

OCENA NAPRĘŻEŃ W STREFIE MOCOWANIA NARZĘDZIA MŁOTA HYDRAULICZNEGO W EKSTREMALNYM STANIE OBCIĄŻEŃ

EVALUATION OF STRESSES IN THE RETAINER ZONE OF A HYDRAULIC HAMMER IN EXTREME LOAD STATE

Marek Sokolski – Wydział Mechaniczny, Politechnika Wroclawska

Przedstawiono wyniki symulacji procesu wymuszenia udarowego w układzie roboczym hydraulicznego młota bijakowego. Na podstawie analizy wyników dokonano oceny wyłączenia w strefie mocowania narzędzia w ekstremalnie niekorzystnych warunkach – tzw. blank hammering. Jest to jeden ze stanów krytycznych obciążeń roboczych narzędzi młotów hydraulicznych. Wykazano, że uderzanie z prędkością powyżej 7,5 m/s w narzędzie maksymalnie wysunięte i oparte tylko na zabezpieczeniu sworzniowym, może prowadzić do degradacji zarówno narzędzia jak i sworzni ustalających

The results of the simulation of the impact process in the system “piston – tool” of a hydraulic hammer are presented. On this base the evaluation of the stress in the zone of retainer pin and pin groove in the extreme case of loads – in the so-called blank hammering was made. That is on of the critical state of loads of the hydraulic hammers. It was shown that impacting with velocity above of 7,5 m/s on the tool which is moved forward and supported on the retainer pin can lead to degradation of a tool as well as retainer pins.

Wprowadzenie

Młoty hydrauliczne stosowane są w wielu branżach przemysłowych, takich jak między innymi: górnictwo i skalnictwo (urabianie calizny, rozbijanie brył ponadwymiarowych), inżynieria lądowa (drażnienie tuneli, wykonywanie wykopów pod fundamenty, usuwanie nawierzchni drogowej), budownictwo (prace wyburzeniowe), hutnictwo i odlewnictwo (rozdrabnianie złomu, zagęszczanie mas formierskich, usuwanie żużla).

Tak szeroki obszar zastosowań młoty zawdzięczają między innymi dzięki stosowaniu wymiennych narzędzi roboczych o różnych kształtach, dostosowanych do charakteru wykonywanych prac (rys. 1).

W górnictwie i skalnictwie – do takich prac jak rozbijanie brył lub urabianie calizny – stosuje się najczęściej narzędzia o stosunkowo prostych, osiowo-symetrycznych kształtach. Są to najczęściej grotki płaskie, grotki-szpicaki (z końcówką stożkową) lub grotki-punktaki (z końcówką w kształcie stożka ściętego).

W inżynierii lądowej – do usuwania nawierzchni drogowej lub ubijania podłoża gruntowego – stosuje się natomiast narzędzia z końcówkami roboczymi o bardziej złożonych

kształtach – np. grotki dłutowe i grotki rydlowe lub grotki ubijaki [1, 3, 4].

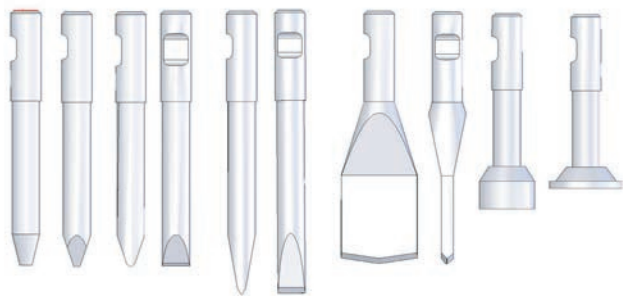
Wspólną cechą konstrukcji wymiennych narzędzi młotów hydraulicznych są jednakowe części tylne (tylce) i części środkowe (trzony). Standardowym rozwiązaniem jest również sposób mocowania narzędzi – za pomocą jednego lub dwóch sworzni osadzonych w głowicy przedniej młota. Stosownie do przyjętego wariantu, w tylcu narzędzia wykonuje się jeden lub dwa rowki podsworzniowe.

