

Определение механических напряжений, возникающих в полимерных стеклах в процессе эксплуатации

Е.А.Бобина, Л.А.Гимадеева, М.П.Данилаев

Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н.Туполева

Аннотация: В данной статье проанализированы методы определения механических напряжений, возникающих в полимерных стеклах в процессе эксплуатации. Цель исследования состоит в выборе наиболее целесообразного метода определения механических напряжений, возникающих в процессе эксплуатации в полимерных стеклах. Для достижения поставленной цели проведен количественный анализ пьезоэлектрического эффекта в поликарбонате, возникающего под действием нагрузки. Сделан вывод о возможности применения этого метода, для определения механических напряжений в поликарбонате. Сформулированы преимущества этого метода по сравнению с типовыми методами определения механических напряжений, используемых в настоящее время.

Ключевые слова: полимерные стекла, механические напряжения, поликарбонат, пьезоэффект, возможность применения, сравнительный анализ методов

Полимерные стекла широко используются для остекления, например, витрин, аквапарков, кабин летательных аппаратов и пр. В процессе эксплуатации таких стекол требуется определять возникающие в них механические напряжения [1,2]. Основной проблемой при выборе метода измерения механических напряжений, возникающих в процессе эксплуатации полимерных стекол, является необходимость одновременного обеспечения ряда требований (например, сохранение обзора, измерение поля напряжений и пр.), которые зачастую являются сложно реализуемыми одновременно. Таким образом, актуальной задачей является выбор метода контроля состояния полимерных стекол в процессе их эксплуатации.

Целью данной работы является обоснование выбора наиболее целесообразного метода определения механических напряжений, возникающих в процессе эксплуатации в полимерных стеклах.

Обоснование наиболее целесообразного метода определения напряжений, возникающих в процессе эксплуатации в полимерных стеклах, проведем на основе сопоставительного анализа существующих методов.

Существующие методы возможно разделить на две группы – резонансные и нерезонансные. Резонансные методы основаны на определении изменений в спектрах полимерных молекул [3]. Возникающие неоднородности в полимерном стекле приводят к изменению числа степеней свободы полимерных молекул, что, в свою очередь, приводит к изменению типового спектра полимерного материала. К таким методам относятся методы инфракрасной спектроскопии, ядерного квадрупольного резонанса (ЯКР) и т.д. Нерезонансные методы основаны на физических явлениях, происходящих на структурных неоднородностях, например, двулучепреломление, дифракция ультразвуковой волны, пьезоэффект, рассеяние и т.д. [4,5].

Основным полимерным стеклом, наиболее часто используемым в настоящее время, является поликарбонат [6]. Поэтому обоснование выбора наиболее целесообразного метода определения напряжений в полимерных стеклах будем проводить для поликарбоната. Следует отметить, что этот материал обладает слабовыраженным пьезоэлектрическим эффектом [7, 8], что может оказаться перспективным для решения задачи определения механических напряжений [9].

Зависимость между механическими напряжениями, возникающими в материале, и разностью потенциалов в линейном приближении представляется в виде [10]:

$$U = \frac{d \cdot \sigma \cdot h}{\varepsilon \cdot \varepsilon_0}. \quad (1)$$

В качестве примера рассмотрим прямоугольную пластину из поликарбоната, закрепленную по всему периметру (рис.1).

