рекомендации позволяют более рационально использовать возможности органопластиков при проектировании конструкций.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. АБОЛИННИШ Д.С. Тензор податливости однонаправленно армированного упругого материала. - Механика полимеров, 1965, №4, с.52-59.
2. АДАМОВИЧ А.Г. Кратковременное деформирование и длительная ползучесть органических нитей на основе параполиамидов. - в кн.: Первая конференция молодых специалистов по механике полимеров. Тезисы докладов, Рига, Зинатне, 1977, с.36-38.
3. АДАМОВИЧ А.Г. Температурно-временная зависимость прочности органических нитей на основе параполиамидов. - Механика полимеров, 1978, №3, с.470-473.
4. АДАМОВИЧ А.Г., УРЖУМЦЕВ Ю.С. Проблемы прогнозирования длительной прочности полимерных материалов. Обзор. - Механика композитных материалов, 1979, №4, с.694-704.
5. АДАМОВИЧ А.Г. Прогнозирование длительного сопротивления органомикропластика при одноосном растяжении. - Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук, Рига, 1978, 139 с.
6. АМБАРЦУМЯН С.А. Теория анизотропных пластинок. М., Наука, 1967, 266 с.
7. Анизотропия механических свойств комбинированных текстолитов на основе органических и неорганических волокон. - Механика композитных материалов, 1980, №1, с.30-33. Авт. : СМЫСЛОВ В.И., ПОЛЯКОВ В.Д., МАКСИМОВ Р.Д., АНУФРИЕВ Б.Н., ШОРШОРОВ М.Х., ОГАНОВ Р.А., СОКОЛОВ Е.А.
8. АШКЕНАЗИ Е.К. К вопросу о геометрии теорий прочности. - Механика полимеров, 1967, №4, с.703-707.



9. АПКЕНАЗИ Е.К., ПЕККЕР Ф.П. Экспериментальная проверка применимости полинома четвертой степени для описания поверхности равноопасных плоских напряженных состояний стеклопластиков. - Механика полимеров, 1970, №2, с.284-294.
10. БАБАЕВСКИЙ П.Г. Отверждающиеся связующие композиционных пластиков. - В кн.: Пластики конструкционного назначения (реактопласты). Под ред. Тростянской Е.Б. М., Химия, 1974, с.75-119.
11. БЕЛЯНИКИН Ф.П., ЯЦЕНКО В.Ф., МАРГОЛИН Г.Г. Прочность и деформативность стеклопластиков при двухосном сжатии. Киев, Наукова Думка, 1971, 153 с.
12. БОРЗОВА Т.В. Приведенные вязкоупругие характеристики однонаправленных стеклопластиков. - В кн.: Деформирование и разрушение твердых тел. М., 1977, с.105-109.
13. БОРЗОВА Т.В. Распределение напряжений в ориентированных однонаправленных стеклопластиках. - В кн.: Научные труды Института механики МГУ, 1975, №37, с.49-54.
14. БОЯРИНОВ А.И., КАФАРОВ В.В. Методы оптимизации в химической технологии. М., Химия, 1969, 564 с.
15. БУЛАВС Ф.Я., АУЗУКАЛНС Я.В., СКУДРА А.М. Деформативные характеристики пластиков армированных высокомодульными волокнами. - Механика полимеров, 1972, №4, с.631-639.
16. Бюллетень иностранной коммерческой информации, 1977, №57, с.42-45.
17. ВАН-ФУ-ФЫ Г.А. Конструкции из армированных пластмасс. Киев, Техника, 1971, 219 с.
18. ВИЛКС У.К. Устройство для измерения деформаций. Авт.свид. СССР № 355486.- Открытия. Изобретения. Промышленные образцы. Товарные знаки, 1972, №31, с.141-142.

19. ВУ Э.М. Феноменологические критерии разрушения анизотропных сред. - В кн.: Композиционные материалы. Т.2, Механика композиционных материалов. Под ред. Дж.Сендецки, перев.с англ. М., Мир, 1978, с.404-498.
20. Высокопрочный боропластик типа КМБ-3 повышенной технологичности. - В кн.: Авиационные материалы. Вып.2, под ред. Туманова А.Т., Гуняева Г.М. М., ОНТИ, 1977, с.24-29. Авт.: ТУМАНОВ А.Т., ЯРЦЕВ В.А., КОРОТАЕВ А.Н., КУВИНОВ М.П., ПИЛИПЕНКО Т.И.
21. ГОЛЬДЕНБЛАТ И.И., БАЖАНОВ В.Л., КОПНОВ В.А. Длительная прочность в машиностроении. М., Машиностроение, 1977, 248 с.
22. ГОЛЬДЕНБЛАТ И.И., КОПНОВ В.А. Критерии прочности и пластичности конструкционных материалов. М., Машиностроение, 1968, 192 с.
23. ГОЛЬДЕНБЛАТ И.И., КОПНОВ В.А. Прочность стеклопластиков при сложном напряженном состоянии. - Механика полимеров, 1965, №2, с.54-58.
24. ГОЛЬДМАН А.Я. К исследованию существенной анизотропии и сопротивления стеклопластиков междуслойному сдвигу и сжатию перпендикулярно к армированию. - Проблемы прочности, 1973, №1, с.14-17.
25. ГОЛЬДМАН А.Я., САВЕЛЬЕВА Н.Ф., СМЕРНОВ В.И. Исследование механических свойств тканевых стеклопластиков при растяжении и сжатии нормально к плоскости армирования. - Механика полимеров, 1968, №5, с.803-809.
26. ГОЛЬДМАН А.Я., ГРИНМАН А.М. Вариант температурно-временной аналогии для частично-кристаллических полимеров (полиэтилен высокой плотности). - Механика полимеров, 1974, №2, с.261-269.

