Budownictwo i Architektura 12(1) (2013) 235-242

Numeryczna analiza rozwoju mikrouszkodzeń w elemencie z defektem w postaci nieciągłości strukturalnej

Paweł Kossakowski[1]

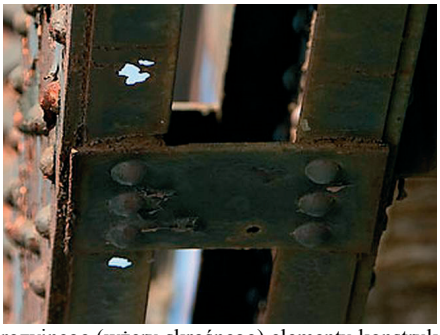
[1] *Katedra Wytrzymałości Materiałów, Wydział Budownictwa i Architektury, Politechnika Świętokrzyska, e–mail: kossak@tu.kielce.pl*

Streszczenie: W artykule przedstawiono wyniki numerycznej analizy ewolucji mikrouszkodzeń w elemencie z defektem. Symulacja została przeprowadzona w oparciu o model materiałowy Gursona-Tvergaarda-Needlemana, uwzględniający wpływ mikrouszkodzeń na wytrzymałość materiału. Rozpatrywano element tarczowy z centralnym otworem, modelującym nieciągłość strukturalną, która może powstać w elemencie konstrukcyjnym w wyniku korozji. Przeprowadzona symulacja umożliwiła zbadanie zjawiska powstawania i ewolucji mikrouszkodzeń w stali S235JR, co w przypadku analizowanego elementu pozwoliło na detekcję inicjacji mikropękania oraz jego rozwoju w obszarze narażonym na uszkodzenie.

Słowa kluczowe: mechanika zniszczenia, model materiałowy Gursona-Tvergaarda-Needlemana (GTN), stal S235JR, mikrouszkodzenie, obliczenia numeryczne.

1. Wprowadzenie

Konstrukcje budowlane w trakcie eksploatacji są narażone na rożne negatywne czynniki. Jednym z nich jest oddziaływanie środowiska inicjującego zjawiska korozyjne, prowadzące do powstawania ubytków w strukturze materiałowej, a nawet w krańcowej sytuacji powodujących nieciągłości strukturalne w formie wżerów.



Rys. 1 Widok uszkodzenia korozyjnego (wżeru skrośnego) elementu konstrukcji mostu

Zniszczenia te są o tyle niebezpieczne, że prowadzą do redukcji czynnego przekroju poprzecznego elementu, osłabiając go, a w przypadku powstania otworu powodują zmianę panującego w tym obszarze stanu odkształcenia i naprężenia. W efekcie, w przypadku przeciążenia danego elementu, lokalnie zainicjowane uszkodzenie może decydować o utracie nośności danego elementu, a finalnie nawet całego ustroju konstrukcyjnego.

Inicjacja uszkodzeń w elementach metalowych jest ściśle powiązana ze strukturą materiałową, a dokładniej z procesami jakie zachodzą na poziomie mikrostrukturalnym w trakcie odkształcania. Inicjatorami w tym wypadku są mikrouszkodzenia w postaci pustek, które powstają (są nukleowane) w osnowie materiałowej oraz na wtrąceniach niemetalicznych i cząstkach obcej fazy. Wyróżnia się kilka etapów rozwoju mikrouszkodzeń, takich jak ich zarodkowanie, wzrost i łączenie się, jednakże dwie ostatnie fazy, tj. wzrost i łączenie się mikrouszkodzeń, decydują o finalnym zniszczeniu materiału.

Tym samym ewolucja mikrouszkodzeń jest jednym ze znaczących kroków determinujących proces pękania ciągliwego, które charakteryzuje mechanizm zniszczenia wielu stali konstrukcyjnych stosowanych w budownictwie. Jest to skomplikowane zjawisko, zależne od szeregu procesów, takich jak anizotropia rozkładu, rozmieszczenia oraz kształtu pustek, ich nukleacja, zmiana i rozwój ich kształtu, wzajemne oddziaływanie pustek oraz nukleacja i wzrost pustek drugorzędnych. Ewolucja mikrouszkodzeń determinuje lokalizację inicjacji mikropękania, prowadząc do formowania strefy zniszczenia (tzw. *process zone*) i finalnego zniszczenia materiału. W wielu przypadkach lokalne uszkodzenie elementu konstrukcyjnego zachodzi z powodu ewolucji mikrodefektów i ich wzrostu, który w sytuacji ekstremalnej może prowadzić do uszkodzenia całej konstrukcji nośnej.