Geneza problemu

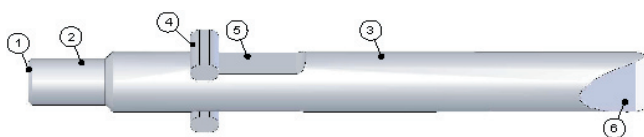
Wśród atrybutów procesu roboczego młotów hydraulicznych szczególnie znaczenie mają duże obciążenia o charakterze udarowym oraz zróżnicowane i niekorzystne warunki eksploatacyjne. W szczególności na przykład agresywne środowisko (opady, zasolenie) sprzyja m. in. korozji, a ujemne temperatury powodują obniżenie odporności stali na pękanie. W takich okolicznościach zwłaszcza narzędzia młotów są szczególnie narażone na zużycie lub uszkodzenia o charakterze doraźnym (katastroficznym) lub zmęczeniowym.

Procesy degradacji narzędzi młotów mogą mieć różnorakie przyczyny o charakterze: konstrukcyjnym (karby), technologicznym (nieodpowiedni materiał, niewłaściwa obróbka cieplna – chemiczna) lub eksploatacyjnym (nadmierne obciążenia, korozja, starzenie materiału, pogorszenie właściwości smarów, niewłaściwe użytkowanie, zaniedbywanie przeglądów technicznych).

Efekt czynników destrukcyjnych o podłożu eksploatacyjnym może potęgować się przez dodatkowe działanie czynników konstrukcyjnych. Przykładem takich sytuacji jest spiętrzanie naprężeń udarowych w miejscach karbów konstrukcyjnych – przy jednoczesnym spadku udarności w ujemnych temperaturach. Stwarza warunki sprzyjające powstawaniu ognisk pęknięć zmęczeniowych lub doraźnych w narzędziu i w konsekwencji – może prowadzić do jego przyspieszonej degradacji.



Rys. 1. Przykładowy zestaw wymiennych narzędzi młotów hydraulicznych



Rys. 2. Typowe miejsca degradacji narzędzi młotów hydraulicznych:
1 –powierzchnia czołowa (miejsce uderzenia), 2 – tylec,
3 – trzon, 4 – sworznie ustalający, 5 – rowek podsworzniowy,
6 - końcówka robocza

Niezależnie od przyczyn, procesy degradacji narzędzi młotów hydraulicznych inicjowane są na ogół w kilku charakterystycznych miejscach – w tzw. obszarach krytycznych (rys. 2). Obszerną analizę obszarów krytycznych autor przedstawił w pracach [3, 4].

Rozklepywanie tyłca narzędzia (1) jest przede wszystkim efektem zmęczenia materiału pod wpływem zbyt długiego oddziaływania obciążeń udarowych, prowadzącego do odkształceń plastycznych na powierzchni styku „bijak – narzędzie”. W tym obszarze krytycznym szczególnie wyętzona jest strefa konturu powierzchni uderzenia, gdzie – w krańcowych przypadkach – może wystąpić wykruszanie i odpryskiwanie materiału jako tzw. *mushrooming*.

Degradacja narzędzi w strefie tronu (pęknięcia doraźne lub zmęczeniowe) może występować zwłaszcza w ujemnych temperaturach, kiedy kumulują się efekty oddziaływania obciążeń udarowych i spadku udarności materiału narzędzia. Czynnikiem destrukcyjnym, sprzyjającym pękaniu trzonu narzędzia, są także dodatkowe obciążenia boczne występujące na przykład, gdy narzędzie jest ustawione pod zbyt ostrym kątem do powierzchni urabianej skały lub gdy – wbrew zaleceniom – jest ono wykorzystywane do podważania brył lub odłamywania calizny skalnej. Tego typu przypadki uszkodzeń narzędzia nie są na ogół objęte gwarancją producenta młotów [3, 4, 5].