27. ГРЕШУК Л.Б. Межволоконные напряжения в композиционных материалах, армированных волокнами. - Ракетная техника и космонавтика, 1971, т.9, № 7, с.76-84.
28. ГУНИЕВ Г.М. Поликомпонентные высокомодульные композиты. - Механика полимеров, 1977, № 5, с.819-826.
29. ГУНИЕВ Г.М. О реализации механических свойств волокна в высокомодульных полимерных композитах. - Механика полимеров, 1972, № 6, с.1123-1125.
30. ЕНИКОЛОПАН Н.С. Композиционные материалы - материалы будущего. - Журнал Всесоюзного химического общества им.Д.И.Менделеева, 1978, 23, № 3, с.243-248.
31. ЕРМОЛОВ С.Б., ПОТАПОВ Ю.Н. К оценке долговечности полимеров в широком температурно-временном интервале. - Механика полимеров, 1976, № 4, с.746-749.
32. ЖИГАЧ А.Ф., ЦИРЛИН А.М. Физико-химические и прочностные характеристики борных нитей. - Журнал Всесоюзного химического общества им.Д.И.Менделеева, 1978, 23, № 3, с.264-272.
33. ЖИГУН И.Г., ПОЛЯКОВ В.А. Свойства пространственно армированных пластиков. Рига, Зинатне, 1978, 215 с.
34. ЖИГУН И.Г., МИХАЙЛОВ В.В. Особенности испытаний на растяжение высокопрочных однонаправленных композитов. - Механика полимеров, 1978, № 4, с.717-723.
35. ЗАХАРОВ К.В. Длительная прочность анизотропных пластмасс в плоском напряженном состоянии. - Механика твердого тела, 1969, № 6, с.108-111.
36. ЗАХАРОВ К.В. Критерий прочности для слоистых пластмасс. - Пластические массы, 1961, № 8, с.59-62.

37. ИЛЬЯШИН А.А., ОГИБАЛОВ П.М. О критерии длительной прочности полимеров. - Механика полимеров, 1966, № 6, с.828-832.
38. ИСУПОВ Л.П. Метод расчета упругих и прочностных характеристик симметрично-армированного композита. - Машиноведение, 1979, № 4, с.66-70.
39. КЕРИШТЕИН И.М., СТЕПАНОВ Р.Д., ОГИБАЛОВ П.М. К вопросу об оценке анизотропии кратковременной и длительной прочности стеклопластиков. - Механика полимеров, 1969, № 2, с.243-249.
40. КОНКИН А.А., КОННОВА М.Ф. Механические и физико-механические свойства углеродных волокон. - Журнал Всесоюзного химического общества им.Д.И.Менделеева, 1978, 23, № 3, с.259-263.
41. КОПНОВ В.А. Операторный критерий длительной прочности стеклопластиков, - Механика полимеров, 1978, № 2, с.366.
42. КОРБ Л.Дж. Космические летательные аппараты. - В кн.:Композиционные материалы, т.3. Применение композиционных материалов в технике. Под ред. Б.Нотона, пер.с англ. М., Машиностроение, 1978, с.78-129.
43. КРЕГЕР А.Ф. Алгоритм отыскания минимума функции многих переменных методом спуска. - Алгоритмы и программы, 1974, № 2, с.9.
44. КРЕГЕР А.Ф., МЕЛБАРДИС Ю.Г. Определение деформируемости пространственно армированных композитов методом усреднения жесткостей. - Механика полимеров, 1978, № 1, с.3-8.
45. КУДРЯВЦЕВ Г.И., ЖМАЕВА И.В. Органические волокна - армирующие наполнители. - Журнал Всесоюзного химического общества им.Д.И.Менделеева, 1978, 23, № 3, с.253-258.
46. ЛЕХНИЦКИЙ С.Г. Теория упругости анизотропного тела. Изд. 2-е, М., Наука, 1977, 416 с.

47. ЛИПАТОВ Ю.С. Процессы развивающиеся на границе волокно-связующее. Влияние состояния поверхности на физико-механические свойства композиционных материалов. - Журнал Всесоюзного общества им. Д.И.Менделеева, 1978, 23, №3, с.305-309.
48. ЛИПАТОВ Ю.С., АРТЕМЕНКО С.Е., ИВЧЕНКО Н.К., ЛЕБЕДЕВ Е.В., АНДРЕЕВА В.В., ОВЧИННИКОВА Г.П. Исследование морфологии пластиков, армированных химическими волокнами. - Высокомолекулярные соединения. Краткие сообщения, 1975, XVII, №8, с.584-586.
49. ЛИПАТОВ Ю.С., ФАБУЛЯН Ф.Г., ОВЧИННИКОВА Г.П. Исследование релаксационных процессов в системе эпоксидная смола-пластификатор. - Механика полимеров, 1973, №2, с.374.
50. МАКЕЕВ В.П., ЕРШОВ Н.П. Конструкции из композиционных материалов в современной технике. - Журнал Всесоюзного общества им. Д.И.Менделеева, 1978, 23, №3, с.245-248.
51. МАКСИМОВ Р.Д., ПЛУМЕ Э.З., СОКОЛОВ Е.А. Упругость высокопрочного органического волокна и органопластика. - Механика композитных материалов, 1980, №2, с.211-220.
52. МАКСИМОВ Р.Д., СОКОЛОВ Е.А., ПЛУМЕ Э.З. Прочность органостеклотекстолита при плоском напряженном состоянии. - Механика композитных материалов, 1979, №6, с.1021-1026.
53. МАКСИМОВ Р.Д., СОКОЛОВ Е.А., ПЛУМЕ Э.З. Поверхности равнодлительной прочности органотекстолита при плоском напряженном состоянии. - Механика композитных материалов, 1979, №1, с.51-56.
54. МАКСИМОВ Р.Д., ПЛУМЕ Э.З., СОКОЛОВ Е.А. Исследование зависимости прочности тканевого композита от температуры при плоском напряженном состоянии. - Механика полимеров, 1978, №3, с.452-457.

