FRI-1.417-2-MEMBT-02

NUMERICALLY SIMULATING THE IMPACT OF HAIL IN PHOTOVOLTAIC PANEL⁴

Assistant Prof. Ivo Draganov, PhD

Department of Technical Mechanics, "Angel Kanchev" Univesity of Ruse Tel.: 082-888 224 E-mail: iivanov@uni-ruse.bg

Abstract: A numerical model of a low velocity impact from a hail to the photovoltaic panel is created. The hailstone is modeled with smoothed particle hydrodynamics method. The photovoltaic panels are modeled with finite elements like a laminate structure. The glass is modeled with user defined brittle fracture material model. The cracks patterns and the stress in a silicon cells are obtained for different locations of impact.

Keywords: Photovoltaic panel, Hailstone, Low velocity impact, Finite element method, Smoothed particle hydrodynamics.

въведение

Фотоволтаичните панели, предмет на разглеждане в тази работа, са изградени от горен и долен стъклен слой, херметизиращ слой от етилен-винил ацетат (EBA) и фотоволтаична клетка, която от своя страна се състои от двойка силициеви плочки, покрити от едната страна със сребърен, а от другата страна със алуминиев слой и електрически връзки (Roberts 2009), (Markvart 2003). Фотоволтаичните модули са подложени на климатични въздействия: натоварване от вятър и сняг, температурни изменения, градушка и ултравиолетови лъчи (Al-Habahbeh 2013). Компонентите, които са подложени на въздействието на градушките са окабеляването, металните стойки и рамки, стъклените слоеве, фотоволтаичните клетки и херметизиращия слой.

Ударът от град над определени размери причинява във фотоволатичния панел повреждане на стъкления слой (Moore 1978), (Troshin 1988), (Osterwald 2009). В работата (Koontz 2012) са представени резултати за производителността на твърди и гъвкави фотоволтаични панели след въздействието на ледени топки. Съществуват стандарти, които регламентират изпитанията на удар от ледена или стоманена топка (ASTM E1038-05).

Редица работи са посветени на численото моделиране на механичните климатични въздействия върху фотоволтаичните панели (Hasan 2012), (Altenbach 20016), но моделите на удар от град не отчитат увреждането на стъкления слой.

Възникването на пукнатини в ламинатни стъкла може да се моделира чрез механика на увреждането (Lamaitre 1996), (Johnson 2006). В работата на Дюбоа и колектив (Du Bois 2003) са използвани черупкови крайни елементи с пълно интегриране, като не са дадени подробности относно мрежата, но отбелязват, че формата на пукнатините много силно се влияе от дискретизацията. Зао и колектив използват в соята работа (Zhao 2006), ососиметрични крайни елементи. За да намалят обема на изчислителната работа използват симетрията на разглежданите тела, като в зоната на удара извършват локално сгъстяване на мрежата. Последните две обстоятелства са приети като влошаващи картината на разпространение на пукнатините от Тимел и колектив (Timmel 2007) и е направено изследване за влиянието на мрежата при използване на черупкови елементи с квадратна и триъгълна форма. Не се споменават подробности за гъстотата на мрежата. Пител и колектив си поставят за цел да отчетат деформациите в напречно направление, за моделиране на стъклените слоеве и

⁴ Докладът е представен на пленарната сесия на 28 октомври 2017 с оригинално заглавие на български език: ЧИСЛЕНО МОДЕЛИРАНЕ НА УДАР ОТ ГРАД ПО ФОТОВОЛТАИЧЕН ПАНЕЛ

пространствени елементи - за междинния слой (Pyttel 2011). Пенг и колектив използват черупкови елементи като проверяват чувствителността на формата на пукнатините към гъстотата на мрежата (Peng 2013).