Strefa mocowania narzędzia jako obszar krytyczny

Degradacja w strefie mocowania narzędzia młota hydraulicznego może przybierać różne formy: zachodzić ewolucyjnie lub następować nagle. Jedną z typowych form stopniowej degradacji ma postać zużycia ściernego, tj. zacierania powierzchni rowka podsworzniowego oraz sworznia i jest ona skutkiem nieodpowiednich warunków tribologicznych (niewłaściwe smarowanie, zanieczyszczenia działające jak ścierniwo). W celu zapobiegania tego rodzaju degradacji, producenci młotów zalecają częste smarowanie trzonu narzędzia i rowka podsworzniowego – na ogół 1÷2 razy na zmianę roboczą. Jako lubrykaty stosuje się smary na bazie grafitu lub dwusiarczku molibdenu.

Degradacja nagła (katastroficzna) dotyczy zarówno sworznia ustalającego, jak i strefy rowka podsworzniowego i najczęściej ma formę zużycia plastycznego, tj. odkształceń plastycznych generowanych w strefie kontaktu między sworzniem i powierzchnią rowka. Ten rodzaj degradacji jest skutkiem wystąpienia nadmiernych obciążeń, nieprzewidzianych dla normalnych warunków użytkowania młota. „Klasycznym” przypadkiem tego rodzaju są obciążenia powstające podczas uderzeń w narzędzie „swobodne”, którego końcówka robocza nie jest obciążona i które – z tego powodu – jest maksymalnie wysunięte z głowicy czołowej.

W literaturze przedmiotu tego typu przypadki pracy młota są określane mianem *blank hammering* [3, 5] i mogą one

występować na przykład podczas urabiania twardych skał, których dekohezja występuje nagle. Doświadczony operator – na podstawie zmiany odgłosów uderzeń – jest w stanie przewidzieć moment pęknięcia skały i stosownie na to zareagować, wyłączając mechanizm udaru. W przeciwnym przypadku, dalsze uderzanie może prowadzić do plastycznych deformacji lub pęknięć doraźnych zarówno sworzni ustalających, jak również w obszarze rowka podsworzniowego.

Jedną z bezpośrednich konsekwencji wystąpienia deformacji plastycznych sworznia ustalającego są trudności wyjęcia tego elementu w celu wymiany narzędzia młota. Wymagane jest wówczas użycie znacznej siły, co zwykle prowadzi do niepoprawialnych uszkodzeń zarówno sworznia jak i powierzchni rowka podsworzniowego, wskutek czego narzędzie najczęściej nie nadaje się do dalszej eksploatacji. Tego typu przypadki nie są objęte gwarancją producentów młotów hydraulicznych [5].

O ile degradacja sworznia jest stosunkowo łatwa do usunięcia na drodze regeneracji lub jego wymiany, to degradacja w obszarze rowka podsworzniowego najczęściej powoduje konieczności wymiany narzędzia.

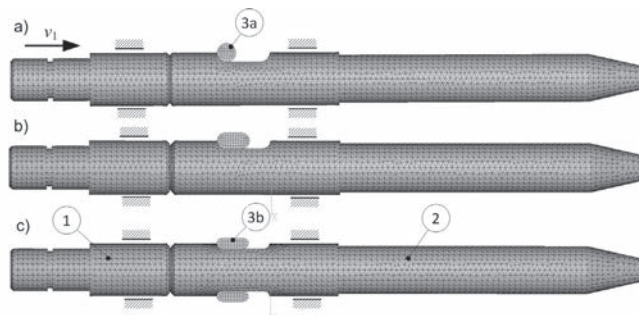
Szczególnie groźne są nagłe, niesygnalizowane uszkodzenia narzędzia, bowiem w ich następstwie może dojść do uszkodzenia innych elementów młota – np. przyłączy przewodów hydraulicznych. Tego typu przypadki są kwalifikowane jako awaria i w konsekwencji powodują – na ogół – wyłączenie młota z eksploatacji na dłuższy okres.

