

УДК 623.74
МРНТИ 05.07.00

Т. З. Макаев, Е. Т. Ескибаев, Н. М. Тумышев

*Военный институт Сил воздушной обороны имени Т. Я. Бегельдинова,
Актобе, Казахстан*

К ВОПРОСУ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛОВЫХ ДЕФОРМАЦИЙ СТЕКЛОПЛАСТИКОВ

Аннотация. Сложность физико-химических процессов, протекающих в стеклопластиках в условиях высокоинтенсивных температурных воздействий, затрудняет аналитическое исследование тепловых деформаций и напряжений в конструкциях и приводит к необходимости их изучения экспериментальным путем. Авторы статьи проводят исследование тепловых деформаций стеклопластиков при одностороннем нагреве. И для исследования была создана установка, конструктивная схема которой показана на рисунке 1. Исследование деформативности выполнялось на прямоугольных образцах из стеклопластика на основе стеклоткани и фенолформальдегидной смолы. Испытания проводились при одностороннем воздействии переменных температур. Нагрев осуществлялся по линейным законам, затем происходило естественное охлаждение. С увеличением скорости нагрева температура термодеструкции распространяется на меньшую глубину, и тепловая деформация будет определяться температурным расширением зон, не подверженных деструкции.

Ключевые слова: тепловая деформация, проволоочный тензодатчик, усилитель тензометрических измерений ТА-5, миллиамперметр КСУ-4, хромель-алюмелевый термопар, многоточечный потенциометр КСП-4, нагревательный элемент, электронный потенциометр ЭПП-09, электронное программное устройство РУ5-02М, электронное регулирующее устройство РУ4-16М.

Введение

Беспилотные летательные аппараты (БПЛА) начали разрабатываться в первой половине 20-го века для военных, а впоследствии и гражданских целей. Развитие технологий привело к уменьшению массогабаритных параметров и повышению маневренности БПЛА и способствует росту потребности в создании новых материалов, в частности композиционных. Благодаря таким материалам возможно создание более прочных и легких элементов конструкции аппарата, что повышает его летно-технические характеристики [1-4].

Сложность физико-химических процессов, протекающих в стеклопластиках в условиях высокоинтенсивных температурных воздействий, затрудняет аналитическое исследование тепловых деформаций и напряжений в конструкциях и приводит к необходимости их изучения экспериментальным путем.

Целью исследования является изучение зависимости тепловых деформаций стеклопластиков при одностороннем нагреве в авиационных конструкциях.

Задачи исследования.

1. Зависимости тепловой деформации от температуры на нагреваемой поверхности для различных скоростей нагрева.

2. Влияние теплопроводности композитного материала в зависимости от времени в характерных для них тепловых режимах.

Метод исследования

Для исследования создана установка, конструктивная схема которой показана на рисунке 1. Для имитации реальных условий эксплуатации образец 1, защемленный на основании 4 с помощью планки 5, размещается на подложке 17. Для уменьшения трения и теплопередачи между образцом и подложкой помещается слюдяная прокладка 16. Для исключения краевых эффектов боковые поверхности образца теплоизолируются базальтовым волокном.

