

СОФТУЕРНО ОПРЕДЕЛЯНЕ ПАРАМЕТРИТЕ НА ПУКНАТИНОУСТОЙЧИВОСТ ПРИ СТАНДАРТНИ ОБРАЗЦИ, ПОДЛОЖЕНИ НА УДАРНО НАТОВАРВАНЕ.

Райчо РАЙЧЕВ

rpraichev@tu-plovdiv.bg

Иванка ДЕЛОВА

ivankadelova@tu-plovdiv.bg

катедра „Механика“, ТУ София - филиал Пловдив, 4000, БЪЛГАРИЯ

Основната цел в настоящата статия е определяне на основни параметри на пукнатиноустойчивост при стандартни пробни тела, подложени на ударно натоварване. Пробните образци се характеризират с наличие на U-образни, V-образни и T-образни надрези. Софтуерните симулации са реализирани с помощта на модула Explicit Dynamics към софтуера ANSYS. Получените резултати от симулациите за еквивалентните стойности на механичните напрежения, деформациите и пълната енергия на удара са представени в графичен вид.

Ключови думи: пукнатиноустойчивост, ANSYS, пробни образци, надрези, напрежения

1. Увод

В съвременното машиностроене непрекъснато се увеличават изискванията за все по-голяма якост на детайлите при едновременно намаляване на металоемкостта и увеличаване динамичния характер на натоварване.

Под динамично натоварване се разбира натоварване, при което действащите сили или премествания се прилагат с високи скорости. В тези случаи възниква голяма неравномерност на напрегнатото и деформационното състояние при материалите. Поради тази причина е от съществено значение да бъде анализирано тяхното поведение при такъв тип натоварване.

В [Serizawa et al. 2001] е осъществен анализ на динамичното нарастване на пукнатината при ударно натоварване, като е предложен нов метод за компютърна симулация. В основата на този метод е използването на нелинеен еластичен елемент, който е разположен между образуващите повърхности на пукнатината. Анализирано е поведението на динамично разрушение на стандартен образец с наличие на V-образен надрез, който е подложен на тест на Шарпи. Симулациите са реализирани при два варианта на надреза: с наличие на остър връх и със закръгление в основата на надреза от 0,25mm. Изследвано е влиянието на повърхностната енергия на еластичния елемент, както и на отношението между границата

на провлачване и якостта на опън, върху динамичното поведение на пукнатината. Резултатите от изследванията показват, че тестът на Шарпи може да бъде качествено симулиран. В случая на образец с остър надрез е установено, че температурният ефект върху процеса на динамично разпространение на пукнатината се дължи основно на повърхностната енергия на пукнатината, а не на съотношението между границата на провлачване и якостта на опън. При случаете със закръгление в основата на надреза, иницирането на пукнатина е значително по-бавно.

В [Parthiban et al. 2018] е реализирана симулацията за изпитване на удар на електродъгово заварени стоманени плочи. Симулацията е осъществена с помощта на специализирания софтуер Abaqus Explicit, базиран на метода на крайните елементи. Оценката на получените резултати е предложена чрез критерийния модел на Джонсън-Кук. За симулацията е използван стандартен образец с наличие на V-образен надрез, като материалът и контактните свойства на основния и заварения метал са базирани на резултатите от механични изпитвания на опън.

Получените резултати от симулацията са сравнени с експериментални резултати за удар на Шарпи и показват много добро съвпадение.

В [Jeong et al. 2008] е представен нелинеен анализ на крайните елементи (FEA) за изследване енергията за разрушение на образци без наличие на инициран надрез. За осъществяване на експерименталното изследване е конструирано нестандартно махало, наречено Bulk Fracture Charpy Machine (BFCM), Представени са и сравнения между измерената и изчислената енергия на удара.

Ефектът на различни фактори върху енергията на удара е демонстриран чрез данните от теста и резултатите от FEA. Тези фактори включват размер и форма на ударника, дебелина и материал на образеца. Изчисленията на енергията за разрушение се извършват с помощта на FEA и са базирани на различни критерии за разрушение на материала.