55. МАКСИМОВ Р.Д., СОКОЛОВ Е.А. Влияние температуры на геометрию поверхностей прочности анизотропного материала. - В сб.: Тезисы докладов Всесоюзной конференции "Свойства и применение полимерных материалов при низких температурах" (г.Якутск, 3-5 августа, 1977). Якутск, 1977, с.131.
56. МАКСИМОВ Р.Д. Вариант описания температурной зависимости прочности органотекстолита при плоском напряженном состоянии. - Механика полимеров, 1978, №6, с.1034-1037.
57. МАЛМЕЙСТЕР А.К., ТАМУЖ В.П., ТЕТЕРС Г.А. Сопротивление жестких полимерных материалов. Изд. 2-е, Рига, Зинатне, 1972, 500 с.
58. МАЛМЕЙСТЕР А.К. Геометрия теорий прочности. - Механика полимеров, 1966, №4, с.519-534.
59. МАЛЫЙ В.И. Вязко-упругие свойства композиционных материалов. - В кн.: Упругость и неупругость. М., Издательство МГУ, 1971, с.192-201.
60. МАШИНСКАЯ Г.П. Органоволокниты. - В кн.: Пластики конструкционного назначения (реактопласты). Под ред. Тростянской Е.Б., М., Химия, 1974, с.266-298.
61. МАШИНСКАЯ Г.П. Органоволокниты - композиционные материалы армированные полимерными волокнами. - В кн.: Волокнистые и дисперсно-упрочненные композиционные материалы. М., Химия, 1976, с.171-176.
62. МЕТКАЛФ А.Г. Титановые сплавы упрочненные волокнами. - В кн.: Композиционные материалы. Т.4. Композиционные материалы с металлической матрицей. Под ред. К.Крейдера, пер.с англ., М., Машиностроение, 1978, с.277-338.

63. МОСКВИТИН В.В. Сопротивление вязкоупругих материалов. Применительно к зарядам ракетных двигателей на твердом топливе. М., Наука, 1972, 328 с.
64. Новое высокомодульное волокно. - Экспресс-информация. Термостойкие пластики, 1973, № 4, с.12-16.
65. ОБРАЗЦОВ И.Ф., ВАСИЛЬЕВ В.В., БУНАКОВ В.А. Оптимальное проектирование оболочек вращения из композиционных материалов. М., Машиностроение, 1977, 144 с.
66. Особенности разрушения органопластиков и их влияние на прочность. - Механика композитных материалов, 1979, № 2, с.317-321. Авт.: ПЕРОВ Б.В., СКУДРА А.М., МАШИНСКАЯ Г.П., БУЛАВС Ф.Я.
67. ОУЭН М.Д. Усталость углепластиков. - В кн.: Композиционные материалы. Т.5. Разрушение и усталость. Под ред. Л.Браутмана, пер. с англ., М., Мир, 1978, с.363-394.
68. ПЕКАРСКАС В.П., РАЯЦКАС В.П. Прогнозирование долговечности клеевых соединений под нагрузкой методом температурно-временной аналогии. - Механика полимеров, 1974, № 5, с.937-940.
69. ПЕРЕПЕЛКИН К.Е. Предельные механические свойства ориентированных полимерных структур как армирующих наполнителей. - В кн.: Волокнистые и дисперсно упрочненные композиционные материалы. М., Химия, 1976, с.165-171.
70. ПЕРЕПЕЛКИН К.Е. Основные структурные факторы, определяющие получение высокомодульных и высокопрочных волокон. - В кн.: Теория формирования химических волокон. М., Химия, 1975, с.221-246.
71. ПЕРЕПЕЛКИН К.Е., ЧЕРЕЙСКИЙ Э.Ю. Предельные механические свойства новых видов высокоориентированных полимерных материалов. - Механика полимеров, 1977, № 6, с.1002-1010.

72. ПЛУМЕ Э.З. Определение компонент тензоров поверхности прочности материалов. - Алгоритмы и программы, 1978, №1, с.46.
73. ПЛУМЕ Э.З., МАКСИМОВ Р.Д. Определение компонент тензоров поверхности прочности анизотропных материалов. - Механика полимеров, 1978, №1, с.51-54.
74. ПЛУМЕ Э.З., СОКОЛОВ Е.А. К вопросу о длительной прочности анизотропного материала. - В сб.: Вторая конференция молодых специалистов по механике композитных материалов. Тезисы докладов. Рига, Зинатне, 1979, с.54-55.
75. ПЛУМЕ Э.З., СОКОЛОВ Е.А., МАКСИМОВ Р.Д. Прогнозирование характеристик упругости органических полимеров по свойствам их структурных компонент. - Проблемы прочности, 1980, №2, с.100-103.
76. Поливолоконные композиционные материалы. - В кн.: Авиационные материалы. Вып.2, под ред. Туманова А.Т., Гуляева Г.М. М., ОНТИ, 1977, с.46-55. Авт.: ГУЛЯЕВ Г.М., РУМЯНЦЕВ А.Ф., ФЕДЬКОВА Н.М., МАШИНСКАЯ Г.П., БАРДИНА Н.П., СТЕПАНЬЧЕВ Е.И., МАХМУТОВ И.М.
77. Поливолоконные композиционные материалы. - Пластические массы, 1976, №9, с.31-33. Авт.: ГУЛЯЕВ Г.М., РАБОТНОВ Ю.Н., РУМЯНЦЕВ А.Ф., СТЕПАНЬЧЕВ Е.И., МАХМУТОВ И.М., ФЕДЬКОВА Н.М.
78. ПРОТАСОВ В.Д. Особенности проектирования и создания изделий из композиционных материалов. - Журнал Всесоюзного общества им. Д.И.Менделеева, 1978, 23, №3, с.289-292.



79. РАВИНОВИЧ А.М., ВЕРХОВСКИЙ И.А. Об упругих постоянных ориентированных стеклопластиков. - Инженерный журнал, 1964, т.4, №1, с.90-100.
80. РАБОТНОВ Ю.Н. Прочность слоистых композитов. - Известия АН СССР. Механика твердого тела, 1979, №1, с.113-119.
81. РОЗЕН Б., КУЛКАРИМ С., МАКЛАФЛИН П. Механизмы усталости и потери несущей способности в слоистых композитах. - В кн.: Неупругие свойства композиционных материалов. Ред.К.Гераркович, пер.с англ., М., Мир, 1978, с.33-101.
82. РОЗЕНБЕРГ Б.А., ОЛЕЙНИК Э.Ф., ИРЖАК В.И. Связующие для композиционных материалов. - Журнал Всесоюзного химического общества им. Д.И.Менделеева, 1978, 23, №3, с.272-284.
83. РОУЛАНДС Р. Течение и потеря несущей способности композитов в условиях двухосного напряженного состояния : сопоставление расчета и экспериментальных данных. - В кн.: Неупругие свойства композиционных материалов. М., 1978, с.140-179.
84. Сверхпрочное синтетическое волокно вниивлон Н. Информация ВНИИВ. - Химические волокна, 1971, №1, с.76.
85. Свойства стеклопластиков усиленных высокомолекулярными волокнами. - Механика полимеров, 1972, №1, с.66-74. Авт.: СКУДРА А.М., ПЛУМЕ Э.З., ГУЛЯЕВ Г.М., ЯРЦЕВ В.А., БЕЛЯЕВ Н.А.
86. СКУДРА А.М., БУЛАВС Ф.Я., РОЦЕНС К.А. Ползучесть и статическая усталость армированных пластиков. Рига, Зинатне, 1971, 238 с.
87. СКУДРА А.М., ПЛУМЕ Э.З. Напряжения в пластиках армированных анизотропными волокнами при трансверсальном нормальном растяжении. - Механика полимеров, 1973, №2, с.244-252.
88. СКУДРА А.М., БУЛАВС Ф.Я. Структурная теория армированных пластиков. Рига, Зинатне, 1978, 192 с.