Analiza opisanych procesów oraz ich uwzględnienie w obliczeniach wymaga zastosowania specjalnych modeli materiałowych, opartych na mechanice zniszczenia. Opracowano wiele modeli tego typu, ale wspólną ich cechą jest powiązanie parametru uszkodzenia, który wzrasta w trakcie deformacji materiału, z redukcją jego wytrzymałości.

Obecnie jednym z najbardziej zaawansowanych ale też pozwalających na prowadzenie analiz w szerokim zakresie jest zmodyfikowany model materiału porowatego Gursona-Tvergaarda-Needlemana (GTN) [1, 2]. Model ten opracowano na bazie oryginalnego warunku Gursona [3], który jest w istocie oparty na hipotezie Hubera-Misesa-Henckyego (HMH), w której uwzględniono wpływ mikrouszkodzeń na wytrzymałość materiału przez wprowadzenie parametru uszkodzenia w postaci udziału objętościowego pustek. W efekcie opracowany model, w którym zdefinowano i uwzględniono szereg parametrów mikrostrukturalnych oraz plastycznych w powiązaniu z wytrzymałością materiału, umożliwia analizę zakresów plastycznych aż do całkowitego zniszczenia materiału, a także analizę wzrostu i rozwoju mikrouszkodzeń struktury materiałowej.

Istotnym faktem jest to, że model ten jest przedmiotem szerokiego zainteresowania zarówno badaczy, np. [4-6], jak i inżynierów z uwagi na duże możliwości aplikacyjne. Jest on przywoływany do stosowania w analizach konstrukcji metalowych pracujących w stanach awaryjnych [7] w oparciu o wymagania norm europejskich [8].

W kontekście awarii i katastrof budowlanych jakie miały miejsce w naszym kraju w ostatnim okresie tematyka modelowania i przewidywania zniszczenia konstrukcji jest nad wyraz aktualna. Wydaje się, że model GTN stwarza nowe możliwości w zakresie analizy pracy materiału silnie uplastycznionego oraz umożliwia symulowanie zniszczenia. Model GTN może więc być użyteczny w zakresie symulowania uszkodzenia oraz szacowania rezerw bezpieczeństwa elementów konstrukcji metalowych.

Jak już wspomniano, kluczowym zagadnieniem decydującym o procesie zniszczenia jest zjawisko ewolucji mikrouszkodzeń, modelowanych w modelu GTN jako pustki i temu zagadnieniu poświęcona jest niniejsza praca. Jej zakres obejmuje analizę pracy elementu w którym modelowana jest nieciągłość strukturalna w postaci otworu, który może powstać w wyniku korozji, jak również w sytuacji np. awarii styku śrubowego. W zakresie przeprowadzonej symulacji przeanalizowano zjawisko inicjacji mikrouszkodzeń oraz ich ewolucję prowadzącą finalnie do zniszczenia materiału i elementu.

2. Model materiałowy Gursona-Tvergaarda-Needlemana (GTN)

Jak już zasygnalizowano, model GTN jest jednym z modeli zniszczenia wiążących stopień uszkodzenia struktury materiałowej z wytrzymałością materiału. Wpływ defektów mikrostrukturalnych jest uwzględniony w potencjale plastycznym przez tzw. udział objętościowy pustek, zgodnie ze wzorem:

$$\Phi = \left(\frac{\sigma_e}{\sigma_0}\right)^2 + 2q_1 f^* \cosh\left(-q_2 \frac{3\sigma_m}{2\sigma_0}\right) - \left(1 + q_3 f^{*2}\right) = 0\,, \tag{1}$$

gdzie: σ_e – naprężenie efektywne wg hipotezy Hubera, σ_0 – granica plastyczności, σ_m – ciśnienie hydrostatyczne (naprężenia średnie), f^* – zmodyfikowana wartość udziału objętościowego pustek, q_i – współczynniki Tvergaarda.