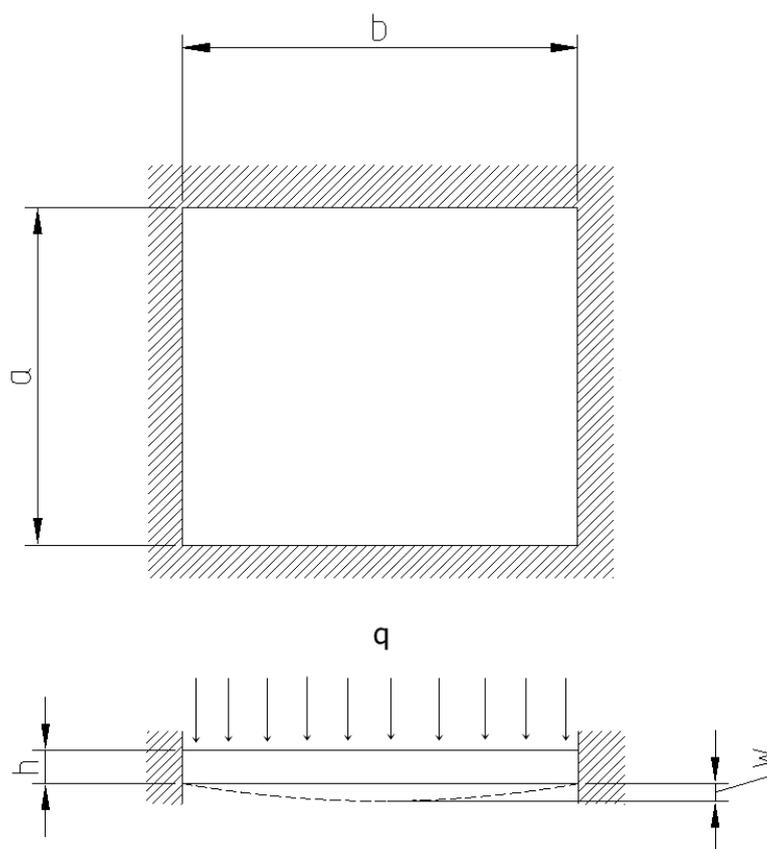


Рис.1. Пластина с закрепленным контуром

Перпендикулярно к пластине прилагается нагрузка q . Определим наибольший прогиб пластины ω , максимальное механическое напряжение σ_{\max} и соответствующее ему значение электрического напряжения U (1), возникающее за счет пьезоэлектрического эффекта под действием нагрузки q .

Максимальный прогиб (рис.1) пластины определяется по формуле [11]:

$$\omega = \frac{12 \cdot k_1 \cdot q \cdot a^4 \cdot (1 - \mu^2)}{E \cdot h^3}, \quad (2)$$

где $k_1=0.00406$ – справочная постоянная [11]; $q=4.468 \text{ Н/м}^2$ – равномерно распределенная нагрузка (для примера взята типовая ветровая нагрузка [12]); $a=1 \text{ м}$ – ширина материала; $\mu = 0.35$ – коэффициент Пуассона; $E=2300 \cdot 10^6 \text{ Н/м}^2$ – модуль упругости; $h=0,015 \text{ м}$ – толщина материала; $\omega = 2.461 \cdot 10^{-5} \text{ м}$

Напряжение в точках действия максимального момента [11]:

$$\sigma_{\max} = \frac{6 \cdot k_2 \cdot q \cdot a^2}{h^2} \quad (3)$$

$\sigma_{\max} = 5.707 \text{ кПа}$ ($k_2=0.0479$ – справочная постоянная [11]), что не превышает предельное изгибное напряжение ($\sigma = 150 \text{ МПа}$) в поликарбонате. Значение напряжения (1), соответствующее σ_{\max} , составляет 9.67 В при $d = 3 \cdot 10^{-12} \text{ м/В}$ – пьезомодуль поликарбоната [13]; $\varepsilon = 3$ - диэлектрическая проницаемость поликарбоната; ε_0 - диэлектрическая постоянная.

Напряжение $U=9.67$ В возможно измерить с использованием типовых средств измерений при удовлетворительном отношении сигнал/шум. Таким образом, метод, основанный на пьезоэффекте, возможно использовать в качестве метода определения механических напряжений в поликарбонате, что будет учтено при проведении сопоставительного анализа существующих методов определения механических напряжений в полимерных стеклах.

Основными критериями для сравнения методов определения механических напряжений, возникающих в полимерных стеклах в процессе их эксплуатации, являются:

- 1) постоянный мониторинг внутренних напряжений в полимерных стеклах;
- 2) сохранение обзора при постоянном мониторинге механических напряжений;
- 3) возможность проведения измерений при загрязнении поверхности стекла;
- 4) сохранение физико-механических характеристик полимерного стекла;
- 5) датчики, используемые для реализации метода определения внутренних напряжений, должны быть устойчивыми к внешним воздействиям (механическим, климатическим, воздействию пыли и воды)
- 6) Отношение сигнал/шум должно быть большим единицы.