Получените резултати показват че, използването на критерий за разрушение, базиран на общото напрегнато състояние осигурява отлично съответствие с експерименталните данни.

В [Mohan Kumar et al. 2012] са представени резултатите от теста за удар на Шарпи върху стоманени образци, чрез зависимостта на силата на удара в функция от времето. Тази зависимост е получена с помощта на инструментален тест при различни скорости на удар в диапазона от 3,0 до 4,2 m/s. С помощта на специализирания софтуер ANSYS е разработен подробен симулационен модел за изпитване на удар. Числената симулация се осъществява чрез модула за преходен динамичен анализ, при който получената експериментална зависимост за силата на удара се явява входна характеристика. Основната задача е да се определи коефициентът на концентрация на напрежение в основата на V-образния надрез. Анализирани са и ефектът на скоростта на удара върху върху максималното напрежение в основата на надреза.

В основата на [Madhusudhan et al. 2013] е моделирането и симулацията на теста за удар на Шарпи, който се използва за оценка на енергията на разрушаване. Симулацията е осъществена чрез софтуера ABAQUS при различни скорости на махалото. За да се оцени енергията на разрушение се използва стандартен стоманен образец, с наличие на V-образния надрез. Като критерий за разрушение се използва модела на Джонсън и Кук. Изменението на абсорбираната енергия при скорости на махалото от 5 m/s, 6 m/s, 7 m/s и 9 m/s в допълнение към разпределението на напрежението при надреза е представено в графичен вид.

Основна цел в [Andleeb et al. 2020] е изучаване устойчивостта на удар при ниска скорост на композити от подсилен с въглеродни влакна полимер (CFRP). Изследванията са осъществени с помощта на тестове за удар на Шарпи, като CFRP пробите са тествани при стайна температура (22°C) и при ниска температура (-20°C). Експерименталните резултати показват около 10% спад в способността за поглъщане на енергия при ниски температури в сравнение със стайната температура. Експерименталните резултати са валидирани чрез симулации с помощта на ANSYS Workbench Explicit Dynamics. Осъществен е и анализ на чувствителността на мрежата, за да се подобри точността на крайно-елементния модел. Установено е, че при -20°C ортотропната еластичност се увеличава в сравнение със тази при стайна температура (22°C), но CFRP става крехък и има значителен спад в неговата якост.

В [Ghaith et al. 2013] е разработен тримерен модел, базиран на метода на крайните елементи (FE модел), който е използван за симулационен тест за удар на Шарпи. Основната цел е изследването на абсорбираната енергия, необходима за разрушение при ударно натоварване на образци от стомана AISI 4140-T и алуминий A6061. Симулациите са осъществени със специализирания софтуер ABAQUS. Получените резултати показват, че разработеният модел е в състояние да предскаже с висока точност абсорбираната енергия, когато е избран подходящ размер на мрежата. Освен това симулацията включва голямо разнообразие от параметрични изследвания които имат за цел да покажат влиянието на дълбочината и формата на надреза върху абсорбираната енергия, необходима за разрушение.

В [Tanguy et al. 2013] е направено сравнение (експериментално и числено) за разпределението на пластичната деформация в основата на V-образен надрез при образец, подложен на ударно натоварване. Експерименталните изследвания са базирани на калибрационна крива, получена чрез техника на рекристализация и измерване размера на рекристализираното зърно в близост до V-образния надрез. Числените изследвания са направени по метода на крайните елементи (FE) с използване на 2D и 3D симулации при изотермични и адиабатни условия. Представено е и уравнение, в което е отчетена чувствителността на скоростта на деформация. Получените резултати показват добро съответствие между експерименталното и

численото разпределение на деформацията при основата на надреза.

В [Pirvu et al. 2020] са представени резултати от числени и експериментални изследвания при ударно натоварване (тест на Шарпи), за полимерни смеси PP + PA6 + EPDM. Тестовете на Шарпи са проведени при начална скорост на удрящия елемент от 0,96 m/s и маса от 3,219 kg, като същите данни са въведени в модела на крайните елементи. Предложеният модел се характеризира с по-фина дискретизация на крайно-елементната мрежа в зоната на удара, за да се подчертае механизма на разрушение в функцията от времето.