Model GTN jest opisany przez szereg wielkości, definiujących zarówno parametry wytrzymałościowe materiału jak i jego strukturę.

Parametry wytrzymałościowe określone są przez granicę plastyczności σ_0 oraz współczynniki Tvergaarda q_i, definiujące zachowanie się materiału w zakresie plastycznym. Współczynnik te wyznaczone zostały przez Tvergaarda [2, 9] jako stałe materiałowe o wartościach $q_1 = 1{,}5$, $q_2 = 1{,}0$ oraz $q_3 = q_1^2 = 2{,}25$ dla materiałów metalowych najczściej stosowanych w technice. W latach późniejszych zaczęto wiązać wartości współczynników Tvergaarda z własnościami sprężysto-wytrzymałościowych materiału [10].

Wielkości określające mikrostrukturę materiału GTN to przede wszystkim porowatość początkowa definiowana jako udział objętościowy pustek istniejących w materiale f_0. Wartość f_0 wpływa na zmianę udziału pustek w trakcie procesu deformacji, zgodnie z funkcją opisującą zmiany zmodyfikowanego udziału objętościowego pustek f^*:

$$f^* = \begin{cases} f & \text{dla} \quad f \le f_c \\ f_c + \dfrac{\overline{f}_F - f_c}{f_F - f_c}\left(f - f_c\right) & \text{dla} \quad f_c < f < f_F \\ \overline{f}_F & \text{dla} \quad f \ge f_F \end{cases}, \tag{2}$$

gdzie: f_c – krytyczny udział objętościowy pustek odpowiadający początkowi ich łączenia, f_F – udział objętościowy pustek odpowiadający zniszczeniu materiału, $\overline{f}_F = \left(q_1 + \sqrt{q_1^2 - q_3}\right)/q_3$.

Jak widać, bieżąca wartość zmodyfikowanego udziału objętościowego pustek jest uzależniona od kolejnych parametrów mikrostrukturalnych, a mianowicie krytycznych wartości f_c i f_F. Pierwszy parametr, krytyczny udział objętościowy pustek f_c, odpowiada początkowi łączenia się pustek i jest obserwowany w momencie spadku wytrzymałości nominalnej materiału. Druga wielkość f_F określa udział objętościowy pustek osiągany w momencie całkowitego zniszczenia materiału.

Istotnym parametrem modelu GTN jest ewolucja pustek, która najczęściej opisana jest następującą funkcją:

$$\dot{f} = \dot{f}_{gr} + \dot{f}_{nucl} = \left(1 - f\right)\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^{pl} : \mathbf{I} + \frac{f_N}{s_N\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\varepsilon_{em}^{pl} - \varepsilon_N}{s_N}\right)^2\right] \cdot \dot{\varepsilon}_{em}^{pl}, \tag{3}$$

gdzie: $\dot{f}_{gr}$ – wzrost pustek istniejących w materiale, $\dot{f}_{nucl}$ – wzrost pustek spowodowany ich nukleacją, f_N – udział objętościowy nukleowanych pustek, s_N – odchylenie standardowe odkształcenia nukleacji, $\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^{pl}$ – tensor prędkości przyrostu odkształceń plastycznych, $\mathbf{I}$ – tensor drugiego rzędu, ε_N – średnie odkształcenie nukleacji pustek, ε_{em}^{pl} – zastępcze odkształcenie plastyczne matrycy, $\dot{\varepsilon}_{em}^{pl}$ – prędkość przyrostu zastępczego odkształcenia plastycznego matrycy.

3. Numeryczna symulacja rozciągania elementu z defektem

Zakres przeprowadzonej analizy obejmował numeryczną symulację rozciągania elementu zawierającego nieciągłość strukturalną w postaci otworu, w oparciu o model materiałowy GTN.