89. СМЕСЛОВ В.И., ПОЛИКОВ В.Л., МАКСИМОВ Р.Д., АНУФРИЕВ Ю.Н., ШОРШОРОВ М.Х., ОГАНОВ Р.А., СОКОЛОВ Е.А. Анизотропия механических свойств поливолокнистых тектолитов на основе органических и неорганических волокон. - В сб.: IV Всесоюзная конференция по композитным материалам ( 20-22 ноября, 1978, Москва ). Тезисы докладов, М., 1978, с.237-238.
90. СОКОЛОВ Е.А., МАКСИМОВ Р.Д. Возможности предсказания ползучести армированного полимерными волокнами пластика. - Механика полимеров, 1978, № 6, с.1005-1012.
91. СОКОЛОВ Е.А. Исследование температурного влияния на анизотропию прочности тканевого органопластика в плоскости армирования. - В сб.:Первая конференция молодых специалистов по механике полимеров.Тезисы докладов. Рига, 1977, с.57-58.
92. СОКОЛОВ Е.А., КРЕГЕР А.Ф., МАКСИМОВ Р.Д. Сравнительный анализ анизотропии прочности стекло- и органотектолитов. - Механика полимеров, 1978, № 5, с.841-847.
93. СОКОЛОВ Е.А., МАКСИМОВ Р.Д. Прогнозирование характеристик упругости гибридного тектолита. - Механика композитных материалов, 1979, № 4, с.705-711.
94. СОКОЛОВ Е.А. Экспериментальная оценка анизотропии прочности однонаправленно армированного органопластика. - Механика композитных материалов, 1979, № 5, с.799-803.
95. СОКОЛОВ Е.А. Возможности предсказания ползучести слоистого органопластика по свойствам однонаправленно армированного материала. - В сб.: Вторая конференция молодых специалистов по механике композитных материалов.Тезисы докладов,Рига, с.43-45.
96. СОКОЛОВ Е.А. Возможности предсказания ползучести слоистого органопластика по свойствам однонаправленного материала. - Механика композитных материалов, 1980, № I, с.142-147.

97. ТАМЖЕ В.П., ТЕТЕРС Г.А. Проблемы механики композитных материалов. - Механика композитных материалов, 1979, №1, с.34-45.
98. ТАРНОПОЛЬСКИЙ Ю.М., СКУДРА А.М. Конструкционная прочность и деформативность стеклопластиков. Рига, Зинатне, 1966, 260 с.
99. ТАРНОПОЛЬСКИЙ Ю.М., КИНСИС Т.Я. Методы статических испытаний армированных пластиков. Изд. 2-ое, перераб. М., Химия, 1975, 264 с.
100. ТЕТЕРС Г.А., РИКАРДС Р.Б., НАРУСБЕРГ В.Л. Оптимизация оболочек из слоистых композитов. Рига, Зинатне, 1978, 240 с.
101. ТЕТЕРС Г.А. Перераспределение усилий в элементах из двух материалов с различными характеристиками ползучести. - В кн.: Исследования по бетону и железобетону. Вып.7, Рига, Изд. АН Латв.ССР, 1963, с.231-235.
102. ТУМАНОВ А.Т., ГУНЯЕВ Г.М., ЛЮЦАУ В.Г., СТЕПАНЫЧЕВ Е.И. Структура, свойства и испытания углепластиков. - Механика полимеров, 1975, №2, с.248-257.
103. ТИЖАЕВ В.Н. Стекловолокниты. - В кн.: Пластики конструкционного назначения. Под ред. Тростянской Е.Б., М., Химия, 1974, с.246-265.
104. УИТНИ Е.М., РАЙЛИ М.В. Упругие свойства составных материалов армированных волокнами. - Ракетная техника и космонавтика, 1966, т.4, №9, с.44-51.
105. УЛЬЯНОВА З.Г. Перспективы развития стекловолокна и стеклопластиков в X-ой пятилетке. - Пластические массы, 1976, №8, с.3-4.

106. УИТГИС З.Т., РИКАРДС Р.Б. Исследование зависимости прочности композита от структуры армирования при плоском напряженном состоянии. - Механика полимеров, 1976, №6, с.1018-1024.
107. УИТГИС З.Т., БРАУНС Я.А., РИКАРДС Р.Б. Определение компонент тензоров поверхности прочности по методу наименьших квадратов. - Механика полимеров, 1974, №3, с.552-554.
108. УРЖУЦЕВ Ю.С., МАКСИМОВ Р.Д. Прогностика деформативности полимерных материалов. Рига, Зинатне, 1975, 416 с.
109. ФОЙЕ Р.Л. Неупругая микромеханика усадочных напряжений в композитах. - В кн.: Неупругие свойства композиционных материалов. М., 1978, с.249-294.
110. ХИЛЛ Р. Математическая теория пластичности. М., Гостехиздат, 1956, 407 с.
111. ХОРОШИЛОВА И.П., КАПИТОНОВА Т.Р., ЛОЗОВСКАЯ В.П. Эпоксидные углепластики КМУ-3л, КМУ-3лн и КМУ-3. - В кн.: Авиационные материалы. Вып.2, под ред. Туманова А.Т., Гуняева Г.М., М., ОНТИ, 1977, с.19-24.
112. ЧАВЛА. Международная конференция по композиционным материалам (1975 г.). - Теоретические основы инженерных расчетов, 1975, №4, с.91-105.
113. ЧАМИС К. Микромеханические теории прочности. - В кн.: Композиционные материалы. Т.5. Разрушение и усталость. Под ред. Л.Браутмана, пер.с англ. М., Мир, 1978, с.106-165.
114. ШЕЙПЕРИ Р. Анализ деформирования и разрушения вязкоупругих композитов. - В кн.: Неупругие свойства композиционных материалов. М., Мир, 1978, с.180-220.