В [Mustea et al. 2019] е представен модел с крайни елементи на образец, подложен на ударно натоварване. Основната цел е изучаването на основните етапи от процеса, характеризиращ удара на Шарпи, като се посочат процеси и явления, които трудно могат да бъдат забелязани по време на действителния удар или чрез изследване на разрушените парчета. Симулацията е проведена за различни скорости на удар (1...3 m/s).

В [Ali et al. 2011] динамичните реакции на стандартната ударна машина на Шарпи се изследват експериментално, като с помощта на специализирана система се събират данни за откликът на удара. Поради тази причина е използван и численият анализ чрез метода на крайните елементи. Извършено е моделиране на теста на Шарпи, за да се получат стойностите на напрежението в ударника по време на теста. Два вида стандартни образци на Шарпи, произведени от различни материали (алуминий 6061 и нисковъглеродна стомана 1050) са използвани за тестване със симулация на удар. Основните параметри при различните материали, абсорбираната енергия, деформацията при удара и силовата спектрална плътност (PSD) са анализирани подробно.

Целта на настоящата работа е с помощта на модула Explicit Dynamics към специализирания софтуер ANSYS, да се определят основни параметри при стандартни пробни образци, които се характеризират с наличие на надрези. Образците са подложени на ударно натоварване.

2. Описание на модула Explicit Dynamics

Модула Explicit Dynamics към софтуера Ansys позволява да бъде анализирана физиката на краткотрайни събития при обекти, които са подложени на силно нелинейни, преходни динамични натоварвания.

Вградените алгоритми, базирани на основните закони на механиката, точно

предвиждат сложни реакции, при големи деформации на материала, анализират взаимодействията между тела и течности, определят основни характеристики при бързо деформиращи се структури.

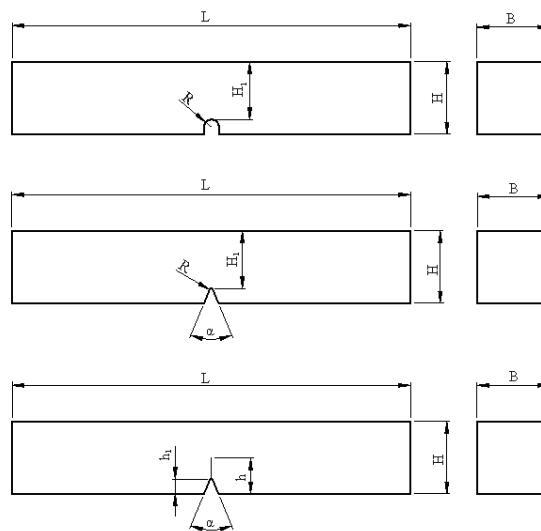
В системата за анализ на Explicit Dynamics е използван метод за интегриране на времето, който изчислява отклика в текущия момент. След прилагането на подходяща крайно-елементна мрежа върху обекта на изследване, се дефинират началните или граничните условия. За завършване настройването на параметрите и стартиране на симулацията е необходимо да бъдат зададени подходящи времеви стъпки.

3. Описание на изследваните образци.

Обекти на изследване в настоящата статия са стандартни призматични пробни образци, с наличие на U-образни, V-образни и T-образни надрези.

В настоящите симулации, образците са подложени на ударно натоварване (тест на Шарпи), при задаване на локална крайно-елементна мрежа в зоната на удара и при трите разновидности на надрезите. Зададената начална скорост на ударника е 5 m/s, а зададеното време за анализ е $5 \cdot 10^{-3}$ s.

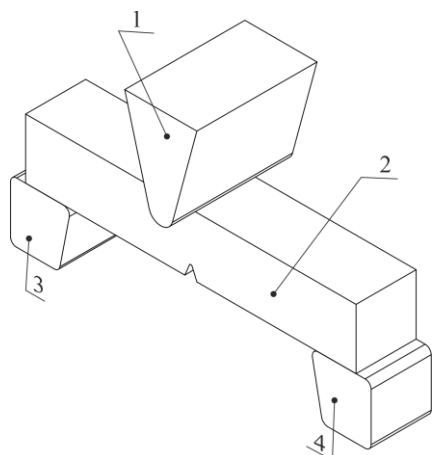
На фиг. 1 са представени формата и параметричните размери на изследваните образци, а на фиг. 2 е представена принципната схема на ударното натоварване.