Modele numeryczne układu roboczego

Mając powyższe na uwadze, przeprowadzono symulacje numeryczne procesu uderzenia w układzie roboczym młota hydraulicznego z maksymalnie wysuniętym narzędziem – czyli w tzw. wariacie *blank hammering*. W modelach – nawiązujących do układów rzeczywistych – uwzględniono dwa podstawowe sposoby mocowania narzędzi w głowicy czołowej, tj. mocowanie jedno- oraz dwusworzniowe.

W modelach przyjęto płaskie powierzchnie czołowe bijaka i narzędzia w miejscu uderzenia. Analizowano przypadki mocowania z zastosowaniem sworzni o przekrojach kołowych oraz przekrojach owalnych, przyjmując – jako warunek brzegowy – sztywne osadzenie sworzni w głowicy czołowej. Przykładowe modele numeryczne układów „bijak – narzędzie” przedstawiono na rysunku 3.

Analizę procesu uderzenia – z zastosowaniem metody elementów skończonych [2] – przeprowadzono dla prędkości bijaka $v_1 = 5\div 15$ m/s, co obejmuje praktycznie pełen zakres prędkości stosowanych w konwencjonalnych młotach hydraulicznych.

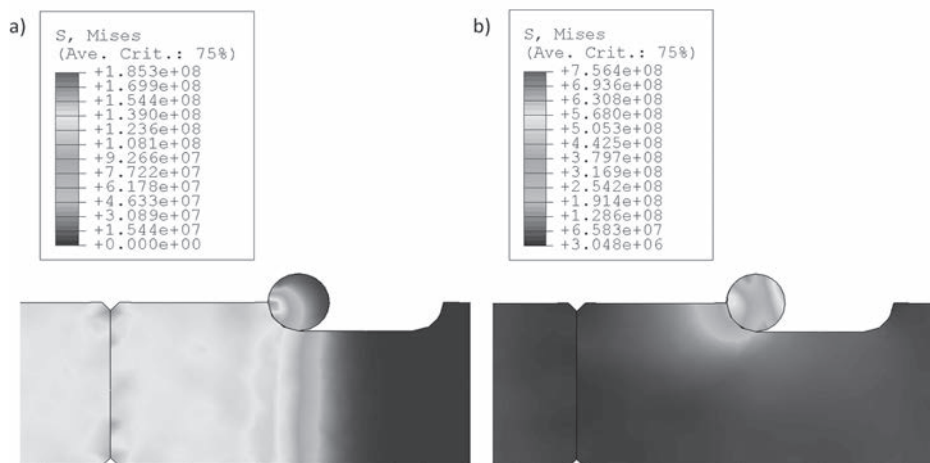


Rys. 3. Modele układu roboczego młotów: 1 – bijak, 2 – narzędzie, 3a – sworznie okrągły, 3b – sworznie owalny, a, b) mocowanie jednosworzniowe, c) mocowanie dwusworzniowe