W pierwszym etapie zdefiniowano parametry modelu GTN dla stali S235JR, z której modelowano analizowany elementem. Parametry wytrzymałościowe materiału określono na podstawie wyników próby statycznego rozciągania. W oparciu o wyniki badań przestawione w [5] przyjęto następujący model aproksymacyjny $\sigma(\varepsilon)$ stali S235JR:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} \qquad \text{dla} \quad \sigma < \sigma_0$$

$$\varepsilon = \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_0}{\sigma_1 - \sigma_0}\left(\sigma - \sigma_0\right) + \varepsilon_0 \qquad \text{dla} \quad \sigma_0 \le \sigma \le \sigma_1 \,, \tag{4}$$

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + \frac{\sigma_{01}}{E}\left(\frac{\sigma}{\sigma_{01}}\right)^{1/N} \qquad \text{dla} \quad \sigma > \sigma_1$$

gdzie: ε – odkształcenie, ε_0 – odkształcenie odpowiadające granicy plastyczności, ε_1 – odkształcenie odpowiadające początkowi umocnienia, σ – naprężenie, σ_0 – granica plastyczności, σ_1 – naprężenie odpowiadające początkowi umocnienia, σ_{01} – naprężenie odpowiadające początkowi nieliniowej części krzywej, E – współczynnik sprężystości podłużnej, N – wykładnik umocnienia.

Tablica 1. Parametry wytrzymałościowo-sprężyste stali S235JR [5]

ε_0	ε_1	σ_0 [MPa]	σ_{01} [MPa]	σ_1 [MPa]	E [GPa]	N
0,002	0,015	318	198	333	205	0,195

Parametry mikrostrukturalne modelu GTN dla stali S235JR przyjęto na podstawie wcześniej przeprowadzonych badań [4-6, 11-14].

Uwzględniając wyniki badań nad porowatością początkową [11, 12] oraz wymagania metalurgiczne dla stali S235JR wg [15], przyjęto średnią wartość początkowego udziału objętościowego pustek $f_0 = 0{,}001$.

Współczynniki Tvergaarda q_i wyznaczono jako $q_1 = 1{,}91$, $q_2 = 0{,}79$ i $q_3 = 3{,}65$, bazując na zależnościach podanych w [10] obowiązujących dla stosunku granicy plastyczności do modułu Younga $\sigma_0/E = 0{,}00155$ oraz wykładnika umocnienia $N = 0{,}195$.

Krytyczne wartości udziału pustek przyjęto jako $f_c = 0{,}06$ oraz $f_F = 0{,}667$, tak aby nie wymuszać wcześniejszego spadku krzywej wytrzymałościowej przed momentem spodziewanego zniszczenia materiału, co ma miejsce w przypadku zakładania niższych wartości f_F.

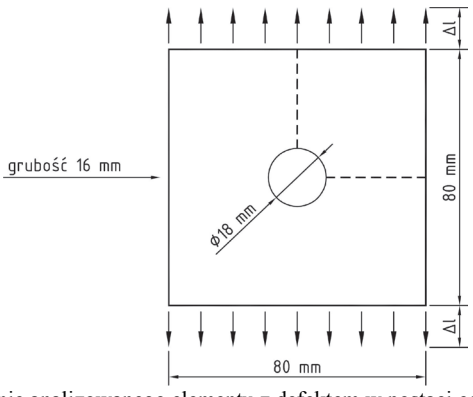
Pozostałe parametry dobrano na drodze numerycznych symulacji prób rozciągania.

Przyjęte parametry mikrostrukturalne GTN dla stali S235JR zestawiono w tablicy 2.

Tablica 2. Parametry mikrostrukturalne GTN dla stali S235JR

f_0	f_c	f_F	q_1	q_2	q_3	ε_N	f_N	s_N
0,001	0,06	0,667	1,91	0,79	3,65	0,30	0,04	0,05

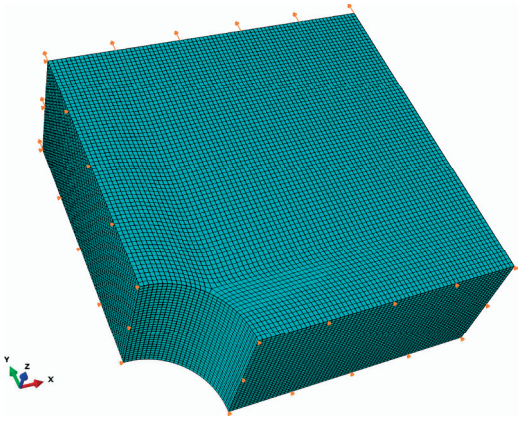
Kolejny etap obejmował zasadniczą część analizy, w którym przeprowadzono symulację pracy elementu zawierającego nieciągłość struktury w postaci otworu. Jego geometrię i obciążenie pokazano na rysunku 2.