Установено е, че пространствените черупкови крайни елементи, описани в (Hauptmann 1998) и (Felippa 2002), съчетават добре възможността на тримерните крайни елементи, да отчитат деформациите в напречно направление, с икономичността на стандартните черупкови елементи по отношение на изчислителния ресурс, като резултатите получени чрез тях за нискоскоростен удар в ламинатно стъкло са удовлетворителни, както това се демонстрира в (Иванов 2014). В последната работа изборът на мрежа е подчинен на съгласуваността с експериментални резултати. Съществуват различни техники на дискретизация, водещи до различни мрежи (Lo 1965), (Tam 1991) и от там до различни резултати.

Моделирането на удар от град може да се извърши като ледената топка се разглежда като идеално твърдо тяло, деформируемо твърдо тяло с линеен или нелинеен материален модел (Kim 2003) или като разпадащо се тяло (Anghileri 2007), (Pemas-Sánchez 2012). Много подходят метод за симулиране на фрагментацията на тяло се явява хидродинамиката на гладките частици.

Целта на настоящата работа е да се създаде числен модел на фотоволтаичен панел подложен на удар от град, при който да се отчита увреждането на стъкления слой.

МОДЕЛ НА УВРЕЖДАНЕ НА СТЪКЛОТО

Създаден е потребителски материален модел с подпрограма VUMAT в Абакус (ABAQUS). Инициирането на увреждането започва, когато първото главно напрежение надхвърли границата на якост на стъклото:

$$\sigma_1 > \sigma_{\rm lim} \tag{1}$$

Тогава направлението на първото главно напрежение се приема за определено и еквивалентната пукнатина се отваря перпендикулярно на него. Нарастването на увреждането е изобразено на фиг. 1, като функция на преместването б:

$$\delta = \varepsilon_n L_c, \tag{2}$$

където ε_n е линейната деформация по първо главно направление, а L_C е характеристичната дължина на крайния елемент. След настъпване на увреждане материалът вече не е изотропен. Границата на деградация се определя чрез интензитета на освободената деформационна енергия по зависимостта:

$$\delta_{\rm lim} = \frac{2G_{\rm lc}}{\sigma_{\rm lim}}.$$
(3)

Съобразно представените по-горе характеристики е изчислено, че $\delta_{lim} = 0,00495$ mm. Използваният крехък модел на увреждане има модул на срязване:

$$\mu_n = \mu_0 \left(1 - \frac{\delta}{\delta'_{\text{ult}}} \right)^p \tag{4}$$

където *p* е прието да бъде равен на едно, а $\delta'_{ult} = 0,008 > \delta_{lim}$, което осигурява по-голяма стабилност на изчислителния модел при явно интегриране във времето, защото когато обемните еластични константи деградират напълно и елемента бъде изтрит, все още има някаква срязваща коравина, предпазваща от разхвърчаване (shouting) на възлите и прекъсване на изчислителния процес.

МАТЕРИАЛНИ ХАРАКТЕРИСТИКИ

За моделиране поведението на стъклото в зоната на удара е използван модел с увреждане. Слоят от ЕВА и силициевите клетки са моделирани като линейно еластични. Ледената топка е моделирана чрез хидродинамика на гладките частици. Материалният модел осигурява фрагментацията на тялото като е отчетено вискозното поведение (Glen 1969), (Petrovic 2003), (Carney 2006). Числените стойности на използваните материалните характеристики са дадени в таблица 1.



Фиг. 1. Нарастване на увреждането на еквивалентната пукнатина

Гаолица	1. Материал	пни характ	геристики	

1 1 1

Материал	Характеристика	Стойност	Размерност
	Плътност	2418	kg/m ³
	Модул на Юнг	72	GPa
Стъкло	Коефициент на Поасон	0,22	-
	Граница на якост на опън	40	MPa
	Интензитет на освободената енергия	0,1	N/mm
	Плътност	900	kg/m ³
EBA	Модул на Юнг	15	MPa
	Коефициент на Поасон	0,47	-
	Плътност	2330	kg/m ³
Силиций	Модул на Юнг	162,5	GPa
	Коефициент на Поасон	0,223	-
	Плътност	897,6	kg/m ³
	Обемна скорост на звука	3159	m/s
	Начален коефициент на Грюнайзен	0	-
	Наклон на скоростта на удара на Хюгенио	0	-
	Модулна еластичност	9,31	GPa
Лед	Коефициент на Поасон	0,33	_
	Граница на провлачване	10,976	MPa
	Модул на уякчаване	6,89	GPa
	Пластична деформация при иницииране на увреждане	0,00185	-
	Преместване при пълно увреждане	0,077	m