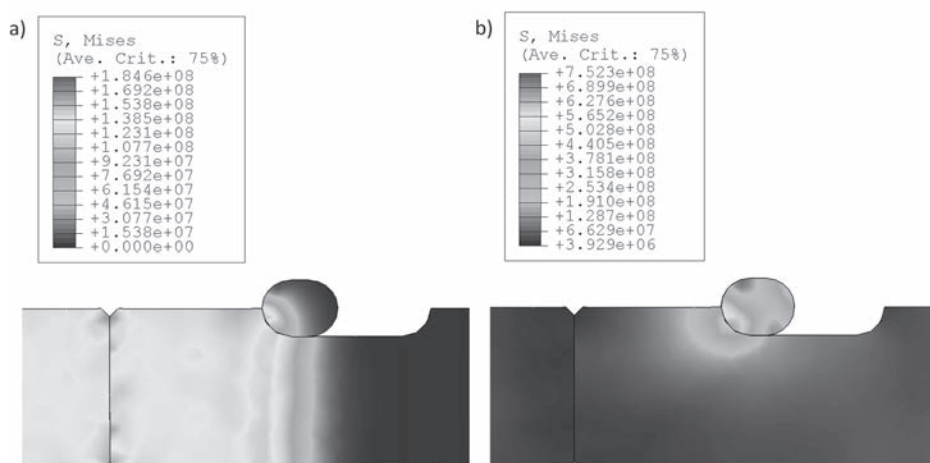
Wyniki symulacji

W toku symulacji procesu uderzenia w układzie „bijak – narzędzie” wyznaczano naprężenia promieniowe σ_{11} , naprężenia normalne σ_{22} i naprężenia styczne σ_{33} oraz naprężenie zredu-

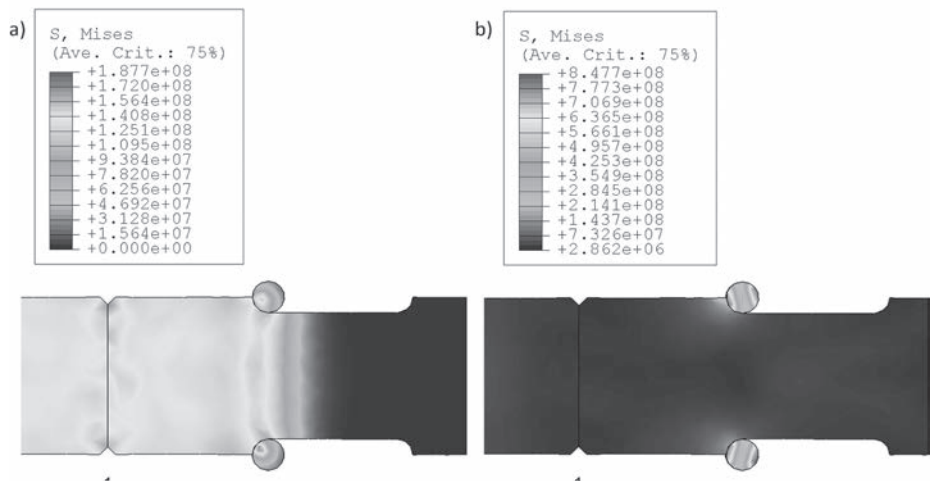
kowane σ_{red} według hipotezy Hubera. Przykładowe obrazy warstwic naprężeń zredukowanych σ_{red} w strefie jedno- i dwusworzniowego mocowania narzędzia – dla wariantów uderzenia z prędkością $v_1 = 10$ m/s – przedstawiono na rysunkach 4–7.



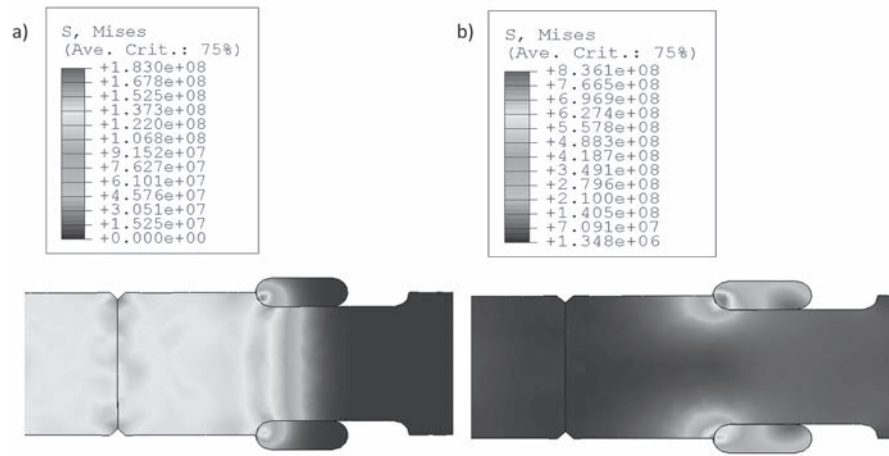
Rys. 4. Warstwic naprężeń zredukowanych w układzie mocowania narzędzia z pojedynczym sworzniem o przekroju kołowym: a) dla $t = 0,02$ ms, b) dla $t = 0,15$ ms