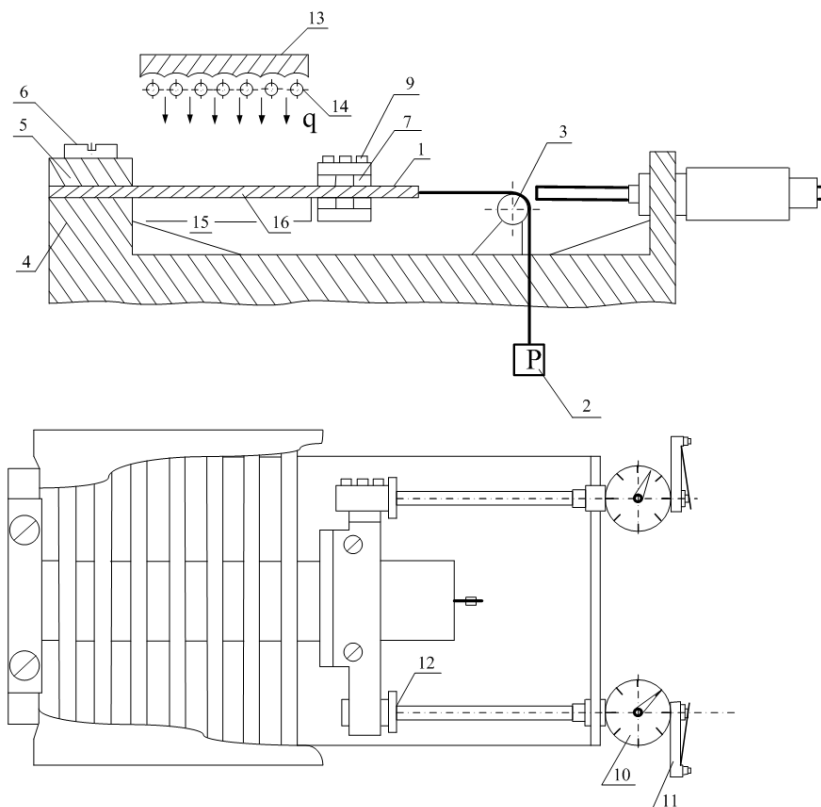


Рисунок 1 – Конструктивная схема установки

Предварительное нагружение при необходимости осуществляется грузом 2. Замер деформаций осуществляется с помощью специального приспособления, состоящего из ножей 7, 8, закрепленных на базе образца с помощью винтов 9. Запись деформаций ведется автоматически посредством тензометрической приставки 11. Проволочные тензодатчики, наклеенные на упругие элементы, преобразуют линейные перемещения штоков в электрический сигнал, который после усилителя тензометрических измерений ТА-5 регистрируется миллиамперметром КСУ-4. Для визуальной настройки системы записи деформаций и контроля замеров в ходе испытания предусмотрены два индикатора часового типа.

Температура на поверхностях образца замеряется хромель-алюмелевыми термопарами 15, 16 и регистрируется многоточечным потенциометром КСП-4.

Для одностороннего высокотемпературного нагрева применяется малоинерционная печь лучистого нагрева. Характерная особенность этой печи – способность обеспечивать нагрев как на воздухе и в вакууме, так и в специальных средах. Печь оказывается удобной и в тех случаях, когда источник нагрева не должен загрязнять нагреваемый объект. Нагревательный элемент выполнен из кварцевых ламп 14, расположенных в фокусах параболических поверхностей экрана 13. Необходимая однородность температурного поля по длине образца достигается равномерным расположением по площади рабочей зоны нагревателя большого количества ламп одного типа.

Программное регулирование температуры осуществляется с помощью следящей системы [5], в которую входят электронный потенциометр ЭПП-09, электронное программное устройство РУ5-02М и электронное регулирующее устройство РУ4-16М.

Исследование деформативности выполнялось на прямоугольных образцах 6х15х300 мм из стеклопластика на основе стеклоткани и фенолформальдегидной смолы. Испытания проводились при одностороннем воздействии переменных температур в диапазоне скоростей нагрева от 3 до 7 град/сек. Нагрев осуществляется по линейным законам до 800°С, затем происходило естественное охлаждение.

Зависимости тепловой деформации от температуры на нагреваемой поверхности для различных скоростей нагрева представлены на рисунке 2. Развитие деформации до температуры 400°С в зависимости от скорости нагрева показано на рисунке 3. На рисунке 4 изображены графики изменения температур во времени в различных точках по толщине образца для скорости нагрева 5,5 град/сек.