115. ШЕНЕРИ Р.А. Вязкоупругое поведение композиционных материалов. - В кн.: Композиционные материалы. Т.2. Механика композиционных материалов. Под ред. Дж.Сендецки, пер. с англ., М., Мир, 1978, с.102-196.
116. ШЕРМЕРГОР Т.Д. Теория упругости микронеоднородных сред. М., Наука, 1977, 399 с.
117. Экспериментальное исследование физико-механических характеристик органоуглепластика. - В кн.: Труды Московского ордена Ленина энергетического ин-та. М., вып.280, 1976, с.43-46. Авт.: Благоннадежин В.Л., Мезенцев Н.С., Меркулов В.Д., Поляков В.Д.
118. ARCHER J.S., BERMAN L.D. Advanced composites in spacecraft design. - AIAA Pap., 1976, No.237, pp.8-12.
119. AZZI V.D., TSAI S.W. Elastic moduli of laminated anisotropic composites. - Exptl.Mech., 1965, No.5, pp.177-185.
120. BERT C.W. Models for fibrous composites with different properties in tension and compression. - Trans.ASME, 1977, H99, No.4, pp.344-349.
121. BLACK W.B., PRESTON J., MORGAN H.S., RAUMANN G., LILYQUIST M.R. Some physical and mechanical properties of some high-modulus fibre prepared from all para aromatic polyamid-hydrazide. - J.Macromol.Sci.-Chem., 1973, A7(1), pp.137-171.
122. BUNSELL A.R., HARRIS B. Hybrid carbon and glass fibre composites. - Composites, 1974, vol.5, No.4, pp.157-164.
123. CHIAO C.C., MOORE R.L., CHIAO T.T. Measurement of shear properties of fibre composites. Part I. Evaluation of test methods. - Composites, 1977, vol.8, No.3, pp.161-169.

- I24. CHIAO T.T., MOORE R.L. Organic-fibre/epoxide composites.- Composites, 1973, vol.4, No.1, pp.31-33.
- I25. CHRISTENSEN R.J,m BROWNING S.C. Multiaxial failure test vehicle for filament - wound pressure vessels. - Experimental Mechanics, 1977, No.5, pp.179-182.
- I26. CLEMENTS L.L., MOORE R.L. Composite properties for E-glass fibres in a room temperature curable epoxy matrix. - Composites, 1978, vol.9, No.4, pp.93-101.
- I27. CLEMENTS L.L., MOORE R.L. Composite properties of ab aramid fiber in a room temperature curable epoxy matrix. - SAMPE Quart., 1977, vol.9, No.1, pp.6-12.
- I28. CLEMENTS L.L., CHIAO T.T. Engineering design data for an organic fibre/epoxy composite. - Composites, 1977, vol.8, No.2, pp.87-92.
- I29. Composite experts seek more economical methods. - Product Engineering, 1971, No.9, pp.36-37.
- I30. DARLINGTON M.W,m SAUNDERS D.W. Anisotropic creep behavior on polymeric materials. - Amer.Chem.Soc.Polym.Prepr., 1976, vol.17, No.1, pp.133-135.
- I31. DEAN G.D., TURNER P. The elastic properties of carbon fibres and their composites.- Composites, 1973, vol.4, No.7, pp.174-180.
- I32. DOREY G., SIDEY G.R., HUTCHINGS J. Impact properties of carbon fibre/Kevlar 49 fibre hybrid composites. - Composites, 1978, vol.9, No.1, pp.25-32.
- I33. ERICKSEN R.H. Room temperature creep of Kevlar 49/epoxy composites. - Composites, 1976, vol.7, No.7, pp.189-194.

- I34. FISHER L. How to predict structural behavior of R.P. laminates. - Modern Plastics, 1960, No.10, pp.120-203.
- I35. GOGGIN P.R. The elastic constants of carbon fibre composites. - J. of Material Science, 1973, No.9, pp.233-244.
- I36. GREENWOOD J.H., ROSE P.G. Compressive behaviour of Kevlar 49 fibres and composites. - J.Mater.Sci., 1974, vol.9, No.II, pp.1809-1814.
- I37. GUIDOTTI V. Materiali compositi ply leggeri con la nuova fibra PRD-49. - Mater.Plasi. ed elast., 1972, vol.38, No.10, pp.852-858.
- I38. HAMSTAD M.A., CHIAO T.T. Acoustic emission produced during burst tests of filament-wound bottles. - J.Composite Materials, 1973, vol.7, July, pp.320-332.
- I39. HANSON M.P. Effect of temperature on the tensile and creep characteristics of PRD-49 fiber/epoxy composites. - Compos. Mater., Eng., dec., proc., 6th Symp., St.Louis, 1972, Metals, Park, Ohio, 1973, pp.717-724.
- I40. High-modulus organic fibers offer versatility. - Chemical and Engineering News, 1972, vol.17, No.4, pp.33-35.
- I41. ISHIKAWA T., KOYAMA K., KOBAYASHI S. Elastic moduli of carbon - epoxy composites and carbon fibres. - J.Composite Materials, 1977, vol.II, July, pp.332-344.
- I42. KRIZ R.D. , STINCHCOMB W.W. Elastic moduli of transversely isotropic graphite fibers and their composites. - Exptl. Mech., 1979, No.2, pp.41-49.
- I43. KULKARNI S.V., RICE B.W., ROSEN B.W. An investigation of the compressive strength of Kevlar 49/epoxy composites. - Composites, 1975, vol.6, No.9, pp.217-225.