Rys. 5. Warstwic naprężeń zredukowanych w układzie mocowania narzędzia z pojedynczym sworzniem o przekroju owalnym: a) dla $t = 0,02$ ms, b) dla $t = 0,15$ ms



Rys. 6. Warstwic naprężeń zredukowanych w układzie mocowania narzędzia z dwoma sworzniemi o przekroju kołowym: a) dla $t = 0,02$ ms, b) dla $t = 0,15$ ms



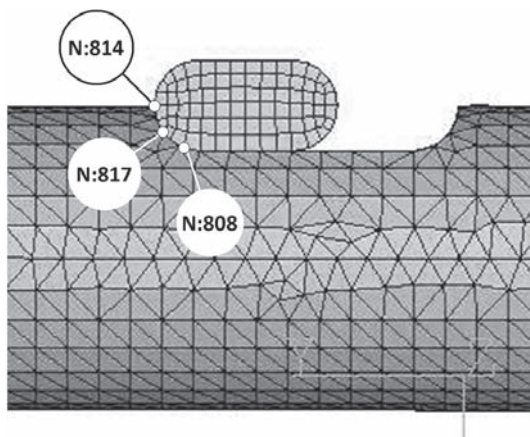
Rys. 7. Warstwy naprężeń zredukowanych w układzie mocowania narzędzia z dwoma sworzniami o przekroju owalnym: a) dla $t = 0,02$ ms, b) dla $t = 0,15$ ms

Z przeprowadzonych symulacji numerycznych procesu uderzenia w narzędzie maksymalnie wysunięte z głowicy czołowej i wsparte na sworzniu/sworzniach ustalających wynika między innymi, że:

- w strefie mocowania występują dwa charakterystyczne maksima $\sigma_{red(max1)}$ i $\sigma_{red(max2)}$ naprężeń zredukowanych;
- pierwsze maksimum naprężeń $\sigma_{red(max1)}$ pojawia się w chwili, gdy do miejsca mocowania (strefy rowka podsworzniowego) dociera fala naprężeń odbita od swobodnego końca bijaka; w tej fazie naprężenie zredukowane osiąga wartości $\sigma_{red(max1)} = 130 \div 650$ MPa – w zależności od miejsca oraz prędkości uderzenia v_1 ;
- drugie maksimum naprężeń $\sigma_{red(max2)}$ występuje w kolejnym przebiegu falowym i jest ono większe od pierwszego maksimum $\sigma_{red(max1)}$ o 30÷70% – w zależności od miejsca położenia węzła w strefie mocowania;
- największe wartości naprężeń zredukowanych σ_{red} występują na konturze górnej krawędzi rowka podsworzniowego (węzeł referencyjny N:814, rys. 8) i osiągają poziom $\sigma_{red(max2)} = 500 \div 850$ – w zależności od prędkości uderzenia v_1 .

Ocena wytrzymałości strefy mocowania

Wedle wiedzy autora, obliczenia wytrzymałościowe układów roboczych młotów hydraulicznych nie są uregulowane



Rys. 8. Referencyjne węzły siatki elementów skończonych w obszarze rowka podsworzniowego

ogólnie dostępnymi normami branżowymi. Projektanci młotów stosują własne metody i procedury obliczeniowe, które na ogół stanowią tajemnicę firmową [3, 4].