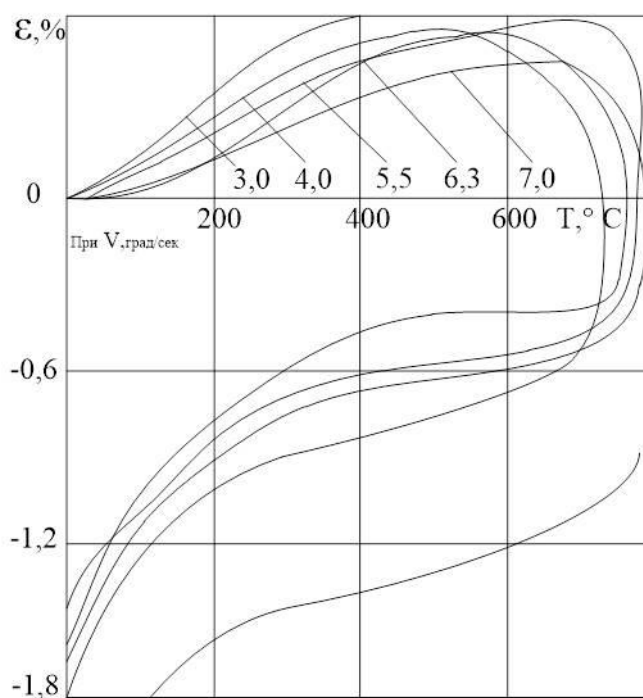


Рисунок 2 – Зависимости тепловой деформации от температуры

Результаты и обсуждения

Анализ полученных зависимостей показывает, что при температуре поверхности до 400°C с увеличением скорости нагрева тепловая деформация уменьшается. В то же время с увеличением интенсивности теплового потока максимальная положительная деформация несколько уменьшается и смещается в сторону более высоких температур. Это объясняется тем, что тепловое деформирование определяется соотношением зон материала, где температура достигла значений, при которых начинается деструкция связующего и зон, не подверженных структурным превращениям. Температура начала деструкции находится для данного материала в пределах 350-400°C, то есть начиная с этих температур начинается «усадка».

Зоны материала, не подверженные термодеструкции, расширяются за счет коэффициента линейного расширения, зависящего от температуры. Распределение по сечению этих зон определяется полем температур по толщине образца (рисунок 4).

С увеличением скорости нагрева температура термодеструкции распространяется на меньшую глубину, и тепловая деформация будет определяться температурным расширением зон, не подверженных деструкции.

Так как композитный материал обладает малой теплопроводностью и большой теплоемкостью, тепловое деформирование будет, кроме того, зависеть от времени, в течение которого соответствующие зоны пребывают в характерных для них тепловых режимах.

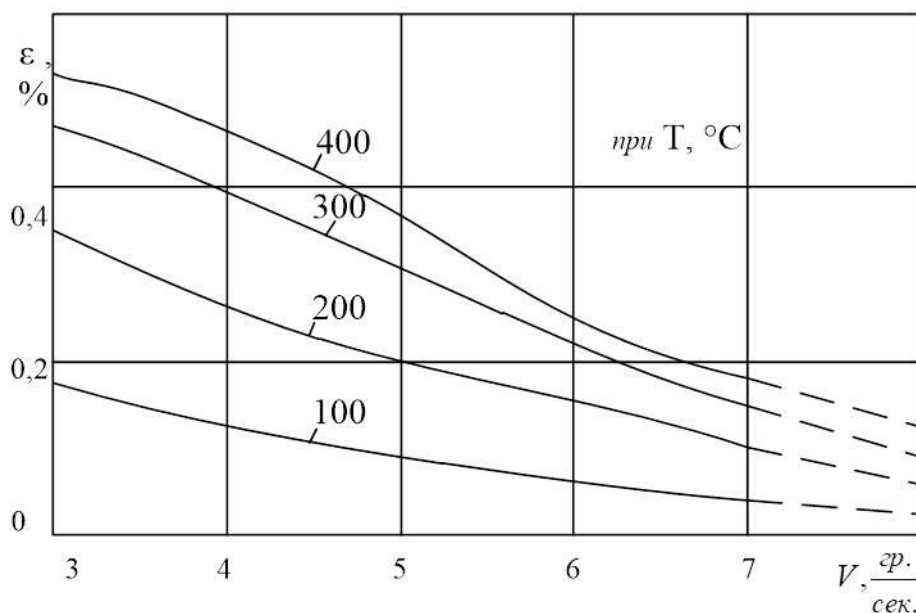


Рисунок 3 – Зависимости тепловой деформации от скорости нагрева

Интенсивность процесса усадки превосходит интенсивность теплового расширения. Этим и можно объяснить уменьшение деформаций в тот период, когда усадка в меньшем по сечению объеме доминирует над температурным расширением большего по толщине слоя (рисунок 2, 4).