- I44. LAIBLE R.C., FIGUACIA F. The application of high-modulus fibres to ballistic protection. - J.Macromol.Sci.-Chem., 1973, A7(I), pp.295-322.
- I45. LILLYQUIST M.R., De BRUNNER R.E., FINEKE J.K. Construction and properties of fabric of high-modulus organic fibers useful for composite reinforcing. - J.Macromol.Sci.-Chem., 1973, A7(I), pp.203-227.
- I46. MALLICK P.K., BROUTMAN L.J. Static and impact properties of laminated hybrid composites. - J.Test. and Eval., 1977, vol.5, No.3, pp.190-200.
- I47. MILES P.E., McLEAN M. Anisotropic creep behaviour of (Co,Cr), (Co,Cr)<sub>7</sub>C<sub>3</sub> eutectic composite. - Metall Sci., 1977, vol.II, No.12, pp.563-570.
- I48. MOHAJER A.A., FERGUSON W.J. High-modulus organic fibers. - Text.Progress, 1976, vol.97, No.8, pp.320-324.
- I49. MOORE I.W., STURGEON P.L. High modulus organic fibre composites in aircraft application. - Composites, 1973, vol.4, No.1, pp.34-38.
- I50. MOORE I.W., SMITH W.S. Use of advanced composites. - In : Unsaturated Polyester Technology. New York, Gordon and Breach Sci.Publ., 1975, pp.393-420.
- I51. OLIVER P.C. Reinforced plastics in aerospace application. - Plast. and Polym., 1973, vol.4I, No.153, pp.II2-II4.
- I52. SANDERS L.R. Braiding- a mechanical means of composite fabrication. - SAMPE Quart., 1977, vol.8, pp.38-43.
- I53. SCALA E. High-strength filaments for cables and lines. - Anal. and compos., Philadelphia, Pa, 1973, pp.390-409.



- I54. SHIRATORI E., IKEGAMI K., HATTORI T. Viscoelastic behaviour of unidirectional fibre reinforced plastic. - Journal of Material Science, vol.9, No.9, pp.591-606.
- I55. STONE R.M., HARVILL W.E. Service experience of composite parts on the L-1011 and C-130. - SAMPE Quart., 1978, vol.9, No.2, pp.34-39.
- I56. STRATTOER W.K. Evaluation of Dupont's high modulus organic fiber PRD-49 type I. - Mater. 16th Nat.Symp.and Exhib., vol.16, Azusa, Calif., 1971, pp.325-343.
- I57. WEIDMANN G.W., OGARKIEWICZ R.M. Tensile creep of a unidirectional glass fibre-epoxy laminate. - Composites, 1974, vol.5, No.5, pp.117-121.
- I58. WHITNEY I.M. Analysis of the rail shear test. - J.Compos. Mater., 1971, vol.5, No.5, pp.25-34.
- I59. WILFONG R.E., MIKELL W.G. Kevlar aramid. - Mod.Text., 1976, vol.57, No.11, pp.26-30.
- I60. WILFONG R.E., ZIMMERMANN J. Future organic tire fibers. - J.Appl.Polym.Sci., 1973, No.11, pp.2039-2051.
- I61. WILFONG R.E., ZIMMERMANN J. Strength and durability characteristics of Kevlar aramid fibre. - Appl.Polym.Symp., 1977, No.31, pp.1-21.
- I62. ZWEBEN C. Tensile strength of hybrid composites. - J. of Mater. Sci., 1977, vol.12, No.7, pp.1325-1337.

## П Р И Л О Ж Е Н И Я

В ПРИЛОЖЕНИИ I включены краткие аннотации методических рекомендаций, разработанных на основе результатов данной работы. В ПРИЛОЖЕНИИ II приводятся копии актов внедрения, подтверждающие практическое использование полученных результатов.

### ПРИЛОЖЕНИЕ I

Методические рекомендации по определению упругости слоистых намоточных органических полимеров.

Задача определения характеристик упругости слоистого композита рассматривается с различных структурных уровней. В одном варианте в качестве структурного элемента слоистого пластика принят квазиоднородный, анизотропный слой. Практическая реализация этого варианта сводится к следующему:

- изготовление модельного однонаправленно армированного материала с коэффициентом армирования  $\mu$  равным  $\mu$  слоистого пластика;
- экспериментальное определение независимых характеристик упругости этого материала;
- расчет свойств слоистого пластика по найденным из опыта характеристикам упругости модельного однонаправленного материала и заданной схеме укладки отдельных слоев пакета.

Основной недостаток данного варианта заключается в том, что при изменении коэффициента армирования слоистого пластика необходимо изготавливать и испытывать новые партии однонаправленного материала с соответствующими коэффициентами армирования.

Указанный недостаток исключается во втором варианте, согласно которому определение упругости слоистого пластика рассматривается на ином структурном уровне: отдельный слой пакета предполагается неоднородным и состоящим из параллельно уложенных армирующих волокон, погруженных в заполимеризованное связующее. Свойства упругости такого слоя определяются расчетным путем по характеристикам волокон и связующего. Для оценки характеристик упругости анизотропных органических волокон применяется косвенный метод, заключающийся в решении обратной задачи – определении характеристик волокна по найденным из опыта характеристикам однонаправленного органопластика с известным коэффициентом армирования. Данный вариант определения характеристик упругости слоистого пластика реализован в следующей последовательности:

- экспериментальное определение характеристик упругости связующего и модуля продольной упругости органических нитей;
- экспериментальное определение характеристик упругости модельного однонаправленного пластика;
- расчет по данным упругости однонаправленного пластика недостающих характеристик упругости арматуры;
- по найденным выше характеристикам упругости связующего и арматуры сначала рассчитываются характеристики упругости однонаправленного слоя; затем – характеристики упругости слоистого пластика с заданной схемой укладки слоев.

В методических рекомендациях рассмотрены оба варианта определения характеристик упругости слоистого пластика: по

свойствам однонаправленно армированного слоя и по свойствам арматуры и связующего. Подробно изложена методика проведения необходимых испытаний; приводятся программы на ЭВМ.

### Методические рекомендации

по определению прочности анизотропных композитных материалов на основе полимеров при плоском напряженном состоянии.