Mając to na uwadze, ocenę wytrzymałości strefy mocowania narzędzia oparto na założeniach normy branżowej PN-G-47000-2:2005: „Górnictwo odkrywkowe. Koparki wielonaczyniowe i zwalowarki. Część 2: Podstawy obliczeniowe”. Zgodnie z tym przyjęto, że:

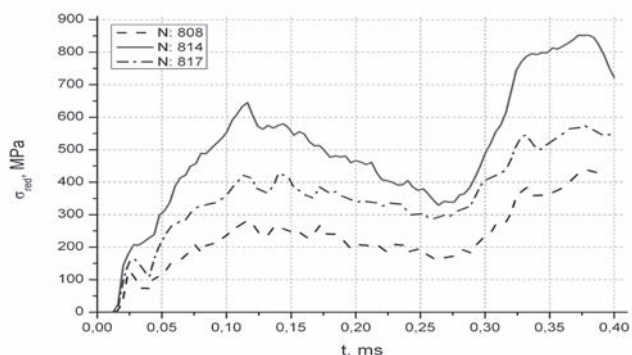
- obciążenia generowane w układzie mocowania narzędzia zaliczono do tzw. obciążeń specjalnych S, które mogą wystąpić w wyjątkowych sytuacjach podczas pracy (np. podczas uderzenia w narzędzie maksymalnie wysunięte z głowicy przedniej);
- miarodajnym do obliczeń wytrzymałościowych jest tzw. wariant HZS skojarzonych obciążeń głównych, dodatkowych i specjalnych,
- wymagany współczynnik bezpieczeństwa, odniesiony do granicy plastyczności, wynosi $X_{min} = 1,2$;
- narzędzie i sworzeń są wykonane ze stali stopowej klasy 25CrMo4 (odpowiednik dawnego oznaczenia 35HM) do ulepszenia cieplnego, której granica plastyczności jest równa $R_e = 780$ MPa.

Uwzględniając powyższe założenia oraz wyniki symulacji procesu uderzenia, oszacowano wytrzymałość strefy mocowania narzędzia, przyjmując – jako podstawę – obliczeniowy współczynnik bezpieczeństwa $X_{min(rz)}$ odniesiony do granicy plastyczności materiału narzędzia i sworznia ustalającego.

Z obliczeń wynika, że dla ekstremalnie wyciężonych obszarów strefy mocowania narzędzia – tj. dla konturu górnej krawędzi rowka podsworzniowego (węzeł referencyjny N:814, rys. 8) – współczynnik bezpieczeństwa przyjmuje wartości $X_{(rz)min} = 1,0 \div 1,6$ – w zależności od prędkości uderzenia (rys. 10).

Jeśli przyjąć – za normą PN-G-47000-2:2005 – minimalną, wymaganą wartość współczynnika bezpieczeństwa $X_{min} = 1,2$, to wówczas należy uznać, że prędkość uderzenia $v_1 \geq 7,5$ m/s jest prędkością, która może powodować uszkodzenia w układzie mocowania narzędzia – przede wszystkim w formie lokalnych odkształceń plastycznych strefy rowka podsworzniowego oraz sworznia ustalającego.

W konwencjonalnych, wielkogabarytowych młotach hydraulicznych stosowane są prędkości bijaka $v_1 \geq 10$ m/s. W świetle tego, uderzenie w narzędzie maksymalnie wysunięte i oparte na sworzniu/sworzniach ustalających – tzw. *blank ham-*



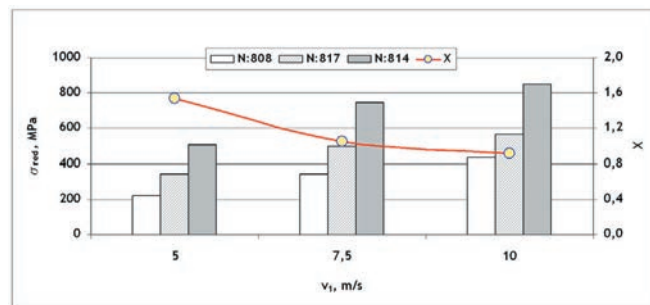
Rys. 9. Naprężenie zredukowane w strefie mocowania narzędzia podczas uderzenia z prędkością $v_1 = 10$ m/s (N:803, N:814 N:817 – referencyjne węzły siatki elementów skończonych w strefie rowka podsworzniowego)