Результаты сопоставительного анализа методов определения механических напряжений представлены в таблице 1, на основании обобщения работ по этому направлению, например, [1-18]. В таблице 1 приняты следующие обозначения: «+» - критерий выполняется; «-» - критерий не выполняется.

Таблица 1

| Название метода | Точность | Неразрушающий контроль | Измерение поля напряжений | Измерения на сложных поверхностях | Исследование больших поверхностей | Измерения при загрязнении поверхности | Сохранение обзора | Сохранение физ.-мех. характеристик объекта | Постоянное определение напряжений | Реализация без встраивания датчиков в конструкцию стекла | Решение обратной задачи | Стойкость датчиков к внешним воздействиям | Устойчивость к помехам |
|--|------------------|------------------------|---------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------------|-------------------|--|-----------------------------------|--|-------------------------|---|------------------------|
| Резонансные методы | | | | | | | | | | | | | |
| Тензорная томография остаточных напряжений | 10 ⁻² | + | + | + | - | - | + | + | + | + | да | + | + |
| Метод ЯКР | 10 ⁻⁴ | + | + | +/- | + | -/+ | - | - | + | - | нет | + | + |
| Спектроскопии комбинационного рассеяния | 10 ⁻³ | + | - | +/- | + | - | + | - | + | - | нет | + | + |
| Нерезонансные методы | | | | | | | | | | | | | |
| Ультразвуковой | 10 ⁻² | + | + | -/+ | +/- | +/- | - | + | - | + | нет/да | + | - |
| Пьезоэффект | | + | -/+ | + | + | + | + | + | + | +/- | нет/да | + | + |
| Поляризационно-оптический | 10 ⁻³ | + | -/+ | -/+ | + | - | + | + | -- | + | нет | - | + |
| Теневого | 10 ⁻² | + | + | + | +/- | - | + | + | +/- | + | нет | - | + |
| Тепловой | 10 ⁻⁴ | + | + | + | + | - | + | + | - | +/- | нет | - | - |
| Рентгенографический | 10 ⁻⁴ | - | + | -/+ | - | +/- | + | - | - | + | нет | - | - |
| Дифракционный | 10 ⁻³ | + | + | + | + | -/+ | + | + | + | + | нет | - | + |
| Анализ распределения интенсивности | 10 ⁻³ | + | -/+ | - | + | - | - | + | - | + | нет | | + |

| Название метода | Точность | Неразрушающий контроль | Измерение поля напряжений | Измерения на сложных поверхностях | Исследование больших поверхностей | Измерения при загрязнении поверхности | Сохранение обзора | Сохранение физ.-мех. характеристик объекта | Постоянное определение напряжений | Реализация без встраивания датчиков в конструкцию стекла | Решение образной задачи | Стойкость датчиков к внешним воздействиям | Устойчивость к помехам |
|-----------------------------------|-----------|------------------------|---------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------------|-------------------|--|-----------------------------------|--|-------------------------|---|------------------------|
| рассеянного света | | | | | | | | | | | | | |
| Механолюминесцентные сенсоры | 10^{-6} | + | + | + | + | + | - | + | + | - | нет | + | + |
| Голографическая интерферометрия | 10^{-6} | + | + | - | + | - | + | + | - | + | нет | + | + |
| Электронная спекл-интерферометрия | 10^{-9} | + | + | - | + | - | + | + | + | + | нет | + | + |
| Капиллярный | 10^{-3} | + | + | + | + | - | - | + | +/- | +/- | нет | - | -/+ |

Согласно таблице наиболее целесообразными методами определения механических напряжений, возникающих в процессе эксплуатации в полимерных стеклах, являются: метод механолюминесцентных сенсоров (недостатки: реализация без встраивания датчиков в конструкцию стекла невозможна, а люминесценция будет оказывать влияние на обзор) [19]; электронная спекл-интерферометрия (недостатки: невозможность проведения измерений при загрязнении поверхности и на сложных поверхностях) [16]; метод на основе пьезоэффекта (преимущества: его реализация не предполагает встраивание датчиков в конструкцию стекла, проводимые измерения не будут мешать обзору, а загрязнение поверхности исследуемого материала не мешает измерениям; недостатки: невозможность оперативного измерения поля напряжений).