Rys. 2. Geometria i obciążenie analizowanego elementu z defektem w postaci centralnego otworu.

Obliczenia prowadzono przy zastosowaniu komercyjnego programu MES Abaqus v.6.10, z zastosowaniem analizy dynamicznej Explicit [16].

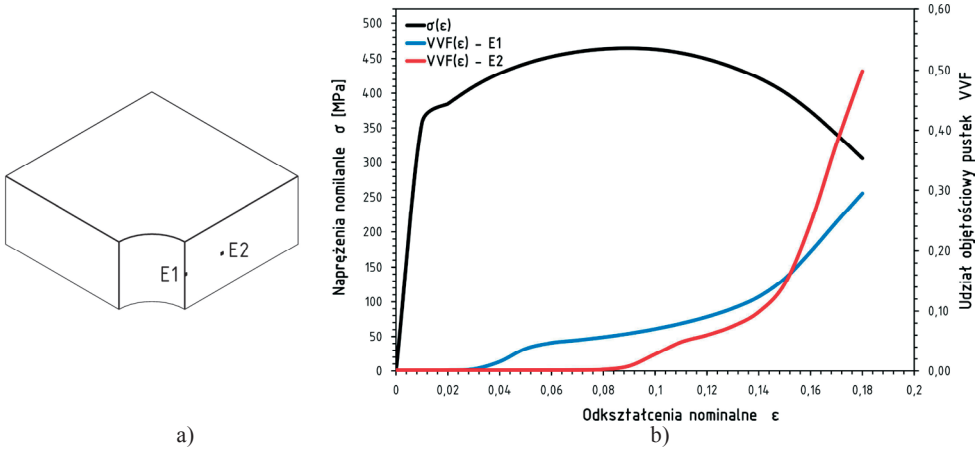
Z uwagi na symetrię zadania modelowano jedynie ¼ elementu, pokazanego na rysunku 2. W celu przeprowadzenia analizy rozkładów odkształceń i ewolucji mikrouszkodzeń zachodzącej w grubości elementu, przyjęto trójwymiarowy model obliczeniowy przy zastosowaniu elementów skończonych typu solid C3D8R. Gęstość siatki przyjęto w oparciu o tzw. długość charakterystyczną, która determinuje minimalne wymiary elementów skończonych modelowanych w sytuacji stosowania materiału GTN. Dla stali S235JR długość charakterystyczna wyznaczona została na poziomie około 250 μm [5] co stanowiło wartość referencyjną. Wymiary siatki MES, odpowiadające rozmiarom elementów skończonych przyjęto jako 500 μm, co stanowiło dwukrotność wymiarów wymaganych. Dla całego modelu przyjęto materiał porowaty GTN o parametrach podanych w tabeli 2. Model numeryczny analizowany w pracy pokazano na rysunku 3.



Rys. 3. Model numeryczny.

Analizę prowadzono zakładając przyrost przemieszczenia Δl wolnych brzegów blachy (rys. 2) w zakresie quasi-statycznym z kontrolowaną prędkością odkształcania $1 \cdot s^{-1}$, symulując nagłe przeciążenie elementu.

W pierwszym kroku wyznaczono wykres wytrzymałościowy naprężeń nominalnych w funkcji odkształceń nominalnych $\sigma(\varepsilon)$ pokazany na rysunku 4b.