В реальных условиях эксплуатации материал в изделиях работает, как правило, в условиях сложного напряженного состояния, поэтому эффективное проектирование конструкций не может осуществляться без надежных сведений о предельном напряженно-деформационном состоянии материала. При использовании феноменологического подхода композитный материал рассматривается как однородное, анизотропное тело, а условие прочности интерпретируется в виде  $\alpha$  замкнутой поверхности в пространстве напряжений. Определение вида уравнения поверхности прочности и численных значений входящих в него параметров проводится на основе данных, полученных из испытаний при разных видах нагружения. При этом важное значение имеет не только соблюдение определенных требований к методике испытаний, выбору путей нагружения, но и правильная обработка полученных экспериментальных данных. Учитывая это, в данных методических рекомендациях комплексно рассмотрены вопросы выбора путей нагружения, техники испытаний и анализа результатов. В рекомендациях приводятся краткие общие

сведения об аналитическом описании поверхностей прочности; показаны форма и размеры образцов; описываются технические средства испытаний; обоснован выбор путей нагружения; изложена последовательность подготовки и проведения испытаний; дано описание алгоритма определения параметров уравнения поверхности прочности; приведена программа для ЭВМ; в заключение показан пример определения поверхности прочности органотекстолита.

Рекомендации распространяются на случай простого нагружения в условиях плоского напряженного состояния.

Использование данных рекомендаций позволит сократить объем испытаний, необходимых для определения поверхности прочности материала, а также повысить эффективность и надежность конструкций из современных высокопрочных композитных материалов на основе полимеров.

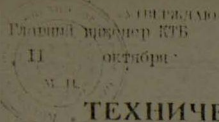
#### Методические рекомендации

по испытаниям композитных материалов на ползучесть и длительную прочность при нормальной и повышенной температурах.

Методические рекомендации составлены в целях унификации методов испытаний конструкционных композитов на ползучесть и длительную прочность, что необходимо для получения сопоставимых данных о механических характеристиках длительного сопротивления композитов в условиях нормальных и повышенных температур. Получение сопоставимых данных по ползучести и длительной прочности позволит повысить эффективность использования композитных материалов в технике, так как будет способствовать проведе-

нию расчетов конструкций из композитов с учетом характеристик длительного сопротивления этих материалов. В рекомендациях рассмотрены вопросы о выборе размеров и формы образцов, требованиях к аппаратуре и приспособлениям, подготовке и проведению испытаний, предварительной обработке и представлению результатов.

Соколов



В. А. БАТНИН

# ТЕХНИЧЕСКИЙ АКТ ВНЕДРЕНИЯ

II октября 1979 г. Хотьково, Моск. обл.

Мы, нижеподписавшиеся, представители предприятия КТБ с одной стороны, и предприятия (организации) Института механики полимеров АН Латв. ССР

(название организации)

с другой стороны, составили настоящий акт о том, что разработанные мероприятия по теме (заголовку) № 375-р от 16.03.77г. "Исследование физико-механических характеристик КМ на основе рулонных наполнителей переплеточного переплетения (в том числе комбинированных) из высокопрочных и высокожестких волокон

внедрены на предприятии (в организации) В Конструкторско-технологическом бюро

## П Е Р Е Ч Е Н Ь

внедренных мероприятий и достигнутая от внедрения эффективность

| № п.п. | Наименование внедренных мероприятий и сущность работ, выполненных в каждом мероприятии  | Достигнутая техническая эффективность (абсолютные показатели, единицы измерения, в скобках)  |
|--------|---|--|
|        | <p>Определение основных конструктивных свойств КМ на основе рулонных наполнителей—стеклотекстолитов, органо-текстолитов, стеклоорганотекстолитов, алиоборопластиков в зависимости от вида и направления приложенной нагрузки, коэффициента армирования и структурных особенностей КМ.</p> | <p>Результаты работ использованы при проектировании и изготовлении узлов соединений оболочек на КМ. Технико-экономический эффект заключается в повышении прочности и жесткости узлов соединений, а также в сокращении сроков и расходов материалов на разработку КМ с требуемыми характеристиками.</p> |

1 Показатели технического уровня, качественные параметры, структура, надежность, возможность изготовления, вес, габариты, расход сырья и материалы, уменьшение отходов продукции, рост производительности, снижение расхода энергии, экологичность, безопасность и т. п.

Экономический эффект

двести тысяч рублей

(сумма прописью)

Сумма годового экономического эффекта, произведенная в соответствии с действующими методикой и инструкциями, прилагаются.

В случае невозможности окончательного определения годового экономического эффекта на дату подписания настоящего акта необходимо в примечании указать срок, к которому этот эффект будет определен. Составленная к указываемому сроку расчет полученной экономической эффективности является продолжением к настоящему акту.

Примечание: настоящий акт не служит основанием для предъявления финансовых претензий к КТБ

Представитель предприятия КТБ  
И.м. отделения 5 Кульков А.А.

Представитель предприятия ИИИ  
Рук. темы, рук. лаборатории 44

И.м. отдела 54 Поликос В.Л.

Максимов Р.Д.

(подпись, фамилия, должность и подпись)

(подпись, фамилия, должность и подпись)

(подпись, фамилия, должность и подпись)

(подпись, фамилия, должность и подпись)

(подпись, фамилия, должность и подпись)

(подпись, фамилия, должность и подпись)

(подпись, фамилия, должность и подпись)

(подпись, фамилия, должность и подпись)



"УТВЕРЖДАЮ"

Начальник - Главный конструктор  
Конструкторско-технологического бюро

В.Д.ПРОТАСОВ

" 23 " *август* 1978 г.



### АКТ ПРИЕМА К ВНЕДРЕНИЮ

результатов НИР, изложенных в отчете "Деформационно-прочностные характеристики гибридных текстолитов (органостеклотекстолитов)" по договору № 375-Р от 16.03.77 г. между КТБ и Институтом механики полимеров АН Латв.ССР.

Мы, нижеподписавшиеся, представители предприятия КТБ, с одной стороны, и Института механики полимеров АН Латв.ССР, с другой стороны, составили настоящий акт о том, что Институтом механики полимеров в соответствии с рабочей программой договора № 375-Р от 16.03.77 г. полностью завершено выполнение предусмотренных работ рабочей программой на 1978 год и представлен отчет, в котором изложены результаты исследования упругости и кратковременной прочности органотекстолита, стеклотекстолита и гибридного (органостеклотекстолита) текстолита; составлена и экспериментально подтверждена методика прогнозирования характеристик упругости гибридных текстолитов по свойствам составляющих их двухкомпонентных текстолитов. Работа выполнена на достаточно высоком научно-техническом уровне.

В соответствии с договором КТБ принимает отчет для внедрения в целях оценки работоспособности разрабатываемых конструкций с применением тканей из высокомолекулярных органических и стеклянных нитей и полимерного связующего.