mering – jest procesem prowadzącym do szybkiej degradacji układu mocowania: zarówno narzędzia jak i sworznia. Efektem tego jest skrócenie żywotności narzędzia i konieczność jego wcześniejszej wymiany. W dodatku, operacja taka może być kłopotliwa do wykonania ze względu na trudności wyjęcia zdeformowanego plastycznie sworznia. W takich przypadkach konieczne jest zastosowanie różnych „środków specjalnych”, co – w trudnych warunkach kopalnianych – nierzadko kończy się zniszczeniem sworznia lub/i narzędzia.

Podsumowanie

Narzędzia młotów hydraulicznych pracują w trudnych warunkach eksploatacyjnych i są poddawane dużym obciążeniom roboczym o charakterze udarowym. W tych warunkach procesy degradacji narzędzi mogą przebiegać szczególnie szybko i intensywnie i wyrażać się w formie zużycia lub uszkodzeń o charakterze zmęczeniowym lub nagłym (katastroficznym).

Jednym z obszarów krytycznych w strukturze układu roboczego „bijak – narzędzie” jest strefa mocowania narzędzia



Rys. 10. Naprężenie zredukowane w referencyjnych węzłach strefy mocowania narzędzia i współczynnik bezpieczeństwa dla górnej krawędzi rowka podsworzniowego

w głowicy czołowej. Szczególnie niekorzystnym wariantem obciążeń dla tej strefy jest uderzanie w narzędzie maksymalnie wysunięte i oparte na zabezpieczeniu sworzniowym. Przypadki tego rodzaju, określane terminem *blank hammering*, mogą występować podczas urabiania skał twardych, które – pod wpływem uderzeń – pękają nagle. Wówczas nieobciążone narzędzie ulega wysunięciu i opiera się na sworzniu ustalającym. Kontynuowanie uderzeń w takich warunkach może prowadzić do odkształceń plastycznych sworznia oraz strefy rowka podsworzniowego, a w skrajnych przypadkach – do powstania pęknięć doraźnych lub zmęczeniowych. Tego typu przypadki obciążeń nie są uwzględniane w obliczeniach i uszkodzenia strefy mocowania nie są objęte gwarancją producentów młotów.

Na podstawie symulacji komputerowych, przy wykorzystaniu metody elementów skończonych, dokonano oceny wytrzymałości w strefie mocowania narzędzia dla różnych rozwiązań konstrukcyjnych – w szczególności dla wariantów jedno- i dwusworzniowych.

Zlokalizowano charakterystyczne obszary śpiętrzania naprężeń w strefie mocowania narzędzia (sworznia i rowka podsworzniowego), w których mogą powstawać odkształcenia plastyczne oraz ogniska pęknięć doraźnych lub zmęczeniowych.

Literatura

- [1] *Roxon Theory of Hydraulic Breakers. Roxon Information Bulletin.* KONE Engineering Division, Breaker Department, Salpakangas (sine anno)
- [2] Rusiński E., Czmochowski J., Smolnicki T., *Zaawansowana metoda elementów skończonych w konstrukcjach nośnych.* Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2000
- [3] Sokolski M., *Critical areas of working tools of hydraulic hammers.* [w:] Idzikowski A. (ed.) *Machinery and equipment safety in industry.* Sekcja Wydawnictw Wydziału Zarządzania Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 2013
- [4] Sokolski M., *Podstawy syntezy charakterystyk młotów hydraulicznych.* Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2013
- [5] *TB Series Hydraulic Breakers. Owner's Manual.* Breaker Technology Inc., Thornbury, ON, Canada (sine anno)