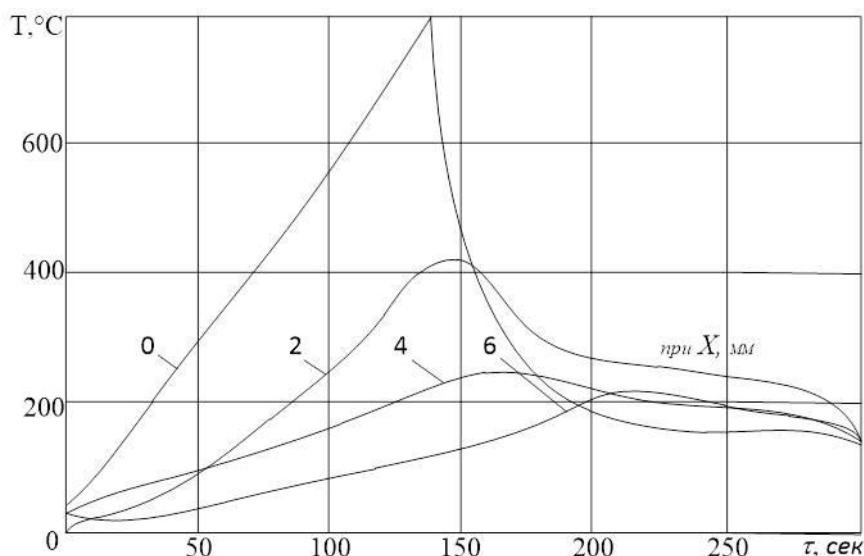


Рисунок 4 – Графики изменения температуры

В условиях естественного охлаждения деформации в первом приближении развивается адекватно. Это объясняется тем, что охлаждение нагреваемой поверхности приближенно можно считать одинаковым во всем диапазоне скоростей нагрева.

При естественном охлаждении деформации охлаждающихся слоев и продолжающееся расширение более глубоких слоев вызывает значительные термические напряжения, являющиеся одной из причин появления трещин на поверхности образца.

Заключение

Таким образом, можно сделать следующие выводы: развитие тепловых деформаций при одностороннем нагреве определяется интенсивностью теплового потока и температурным полем по сечению образца; с увеличением скорости нагрева максимум положительной тепловой деформации смещается в сторону более высоких температур.

«Усадка» оказывает существенное влияние на общую тепловую деформацию и при высоких температурах является определяющей; охлаждение (естественное) вызывает дальнейшее увеличение отрицательной деформации, что приводит к появлению трещин на поверхности образца.

Список литературы

1. Keane J.F., Carr S.S. A Brief History of Early Unmanned Aircraft // Johns Hopkins APL Technical Digest. – 2013. – Vol. 32, No. 3. – P. 558–571.
2. Borchardt J.K. Unmanned aerial vehicles spur composites use // Reinforced Plastics. – 2004. – Vol. 48, Issue 4. – P. 28–31. – DOI: 10.1016/S0034-3617(04)00194-8.
3. Rekatsinas C.S., Dimitriou D.K., Chrysochoidis N.A. A Road Map to the Structural Optimization of a Type-C Composite UAV // Aerospace. – 2024. – Vol. 11, No. 3. – Article 211. – DOI: 10.3390/aerospace11030211.

4. Yilmaz M.A., Hasirci K., Gündüz B., Irez A.B. Advanced composite wing design for next-generation military UAVs: A progressive numerical optimization framework // Defence Technology. – 2025. – (Article in press). – DOI: 10.1016/j.dt.2025.02.020.

5. Первушин Ю.С., Зайнуллин В.В. Автоматическое устройство для исследования композитных материалов по заданной программе // Труды УАИ, Уфа. – 1973. – вып. 49.

References

1. Keane J.F., Carr S.S. A Brief History of Early Unmanned Aircraft // Johns Hopkins APL Technical Digest. – 2013. – Vol. 32, No. 3. – P. 558–571.

2. Borchardt J.K. Unmanned aerial vehicles spur composites use // Reinforced Plastics. – 2004. – Vol. 48, Issue 4. – P. 28–31. – DOI: 10.1016/S0034-3617(04)00194-8.

3. Rekatsinas C.S., Dimitriou D.K., Chrysochoidis N.A. A Road Map to the Structural Optimization of a Type-C Composite UAV // Aerospace. – 2024. – Vol. 11, No. 3. – Article 211. – DOI: 10.3390/aerospace11030211.

4. Yilmaz M.A., Hasirci K., Gündüz B., Irez A.B. Advanced composite wing design for next-generation military UAVs: A progressive numerical optimization framework // Defence Technology. – 2025. – (Article in press). – DOI: 10.1016/j.dt.2025.02.020.

5. Pervushin Yu.S., Zajnullin V.V. Avtomaticheskoe ustrojstvo dlya issledovaniya kompozitnyh materialov po zadannoј programme. Trudy UAI, vyp. 49, Ufa, 1973.