Предметом внедрения является изложенная в отчете методика прогнозирования характеристик упругости гибридных текстолитов по свойствам составляющих их двухкомпонентных текстолитов.

Эффективность использования методики достигается за счет уменьшения объема испытаний материала и уменьшения расхода дорогостоящих наполнителей гибридных текстолитов. Ожидаемый годовой экономический эффект от использования методики на предприятии составит ориентировочно 60 тыс.руб.

Представитель ИМИ  
АН Латв.ССР :

Зам.директора Института  
по научной работе

Максимов МАКСИМОВ Р.Д.  
23.11.78.

Представители К Т Б:

Начальник отдела  
В.Л. ПОЛЯКОВ

Начальник сектора  
В.Д. МЕРКУЛОВ  
23.11.78.

"УТВЕРЖДАЮ"

Начальник-Главный конструктор  
Конструкторско-технологического бюро

В.Д.ПРОТАСОВ

"22" XI 1978 г.

АКТ ПРИЕМА К ВНЕДРЕНИЮ

результатов НИР, изложенных в отчете "Исследование упругости, длительной прочности и ползучести новых композитных материалов в условиях воздействия статических нагрузок, различных температур и влажности.

(структурные компоненты органопластика; органопластик намоточный)" по договору № 77/3 от 9.02.77 г. между

КТБ и Институтом механики полимеров АН Латв.ССР.

Мы, нижеподписавшиеся, представители предприятия КТБ, с одной стороны, и Института механики полимеров АН Латв.ССР, с другой стороны, составили настоящий акт о том, что Институтом механики полимеров в соответствии с рабочей программой договора № 77/3 от 9.02.77 г. полностью завершено выполнение работ по указанному выше договору и представлен отчет и методические рекомендации, в которых изложены результаты исследования возможностей прогнозирования упругости и ползучести намоточного органопластика и длительной прочности его структурных компонент: связующего, пропитанных связующим и отвержденных (микропластик) и непропитанных нитей высокомолекулярного органического волокна. Выявлены и экспериментально подтверждены возможности прогнозирования характеристик упругости слоистых намоточных органопластиков, возможности прогнозирования ползучести однонаправленного

органопластика по свойствам микропластика и связующего, а также прогнозирования длительной прочности структурных компонент органопластика по ускоренным испытаниям при повышенных температурах. Работа выполнена на высоком научно-техническом уровне.

В соответствии с договором КТБ принимает отчет и методические рекомендации для внедрения в целях повышения эффективности разработок конструкций на основе органопластика.

Предметом внедрения являются :

1. Методические рекомендации по прогнозированию характеристик упругости слоистых намоточных органопластиков;
2. Методика прогнозирования ползучести однонаправленного органопластика по свойствам микропластика и связующего;
3. Методические рекомендации по прогнозированию длительной прочности структурных компонент органопластика.

Ожидаемый годовой экономический эффект от использования указанных выше методик составит ориентировочно 190 тыс.руб.

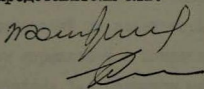
Представитель ИМП

АН Латв.ССР :

Зам.директора Института  
по научной работе

Р.Д.Максимов Р.Д.Максимов

Представители КТБ:



23.11.78.



*Г. Ветчинин*  
и

Государственный  
научно-исследовательский  
ИНСТИТУТ МАШИНОВЕДЕНИЯ  
имени академика А. А. Благонравова

№ Q13253

101830, г. Москва, ул. Грибоедова, 4. Телефон 294-98-00

Исх. №

*ИИ-4/308*

*28. ноября*

1979 г.

Директору Института механики  
полимеров АН Латв. ССР  
акад. АН Латв. ССР ЛАТИШЕНКО В. А.

В соответствии с Программой работ по реализации задания 6.1.01.04 Государственного пятилетнего плана развития народного хозяйства СССР на 1976-1980 гг. в части создания комплекса межотраслевых нормативно-технических документов "Методы расчетов и испытаний на прочность в машиностроении", утвержденной КТК Госстандарта СССР (протокол № 155 от 25 ноября 1977 г.) и в соответствии с планом Государственной стандартизации, тема 10.07, Ваш Институт является нашим соисполнителем по составлению методических указаний по методам испытаний на ползучесть и длительную прочность при растяжении при нормальной и повышенной температурах. В настоящее время подготовлена I-я редакция методических указаний. В основу её положены методические рекомендации, разработанные в лаборатории прочности Вашего института в соответствии с техническим заданием и полученные нами в мае месяце с.г.

После размножения Вам будет направлен экземпляр I-й редакции методических указаний.

Зам. директора Института,  
д. т. н., проф.

*14.12*

/Э.Г. Гудушаури/

04.12.79  
4212-58512

Утверждаю

Зам. генерального директора,

НПО "Технология"

А. Г. Савин

" 16 " 11 1979 г.

Акт приема к внедрению "Методических рекомендаций по определению прочности конструкционных материалов при плоском напряженном состоянии."

Методические рекомендации по определению прочности конструкционных материалов при плоском напряженном состоянии разработаны согласно программы работ на 1979г по договору о творческом содружестве между НПО "Технология" и Институтом механики полимеров АН Латв.ССР. Научный руководитель разработки Максимов Р.Д.

Рекомендации содержат предложения по выбору путей нагружения, техники испытаний и описания поверхностей прочности конструкционных материалов; алгоритм описания реализован в виде программы для ЭВМ.

Рекомендации составлены на достаточно высоком научно-техническом уровне и могут служить основой для разработки нормативно-технической документации, унифицирующей методы испытаний и анализа прочности конструкционных материалов при сложном напряженном состоянии (СНС).

Настоящим актом подтверждается приём методических рекомендаций для внедрения путем использования их в качестве основы для разработки в нашем объединении методики испытаний конструкционных материалов в условиях СНС, а в дальнейшем (при проведении широких исследований и накоплении статических данных) для разработки отраслевых нормативов на методы испытаний материалов конструкционного назначения в условиях сложного напряженного состояния. Условный годовой экономический эффект использования рекомендаций составит 70,0 тыс. рублей.

Руководитель работы от НПО "Технология"

Начальник лаборатории

В. А. Локшин

16. XI. 79