фиг. 1 Изследвани образци.

За образците с наличие на V-образен и T-образен надрез, симулациите са реализирани за три различни ъгъла на наклона при страните на надреза ($\alpha=45^\circ$, $\alpha=60^\circ$ и $\alpha=90^\circ$).

Материалът използван в симулацията за самите образци е нисковъглеродна стомана SAE 1006 (съгласно стандарт ASTM A510M).



фиг. 2 Принципна схема на ударното натоварване: 1-ударник; 2-образец; 3 и 4-опори;

В таблица 1 са дадени геометричните размери на изследваните образци.

Таблица 1

Вид на надреза	Радиус на надреза, mm	Дължина L, mm	Ширина B, mm	Височина H, mm	Дълбочина на надреза h ₁ , mm	Дълбочина на концентратор a h, mm	Височина на работното сечение H ₁ , mm
U	1	55	10	10	-	-	8
V	0,25	55	10	10	-	-	8
T	0,05	55	10	10	3,5	5	-

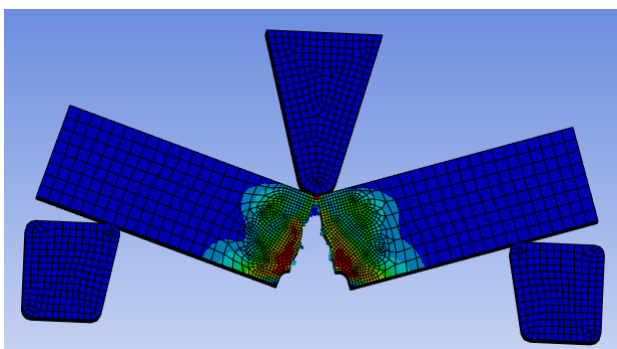
4. Резултати от симулациите.

В таблица 2 са представени получените от симулациите резултати за максималните стойности на еквивалентните напрежения, пълната деформация, както и стойностите за пълната енергия на удара.

Таблица 2

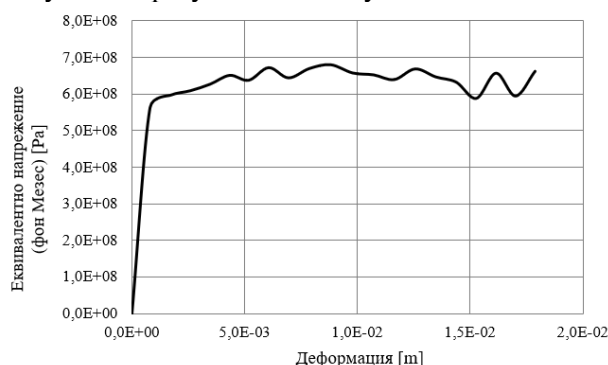
Вид на надреза	Ъгъл на наклона α, [°]	Пълна деформация, [m]	Еквивалентно напрежение (фон Мезес), [Pa]	Енергия на удара, [J]
U	-	8,10E-01	6,81E+08	55,584
V	45	2,12E-01	7,42E+08	55,802
V	60	3,11E-01	6,91E+08	55,184
V	90	5,26E-01	6,89E+08	55,487
T	45	2,68E-01	6,76E+08	21,822
T	60	5,20E-01	6,86E+08	22,416
T	90	2,90E-01	6,79E+08	21,618

На фиг.3 е представена визуализация на ударното натоварване с Explicit Dynamics.