Т. З. Мақаев, Е. Т. Ескібаев, Н. М. Тұмышев

*Т. Ж. Бигелдинов атындағы Әуе қорғаныс күштері Әскери институты
Ақтөбе, Қазақстан*

ШЫНЫ ПЛАСТИКТЕРДІҢ ЖЫЛУЛЫҚ ДЕФОРМАЦИЯЛАРЫН ЗЕРТТЕУ МӘСЕЛЕСІ

Аңдатпа. Жоғары қарқынды температуралық әсерлер жағдайында пластикалық пластмассаларда болатын физика-химиялық процестердің күрделілігі құрылымдардағы жылулық деформациялар мен кернеулерді аналитикалық зерттеуді қиындатады және оларды эксперименталды түрде зерттеу қажеттілігіне әкеледі.

Мақала авторлар бір жақты қыздару кезінде шыны талшықты пластмассалардың термиялық деформацияларын зерттеуді жүргізеді. Ал зерттеу үшін конструкторлық схемасы 1-суретте көрсетілген қондырғы жасалды. Деформацияланғыштығын зерттеу шыны талшық пен фенолформальдегидті шайыр негізіндегі шыны талшықтан жасалған тәкбұрышты үлгілерде жүргізілді. Сынақтар орындалды айнымалы температуралардың тәуелсіз әсері. Жылыту сызықтық заңдарға сәйкес жүргізілді, содан кейін табиғи салқындату пайда болды. Қыздыру жылдамдығын жоғарылауымен термиялық бұзылу температурасы таяз тереңдікке таралады, ал термиялық деформация жойлуға жатпайтын аймақтардың термиялық кеңеюімен анықталады.

Түйінді сөздер: термиялық деформациялар, сым тензометрлер, ТА-5 тензометрді өлшеу күшейткіші, миллиамперметр КСУ-4, хромель-алюмельді терможұптар, көп нүктелі потенциометр КСП-4, қыздыру элементі, электронды потенциометр ЭПП-09, элетрондық бағдарламалық құрылғы РУ5-02М, элетронды басқару құрылғысы РУ4-16М.

T. Z. Makaev, E. T. Eskibaev, N. M. Tumyshev

*Military Institute of Air Defense Forces named after T.Ya. Begeldinov,
Aktobe, Kazakhstan*

ON THE INVESTIGATION OF THERMAL DEFORMATIONS OF FIBERGLASS

Abstract. The complexity of physical and chemical processes occurring in fiberglass under conditions of high-intensity temperature effects complicates. The analytical study of thermal deformations and stresses in structures and leads to the need to study them experimentally.

The authors of the article conduct a study of thermal deformations of fiberglass with one-sided heating. And for the study, an installation was created, the design scheme of which is shown in Figure 1. The study of deformability was carried out on rectangular samples of fiberglass based on glass fabric and phenol-formaldehyde resin. The tests were carried out with one-sided exposure to variable temperatures. Heating was carried out according to linear laws, then natural cooling occurred. With an increase in the heating rate, the temperature of thermal destruction spreads to a smaller depth, and thermal deformation will be determined by the temperature expansion of zones not subject to destruction.

Keywords: thermal deformation, wire strain gauges, strain gauge measurement amplifier TA-5, milliammeter KSU-4, chromel-alumel thermocouples, multipoint potentiometer KSP-04, heating element, electronic potentiometer EPP-09, electronic programming device RU5-02M, electronic control device RU4-16M.

Сведения об авторах / Information about the authors

Макаев Тимур Зинурович – заместитель начальника кафедры общинженерных дисциплин Учебно-методического управления Военного института Сил воздушной обороны имени Т.Я. Бегельдинова, Актобе, Казахстан. E-mail: mtz-78@mail.ru

Ескибаев Ербол Токтамысович – кандидат технических наук, первый заместитель начальника Военного института Сил воздушной обороны имени Т.Я. Бегельдинова, Актобе, Казахстан

Тумышев Нурлан Маденбаевич – начальник учебного отдела Учебно-методического управления Военного института Сил воздушной обороны имени Т.Я. Бегельдинова, Актобе, Казахстан

Timur Z. Makaev – Deputy Head of the Department of General Engineering Disciplines of the Educational and Methodological Department of the Military Institute of the Air Defense Forces named after T.Ya. Begeldinov, Aktobe, Kazakhstan. E-mail: mtz-78@mail.ru

Yerbol T. Yesskibaev – Candidate of Technical Sciences (PhD in Engineering), First Deputy Head of the Military Institute of the Air Defense Forces named after T.Ya. Begeldinov, Aktobe, Kazakhstan

Nurlan M. Tumyshev – Head of the Educational Department of the Educational and Methodological Directorate of the Military Institute of the Air Defense Forces named after T.Ya. Begeldinov, Aktobe, Kazakhstan