Таким образом, наиболее целесообразным из рассмотренных методов является метод, основанный на явлении пьезоэффекта. Проблема диагностики состояния полимерных стекол в процессе эксплуатации с



помощью этого метода требует проведения дальнейших обсуждений и исследований.

Литература

1. Никольский А.М., Бир Е.Ш., Никольская Г.Ф. Оценка внутренних напряжений в изделиях из поликарбоната // Пласт. массы. 1971. № 7. С. 30-31.
2. A. Ram, O. Zilber, S. Kenig Residual stresses and toughness of polycarbonate exposed to environmental conditions // Polymer Engineering & Science, 1985. Volume 25. Issue 9. pp. 577-581.
3. Черепанов В.И. Резонансные методы исследования вещества // Соросовский образовательный журнал, 1997. №9. С. 86-90
4. Серебренников В.Л., Демченко И.И., Серебрянников А.В. Исследование дифракции ультразвука для определения внутренних локальных напряжений в конструкционных материалах // Известия вузов. Горный журнал, 2013. №4. С. 143-150
5. Мартыненко А.В. Исследование параметров осесимметричного изгибного пьезоэлектрического преобразователя при различных граничных условиях // Инженерный вестник Дона, 2010, № 3 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2010/206
6. Muthu Ram Prabhu E, Nisha Felcy J, Yogeshwari R, Thooyavan M, Madhan Kumar A Structural Analysis Of Lexan Polycarbonate // International journal of technology enhancements and emerging engineering research, 2016. Volume 3. Issue 4. Pp. 70-73.
7. Луццейкин Г.А. Полимерные пьезоэлектрики // Химия, М.- 1990. 190 с.



8. А.А. Панич, М.А. Мараховский, Д.В. Мотин Кристаллические и керамические пьезоэлектрики // Инженерный вестник Дона, 2011, №1 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2011/325

9. Головнин В.А., Каплунов И.А., Малышкина О.В., Педько Б.Б., Мовчигова О.В. Физические основы, методы исследования и практическое применение пьезоматериалов // Москва: Техносфера, 2013. 272 с.

10. Седалищев В.Н. Физические основы получения измерительной информации с использованием генераторных и параметрических первичных преобразователей: Учеб. Пособие // Алт. гос. техн. ун-т им. И.И. Ползунова. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2008. 170 с.

11. Тимошенко С.П. Пластины и оболочки // Изд. физико-математической литературы, 1963. 635 с.

12. Определение снеговой и ветровой нагрузки. Ангар 36. Москва, 2017. URL: angar36.ru/karta-vetrovux-snegovux-i-sejsmicheskix-rajonov-rossii/

13. Гальченко А. Монолитный поликарбонат (общие свойства) Юнион Трейд. Москва, 2011. URL: strplast.ru/material/policarb/monolit/article01/

14. Пуро А.Э., Каров Д.Д. Тензорная томография остаточных напряжений // Оптика и спектроскопия, 2007. т.103. №4. С. 698-703.

15. Миронов Ю.М. Применение спектроскопии комбинационного рассеяния для исследований полимерных композиционных материалов // Наука и образование электронный научно-технический журнал, 2012. т.7. С. 33-40.

16. Рябухо В.П. Спекл-интерферометрия // Соросовский образовательный журнал, 2001 т.7 №5 С. 1-9

17. Горинов Д.А. Изучение термомеханического межкомпонентного взаимодействия в твердых композиционных материалах методом ЯКР: автореф. дис. на соиск. учен. степ. канд. ф.-м. наук (01.04.07) / Горинов



Денис Александрович; Пермский государственный университет. – Пермь, 2000. – 16 с.

18. Александров А.Я., Ахметзянов М.Х. Поляризационно-оптические методы механики деформируемого тела // Главная редакция физико-математической литературы изд-ва «Наука», 1973. 576 с.