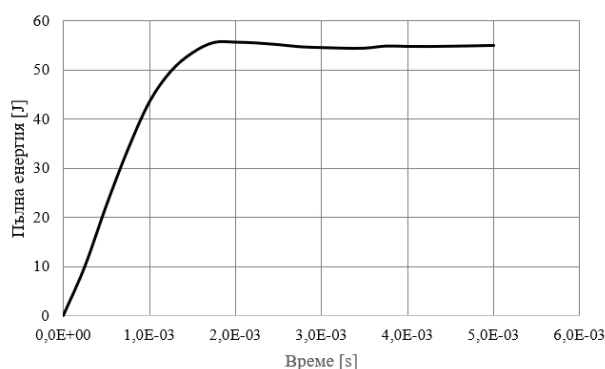


фиг. 3 Визуализация на ударното натоварване.

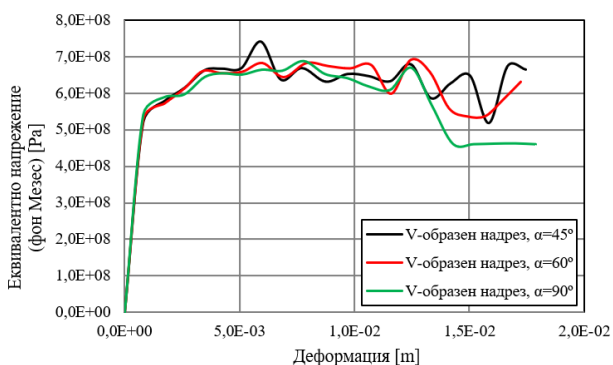
На фиг. 4, фиг. 5, фиг. 6, фиг. 7, фиг. 8 и фиг. 9 в графичен вид са представени получените резултати от симулациите.



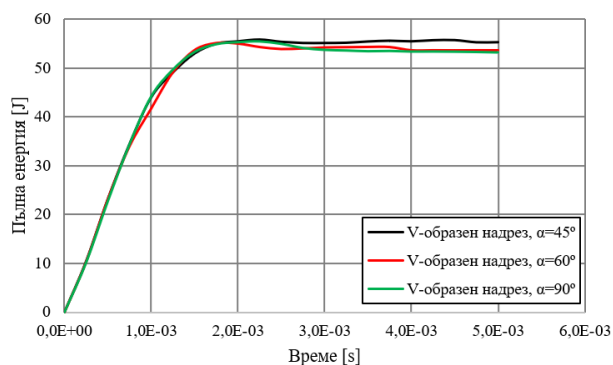
фиг. 4 Графика на еквивалентното напрежение в функция от пълната деформация при U-надрез.



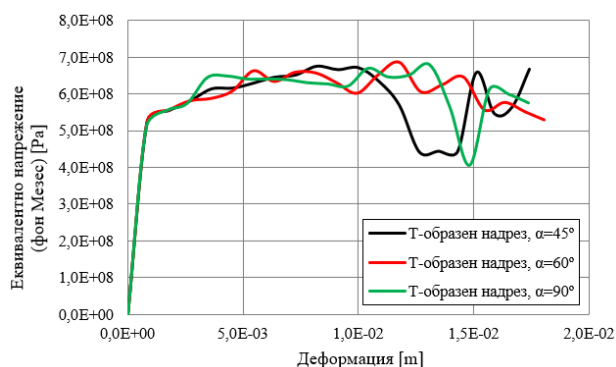
фиг. 5 Графика на пълната енергия в функция от времето при U-надрез.



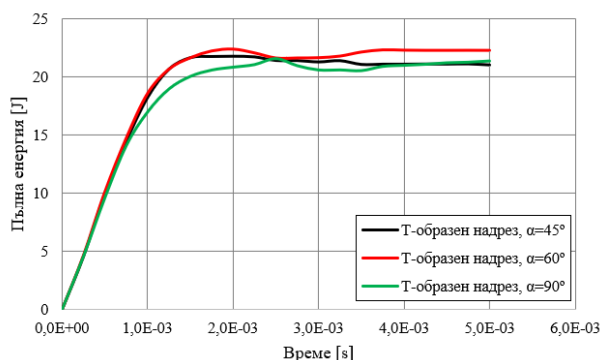
фиг. 6 Графика на еквивалентното напрежение в функция от пълната деформация при V-надрез.