ИЗСЛЕДВАНЕ ВЛИЯНИЕТО НА ДИСКРЕТИЗАЦИЯТА

Определянето на подходяща дискретизация за стъкления слой е от първостепенна важност при моделирането на фотоволтаичния панел. Поради големия обем на изчислителните работи е нужно да се намери минималният брой елементи, чрез които правдоподобно да се симулира увреждането.

Обемните черупкови елементи вградени в Абакус са само с хексаедърна форма. При това ограничение са възможни следните мрежи: регулярна с еднакви по големина елементи, регулярна с различни по големина елементи, чрез метода на средната ос (medial axis), чрез метода на напредването (advancing front). Описанието на използваните мрежи е дадено в таблица 2. Резултатите за увреждането по първо главно направление при някои мрежи са

дадени в таблица 3. Получените резултати за изменението на скоростта на удрящото тяло са сравнение с натурните изпитания за нискоскоростен удар на стоманен бойник в ламинатно стъкло (Иванов 2014), изобразени на фиг. 2. Граничните стойности на скоростта при изпитанията са дадени с черен цвят, а средната с червен.

Прието е че, съпоставимостта на резултатите, от анализа по метод на крайните елементи и експериментално получените при скорост на удара 2 m/s, е приложима и при скоростите на падане на град, които са над 10 пъти по-големи. Предпоставка за това е сходството на получаващите се пукнатини.

Означение	Метод за получаване на мрежата	Големина на елементите мин./макс., mm	Брой възли
MH2,5/5	Метод на напредването	2,5/5	73259
MH1,2/5	Метод на напредването	1,2/5	111263
MCO2,5	Метод на средната ос	2,5	171911
MCO5	Метод на средната ос	5	45263
MCO2,5/5	Метод на средната ос	2,5/5	60571
PM10	Регулярна с еднакви елементи	10	13203
PM5	Регулярна с еднакви елементи	5	40599
PM2,5	Регулярна с еднакви елементи	2,5	169611
PP1,2/5	Регулярна с различни елементи	1,2/5	56387
PP2,5/5	Регулярна с различни елементи	2,5/5	87771

Таблица 2. Означения на мрежите

Таблица 3. Увреждане при скорост на бойника 2 m/s в 8-ма ms





Фиг. 2. Изменение скоростта на бойника при различни мрежи

положение на удара

Моделирани са четири положения на удара на град по панела и са определени напречното преместване в горния стъклен слой и напрегнатото състояние в силициевата клетка – фиг. 3. а). За целта е създадена представителна част с размери 400х400 mm, състояща се от четири силициеви клетки с размери 156х156х0,34 mm, обграждащ ги слой от ЕВА с дебелина 0,5 mm, горна и долна стъклени плочи с дебелини по 3 mm. Останалата част от фотоволтаичния панел е моделирана като еднопластово стъкло с размери 942 на 1640 mm – фиг. 3 б).





а) Положения на удара
 б) Панел и представителна част
 Фиг. 3. Положения на удрящото тяло върху фотоволтаичния панел

Таблица 4. Наг	іречно премес	тване и екви	валентно нап	режение

Положение	Напречно преместване в стъкления слой, mm	Еквивалентно напрежение в силициевия слой, MPa
1	0,2731	88,39
2	0,2669	88,5
3	0,2811	85,29
4	0,2736	87,14

На фиг. 4 а) са дадени резултатите за напречното преместване при второ положение на удара, а на фиг. 4 б) – резултатите за еквивалентното напрежения по Ш-та якостна теория (на Треска) в силициевите клетки. Резултатите за напречното преместване и еквивалентното напрежение при четирите положения на удара са дадени в таблица 4.