19. Макарова Н.Ю., Шахтарин Б.И. Система мониторинга напряженно-деформированного состояния композиционных конструкций на основе механолюминесцентных сенсоров // Научный вестник МГТУ ГА, 2017. Т.20.№5. С.152-160

References

1. Nikol'skij A.M., Bir E.Sh., Nikol'skaja G.F. Plast. massy. 1971. № 7. pp. 30-31.

2. A. Ram, O. Zilber, S. Kenig Polymer Engineering & Science, 1985. Volume 25. Issue 9. pp. 577-581.

3. Cherepanov V.I. Sorosovskij obrazovatel'nyj zhurnal, 1997. №9. pp. 86-90.

4. Serebrennikov V.L., Demchenko I.I., Serebrjannikov A.V. Izvestija vuzov. Gornyj zhurnal, 2013. №4. pp. 143-150.

5. Martynenko A.V. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2010, № 3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2010/206

6. Muthu Ram Prabhu E., Nisha Felcy J., Yogeshwari R., Thooyavan M., Madhan Kumar A. International journal of technology enhancements and emerging engineering research, 2016. Volume 3. Issue 4. Pp. 70-73.

7. Lushhejkin G.A. Polimernye p'ezojelektriki [Polymer piezoelectrics] Himija, M. 1990. 190 p.

8. A.A. Panich, M.A. Marahovskij, D.V. Motin Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2011, №1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2011/325

9. Golovnin V.A., Kaplunov I.A., Malyskina O.V., Ped'ko B.B., Movchikova O.V. Fizicheskie osnovy, metody issledovanija i prakticheskoe primenenie p'ezomaterialov [Physical basis, research methods and practical application of piezomaterials]. Moskva: Tehnosfera, 2013. 272 p.

10. Sedalishhev V.N. Fizicheskie osnovy poluchenija izmeritel'noj informacii s ispol'zovaniem generatornyh i parametricheskikh pervichnyh preobrazovatelej: Ucheb. Posobie [Physical Basis for Obtaining Measurement Information Using Generator and Parametric Primary Transducers: Proc. Allowance]. Alt. gos. tehn. un-t im. I.I. Polzunova. Barnaul: Izd-vo AltGTU, 2008. 170 p.

11. Timoshenko S.P. Plastiny i obolochki [Plates and Shells] Izd. fiziko-matematicheskoy literatury, 1963. 635 p.

12. Opredelenie snegovoj i vetrovoj nagruzki. Angar 36. Moskva, 2017. URL: angar36.ru/karta-vetrovyx-snegovyx-i-sejsmicheskix-rajonov-rossii/

13. Gal'chenko A. Monolitnyj polikarbonat (obshhie svoystva). Junion Trejd. Moskva, 2011. URL: strplast.ru/material/policarb/monolit/article01/

14. Puro A.Je., Karov D.D. Optika i spektroskopija, 2007. v.103. №4. pp. 698-703.

15. Mironov Ju.M. Nauka i obrazovanie jelektronnyj nauchno-tehnicheskij zhurnal, 2012. v.7. pp. 33-40.

16. Rjabuho V.P. Sorosovskij obrazovatel'nyj zhurnal, 2001. v.7 №5 pp. 1-9.

17. Gorinov D.A. Izuchenie termomechanicheskogo mezhkomponentnogo vzaimodejstvija v tverdyh kompozicionnyh materialah metodom JaKR [The study of the thermomechanical intercomponent interaction in solid composite materials by the NQR method]: autoref. dis. na soisk. uchen. step. kand. f.-m. nauk (01.04.07) Gorinov Denis Aleksandrovich; Permskij gosudarstvennyj universitet. Perm', 2000. 16 pp.



18. Aleksandrov A.Ja., Ahmetzjanov M.H. Poljarizacionno-opticheskie metody mehaniki deformiruемого tela [Polarization-optical methods of deformable body mechanics]. Glavnaja redakcija fiziko-matematicheskoy literatury izd-va «Nauka», 1973. 576 pp.

19. Natalia Yu. Makarova, Boris I. Shakhtarin Civil Aviation High Technologies, 2017. V.20. №5. Pp.152-160.