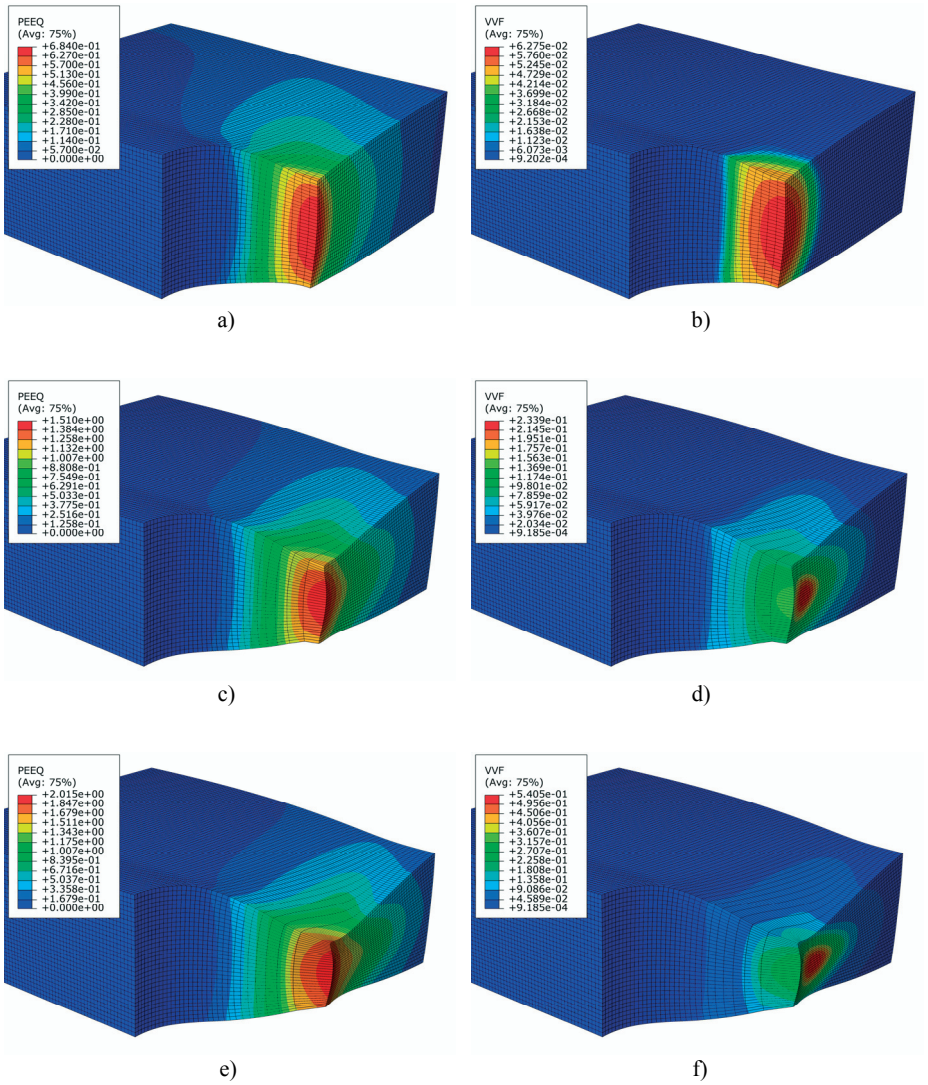
a) b)

Rys. 4. Oznaczenie elementów skończonych E1 i E2 w modelu numerycznym (a) oraz wykres naprężeń nominalnych σ i udziałów objętościowych pustek *VVF* (dla elementów skończonych E1 i E2) w funkcji odkształceń nominalnych ε dla analizowanego elementu (b)

4. Numeryczna analiza ewolucji mikrouszkodzeń

Zasadniczy etap symulacji obejmował analizę inicjacji mikrouszkodzeń i ich ewolucji w powiązaniu z procesem uplastycznienia definiowanym przez lokalne ekwiwalentne odkształcenia plastyczne ε_e^{pl}. Jako kryterium zniszczenia przyjęto lokalne ekwiwalentne krytyczne odkształcenia plastyczne $\varepsilon_{e\,cr}^{pl} = 1{,}4$, notowane w momencie zniszczenia rozciąganej próbki o przekroju kołowym.

Wyniki symulacji w postaci map ekwiwalentnych odkształceń plastycznych ε_e^{pl} i odpowiadających im udziałów objętościowych pustek *VVF* dla trzech charakterystycznych etapów analizy pokazano na rysunku 5.



Rys. 5. Mapy ekwiwalentnych odkształceń plastycznych ε_e^{pl} (po lewej) i udziałów objętościowych pustek *VVF* (po prawej) dla odkształceń nominalnych: $\varepsilon = 0{,}09$ (a, b), $\varepsilon = 0{,}15$ (c, d) i $\varepsilon = 0{,}18$ (e, f)

Analizując uzyskane rezultaty, a przede wszystkim zmiany pól odkształceń i wielkości pustek, należy stwierdzić kilka interesujących zjawisk, przedyskutowanych poniżej.