а) Напречно преместване

б) Еквивалентно напрежение

Фиг. 4. Второ положение на удара

ИЗСЛЕДВАНЕ ВЛИЯНИЕТО НА ГОЛЕМИНАТА ЛЕДЕНАТА ТОПКА

Изследвано е влиянието на големината на ледената топка върху увреждането в стъклените слоеве и напрегнатото състояние на силициевите клетки. Резултатите при диаметри 25,4; 38,1 и 50,8 mm (1, 1,5 и 2 инча), са дадени в таблица 5 и са сравнени с резултати от натурни експерименти. На фиг. 5 са дадени увреждането в горната стъклена плоча и еквивалентното напрежение в силициевите клетки при удар с ледена топка с диаметър 50,8 mm.

Големина	Cropost us	VEROMONO	Еквивалентно	Електро-
на ледената		увреждане в	напрежение в	проводимост
топка, тт	удара, ш/ѕ	стъкления слои	силициевия слой, МРа	(Koontz 2012)
25,4	23	не	88,5	да
38,1	27,2	Инициирано в горния слой, пълно в долния	149,3	частична
50,8	33,9	да	374,6	не

Таблица 5. Увреждане и напрежения при различни големини на ледените топки



Фиг. 5. Увреждане и еквивалентно напрежение при ледена топка с диаметър 50,8 mm

ИЗВОДИ

Изследваните мрежи от обемни черупкови крайни елементи за моделиране на представителната част на фотоволтаичния панел показват, че най-подходяща е регулярната дискретизация с еднакви елементи с големина 2,5 mm. Всички изследвани мрежи дават резултати за скоростта на удрящото тяло в долната и под долната граница, определена чрез натурни експерименти. Изключение от това е случай на числена неустойчивост.

Получените резултати, при различни положения на удара на ледената топка върху фотоволтаичния панел, показват, че увреждането в стъкления слой и еквивалентното напрежение се изменят в тесни граници. Това дава основание да се предположи, че доминиращи са контактните напрежения и положението на удара не указва съществено влияние върху резултатите.

Създадените модели за удар с три стандартизирани големини на ледените топки, за които има експериментални резултати за електропроводимостта на фотоволтаичния панел, дават качествено правдоподобни резултати. Съществен, за количествената оценка на модела, е въпросът за границата на якост на силиция при използването му във фотоволтаична клетка.

БЛАГОДАРНОСТИ

Проведените изследвания и участието в настоящата конференция са осъществени с финансовата подкрепа на договор ДФНИ Е 02/17 "Параметричен анализ за оценка на ефективността на прозрачни структури в системи за оползотворяване на слънчевата енергия", финансиран от фонд "Научни изследвания" към Министерство на образованието и науката на Република България.

REFERENCES

ABAQUS, *Analysis User's Manual*, ver. 6.12, Dassault Systemes Simulia Corp., Providence, RI, USA.

Al-Habahbeh, O., Al-Hrout, B., Al-Hiary, E. & Al-Fraihat, S. (2013). *Reliability Investigation of Photovoltaic Cell Using Finite Element Modeling*. Proceedings of 9tn International Symposium on Mechatronics and its Applications, 13, 1-5.

Altenbach, H., Aβmus, M., Eisenträger, J. & Naumenko, K. (2016). *On the Analysis of Layered Structures with Applications to Photovoltaic Modules*. Nagoya University, 2016, Japan.

Anghileri, M., Castelleti, L., Milanese, A. & Semboloni, A. (2007). *Modeling Hailstone Impact* onto Composite Material Panel under a Multi-axial State of Stress. 6tn European LS-DYNA Users' Conference, 2007.

ASTM E1038-05. Determining Resistance of Photovoltaic Modules to Hail by Impact with Propelled Ice Balls.

Carney, K. S., Benson, D. J., Du Bois, P. & Lee, R. (2006). A phenomenological high strain rate model with failure for ice, *International Journal of Solid and Structures*, 43, 7820-7839.