фиг. 7 Графика на пълната енергия в функция от времето при V-надрез.



фиг. 8 Графика на еквивалентното напрежение в функция от пълната деформация при Т-надрез.



фиг. 9 Графика на пълната енергия в функция от времето при Т-надрез.

5. Заключение

Получените резултати показват, че еквивалентните стойности на механичното напрежение и при трите типа надрези варира в тесен диапазон за разлика от стойностите, получени за пълната деформация и енергията на удара. Най-големи стойности за напрежението ($7,42E+08$ Pa) и съответно за енергията на удара (55,802 J), са получени за образците с V-образен надрез и ъгъл $\alpha=45^\circ$, а най-ниските стойности на напрежението ($6,76E+08$ Pa) при енергията на удара (21,822 J), са получени за образците с Т-образен надрез и ъгъл $\alpha=45^\circ$.

Анализът показва, че наличието на пукнатина с дължина 1,5mm в основата на надреза, намалява с повече от 60% пълната енергия на удара при запазване на механичното напрежение.

За да бъдат направени окончателни изводи са необходими по-задълбочени изследвания на поведението на симулационните модели, както и тяхното валидиране с реални експерименти.

От друга страна реалните експерименти ще помогнат за правилното настройване на симулационните модели и получаването на адекватни резултати от симулациите.

ЛИТЕРАТУРА

Ali M., Abdullah S., Nuawi M., Ariffin A., "Test Simulation using Finite Element Method", IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Volume 17, 2011, DOI 10.1088/1757-899X/17/1/012013

Andleeb Z., Strand C., Malik S., Hussain G., Khawaja H., Boiger G. and Moatamedi M. (2020) "Multiphysics Analysis of CFRP Charpy Tests by varying Temperatures", The International Journal of Multiphysics, 14(2), pp. 143-160. doi: 10.21152/1750-9548.14.2.143.

Ghaith* F., Khan F., "Three dimensional nonlinear finite element modeling of charpy impact test", International Journal of Mechanical Engineers and Technology, Volume 4, Issue 4, July - August (2013), pp. 377-386.

Jeong D.Y., Yu H., Gordon J.E., Tang Y.H., "Finite Element Analysis of Unnotched Charpy Impact Tests", Repository & Open Science Access Portal, 2008.

Madhusudhan D, Suresh Chand*, Ganesh S and Saibhargavi U, "Modeling and simulation of Charpy impact test of maraging steel 300 using Abaqus", IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 330 (2018) 012013 doi:10.1088/1757-899X/330/1/012013

Mohan Kumar K., Devaraj M.R. and LakshmiNarayana H.V., "Finite Element Modelling for Numerical Simulation of Charpy Impact Test on Materials", International Conference on Challenges and Opportunities in Mechanical Engineering, Industrial Engineering and Management Studies (ICCOMIM - 2012), 11-13 July, 2012.

Musteață A., Pirvu C., Deleanu L., Georgescu C., "Simulation of Charpy test for different impact velocities", IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Volume 514, 2019, DOI 10.1088/1757-899X/514/1/012011

Parthiban K., Siva Shanmugam N. and Sankaranarayanan K., "Experimental and Numerical Investigation of Charpy Impact Test of Spin Arc Welded C1018 plates", IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 455 (2018) 012069, doi:10.1088/1757-899X/455/1/012069

Pirvu, C., Musteață, A.E., Ojoc, G.G., Deleanu, L., "Numerical and Experimental Results on Charpy Tests for Blends Polypropylene + Polyamide + Ethylene Propylene Diene Monomer (PP + PA + EPDM)". Materials 2020, 13, 5837. <https://doi.org/10.3390/ma13245837>

SERIZAWA H., WU Z. and MURAKAWA H., "Computational Analysis of Charpy Impact Tests Using Interface Elements", Joining and Welding Research Institute, Vol. 30 (2001), No. 2, pp. 97-102.

Tanguy B., Piques R., Laiarinandrasana L., Pineau A., "Notch stress strain distribution in Charpy V specimen / experiments and modelling", Digital Repository, 2013.