Zgodnie z przewidywaniami, inicjacja mikropękania zachodzi w obszarze przylegającym do dolnej płaszczyzny elementu (modelu numerycznego) i ścianki otworu. Ekwiwalentne odkształcenia plastyczne ε_e^{pl} osiągają wartości maksymalne w małej objętości w środkowej części przekroju. Wraz z postępującą deformacją w tym obszarze nukleowane są również pustki, których udział objętościowy bardzo szybko osiąga znaczne wartości, co uwidacznia się na wykresie zmian parametru VVF wyznaczonego dla elementu skończonego E1 – wykres oznaczony na rysunku 4 b jako $VVF(\varepsilon)$-E1. Dla odkształceń nominalnych $\varepsilon = 0{,}09$ odpowiadających naprężeniom maksymalnym σ_{max} maksymalny udział objętościowy pustek w elemencie E1 wynosi $VVF = 0{,}06275$ (rys. 4, 5 b) i jest to wartość zbliżona do krytycznego udziału f_c. W dalszym etapie, aż do zniszczenia, maksymalne deformacje (odkształcenia) zachodzą w obszarze przylegającym do ścianki otworu. Co interesujące rozwój mikrouszkodzeń obejmuje elementy przylegające do tego obszaru, ale maksymalny wzrost pustek obserwowany jest nieco dalej, w kierunku boku zewnętrznego, w warstwie przylegającej do płaszczyzny dolnej analizowanego modelu numerycznego, w elemencie skończonym oznaczonym jako E2 (rys. 4 a). Z map pokazanych na rysunkach 5 d i f widać wyraźnie, że w dalszej fazie odkształcenia obszary gdzie osiągane są maksymalne wartości ekwiwalentnych odkształceń plastycznych ε_e^{pl} nie pokrywają się z obszarami, gdzie osiągane są maksymalne wartości parametru VVF.

Obserwowane zjawisko jest analogiczne do ewolucji mikrouszkodzeń obserwowanej w rozciąganych próbkach kołowych, szczególnie w przypadku złożonego stanu naprężenia, co opisano szczegółowo np. w pracach [4, 14]. W pierwszej fazie rozwój mikrouszkodzeń obserwowany był na zewnątrz elementów, by w końcowej fazie zniszczenia objąć środkową część przekroju w płaszczyźnie pękania.

Kolejnym analizowanym parametrem był poziom udziału objętościowego pustek w momencie symulowanego zniszczenia. Jak już wspomniano jako kryterium zniszczenia przyjęto lokalne ekwiwalentne krytyczne odkształcenia plastyczne na poziomie $\varepsilon_{e\,cr}^{pl} = 1{,}4$. Z analizy map pokazanych na rysunkach 5 d i f oraz wykresów zmian $VVF(\varepsilon)$ pokazanych na rysunku 4 wynika, że przy zastosowaniu lokalnego odkształceniowego kryterium zniszczenia w obszarze przylegającym do ścianki otworu w momencie zniszczenia krytyczny poziom udziału objętościowego pustek przyjmuje poziom $VVF \approx 0{,}30$ (element E1). Dla obszaru położonego w głębi płaszczyzny pęknięcia krytyczny udział objętościowy pustek w momencie zniszczenia osiąga wartość wyższą, około $VVF \approx 0{,}50$ (element E2). Można zatem założyć, że do fizycznego zniszczenia elementu dojdzie, gdy udział objętościowy pustek osiągnie wartość z zakresu $VVF = 0{,}30 \div 0{,}50$, a zniszczenie inicjowane będzie w warstwie przylegającej do dolnej płaszczyzny analizowanego modelu (połowa wysokości elementu rzeczywistego) w bezpośredniej bliskości ścianki otworu.

5. Podsumowanie

Podsumowując wyniki przeprowadzonej symulacji należy zwrócić uwagę na możliwości jakie stwarza zastosowanie w obliczeniach modelu materiałowego GTN. Szczególnie interesujące są rezultaty w zakresie lokalizacji inicjacji mikropękania jakie uzyskano w oparciu o obserwacje wartości i zmian udziałów objętościowych pustek. Na podstawie analizy tego parametru kolejnym ważnym rezultatem jest możliwość detekcji obszarów, w których spodziewane jest zniszczenia materiału.