Du Bois, P., Kolling, S. & Fassnacht, W. (2003) Modelling of safety glass for crash simulation. *Computational Material Science*, 28, 675-693.

Felippa, C. (2002). *The SS8 solid shell element: a Fortran implementation*. Center for Aerospace Structures Report CU-CAS-02-04, March 2002, University of Colorado at Boulder.

Glen, J. (1968). The Mechanical Properties of Ice I. The Plastic Properties of Ice. *Advances in Physics*, 7:26, 254-265.

Hasan, O. & Arif, A. (2012). *Finite Element Modeling and Analysis of Photovoltaic Modules*. ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, 1-10, 2012.

Hauptmann, R. & Schweizerhof, K. (1998). A systematic development of "solid-shell" element formulations for linear and non-linear analyses employing only displacement degrees of freedom. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 42, 49-69.

Ivanov, I. & Draganov, I. (2014). Influence and Simulation of Laminated Glass Subjected to Low-Velocity Impact. *Machanics of Machnes*, 110, 89-94. (*Оригинално заглсвие*: Иванов И., И. Драганов. (2014) Изследване и моделиране на нискоскоростен удар в ламинатно стъкло. Механика на машините, 110, 89-94.)

Johnson, A. & Holzapfel, M. (2006). Numerical prediction of damage in composite structures. *J Mater Sci*, 41, 6622-6630.

Kim, H., Welch, D. & Kedward, K. (2003). Experimental investigation of high velocity ice impacts on woven carbon/epoxy composite panels. *Composites: Part A*, 34, 25-41.

Koontz, J. (2012). *Ice Sphere Impact Testing of Photovoltaic Solar Panels*. 27tn RCI International Convention and Trade Snow, March 15-20.

Lamaitre, J. (1996). A Course on Damage Mechanics. Springer.

Lo, S. (1985), A new mesh generation scheme for arbitrary planar domains. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 21, 1403-1426.

Markvart, T. & Castaňer, L. (2003). *Practical Handbook of Photovoltaics: Fundamentals and Applications*. Elsevier.

Moore, D. & Wilson, A. (1978). *Photovoltaic Solar Panel Resistance to Simulated Hail*. United States. Dept. of Energy, Jet Propulsion Laboratory.

Osterwald, C. & McMahom, T. (2009). History of Accelerated and Qualification Testing of Terrestrial Photovoltaic Modules: A Literature Review. *Prog. Photovolt: Res. Appl.*, 11-33.

Pemas-Sánchez, Pedroche, D., Varas, D., López-Puente, J. & Zaera, R. (2012). Numerical modeling of ice behavior under high velocity impacts. *International Journal of Solids and Structures*, 49, 14, 1919–1927.

Peng, Y., Yang, J., Deck, C. & Willinger, R. (2013). Finite element modeling of crash test behavior for windshield laminated glass. *International Journal of Impact Engineering*, 57, 27-35.

Petrovic, J. (2003). Review Mehanical properties of ice and snow. *Journal of Materials Science*, 38, 1-6.

Pyttel, T., Liebertz, H. & Cai, J. (2011). Failure criterion for laminates glass under impact loading and its application in finite element simulation. *International Journal of Impact Engineering*, 38, 252-263.

Roberts, S. & Guariento, N. (2009). *Building integrated photovoltaics/a handbook*. Birkhäuser Verlag AG, Basel.

Tam, T. & Armstrong, C. (1991). Finite element mesh generation by medial axis subdivision, *Advances in Engineering Software*, 13, 313–324.

Timmel, M., Kolling, S., Osterrieder, S. & De Bois, P. (2007). A finite element model for impact simulation with laminated glass. *International Journal of Impact Engineering*, 34, 1465-1478.

Troshin, N. & Yaster, V. (1988). Calculation of resistance of flat glass to the action of hail. *Glass and Ceramics*, 45, 10, 372-374.

Zhao, S., Dharani, L., Chai, L. & Bardat, S. (2006). Analysis of damage in laminated automotive glazing subjected to simulated head impact. *Engineering Failure Analysis*, 13, 589-597.