Tym samym dzięki zastosowaniu modelu GTN inżynier prowadzący obliczenia ma możliwość symulacji zniszczenia materiału, co pozwala na oszacowanie obciążenia granicznego elementu uszkodzonego, jak również określenia miejsca inicjacji procesu pękania, prowadzącego do zniszczenia.

Literatura

1 Tvergaard V. Influence of voids on shear band instabilities under plane strain condition, International Journal of Fracture 17 (1981), 389-407.

2 Tvergaard V., Needleman A. Analysis of the cup-cone fracture in a round tensile bar, Acta Metallurgica, 32 (1984), 157-169.

3 Gurson A.L. Continuum theory of ductile rupture by void nucleation and growth: Part I – Yield criteria and flow rules for porous ductile media, Journal of Engineering Materials and Technology, Transactions of the ASME, 99 (1977), 2-15.
4 Kossakowski P. G. An analysis of the load-carrying capacity of elements subjected to complex stress states with a focus on the microstructural failure, Archives of Civil and Mechanical Engineering, 10 (2010), 15-39.
5 Kossakowski P. G. Simulation of ductile fracture of S235JR steel using computational cells with microstructurally-based length scales, Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 50 (2012), 589-607.
6 Kossakowski P. G. Prediction of ductile fracture for S235JR steel using the Stress Modified Critical Strain and Gurson-Tvergaard-Needleman models, Journal of Materials in Civil Engineering, 24 (2012), 1492-1500.
7 Sedlacek G., Feldmann M., Kühn B., Tschickardt D., Höhler S., Müller C., Hensen W., Stranghöner N., Dahl W., Langenberg P., Münstermann S., Brozetti J., Raoul J., Pope R., Bijlaard F. Commentary and worked examples to EN 1993-1-10 "Material toughness and through thickness properties" and other toughness oriented rules in EN 1993, JRC Scientific and Technical Reports, European Commission Joint Research Centre, 2008.
8 PN-EN 1993-1-10:2007 Eurokod 3: Projektowanie konstrukcji stalowych - Część 1-10: Udarność i ciągliwość międzywarstwowa materiału.
9 Tvergaard V. Material failure by void growth to coalescence. Advanced in Applied Mechanics 27 (1989), 83-151.
10 Faleskog J., Gao X., Shih C.F. Cell model for nonlinear fracture analysis – I. Micromechanics calibration, International Journal of Fracture, 89 (1998), 355-373.
11 Kossakowski P. G. Influence of initial porosity on strength properties of S235JR steel at low stress triaxiality, Archives of Civil Engineering, 58 (2012), 293-308.
12 Kossakowski P. G. Effect of initial porosity on material response under multi-axial stress states for S235JR steel, Archives of Civil Engineering, 58 (2012), 445-462.
13 Kossakowski P. G. The analysis of Tvergaard's parameters of S235JR steel in high triaxiality, Advances in Material Science, 12 (2012), 27-35.
14 Kossakowski P. G., Trąmpczyński W. The microvoids evolution of S235JR steel subjected to multi-axial stress state, Engineering Transactions, 60 (2012), 287-314.
15 PN-EN 10025-1:2005 Wyroby walcowane na gorąco ze stali konstrukcyjnych - Część 1: Ogólne warunki techniczne dostawy.
16 Abaqus 6.10. Analysis User's Manual, Dassault Systèmes, Providence 2010.

The numerical analysis of micro-damage evolution in damaged element with structural discontinuity

Paweł Kossakowski[1]

[1] *Department of Strength of Materials and Concrete Structures, Faculty of Civil Engineering and Architecture, Kielce University of Technology, e–mail: kossak@tu.kielce.pl*

Abstract: The numerical analysis of microdamage evolution in S235JR steel is presented in the paper. The simulation was performed basing on the Gurson-Tvergaard-Needleman material model which takes into consideration the influence of microdamage to the material strength. The plate element with a central hole was considered. It modelled the structure discontinuity which may occur in structural element due to such a phenomenon as corrosion. The numerical simulation and analysis of micro-damage evolution for this element made of S235JR steel was carried out, which allowed to show and detect the micro-crack initiation and area subjected to final failure.

Keywords: GTN, Gurson-Tvergaard-Needleman material model, numerical analysis, damage evolution.