

Numerical analysis of the process of die forging a lever-like element

Analiza numeryczna procesu kucia matrycowego elementu typu dźwignia

Streszczenie

Kucie matrycowe jest jedną z najstarszych metod obróbki plastycznej odkuwek. Technologia ta jest jednym z podstawowych sposobów kształtowania części maszyn i jest wykorzystywana w niemal każdej gałęzi przemysłu maszynowego, lotniczego, zbrojeniowego, motoryzacyjnego, rolniczego czy budowlanego. Z odkuwek wykonuje się najbardziej odpowiedzialne części maszyn. Jest to spowodowane licznymi zaletami tego procesu, do których należą: wysoka dokładność, możliwość odkuwania przedmiotów o skomplikowanych kształtach czy możliwość stosowania mniejszych naddatków technologicznych. W produkcji światowej najwięcej wytwarza się odkuwek stalowych, jednakże wzrasta ilość odkuwek wykonywanych ze stopów metali nieżelaznych, takich jak stopy magnezu, tytanu i aluminium.

W artykule przedstawiono analizę teoretyczną oraz numeryczną procesu kucia matrycowego na przykładzie kształtowania odkuwki dźwigni. W pierwszej części opisano proces kucia matrycowego oraz przykłady jego szerokiego zastosowania w przemyśle. W kolejnej wykonano rysunki wsadu, matryc dolnej i górnej oraz odkuwki, wykorzystując oprogramowanie Solid Edge. Do wykonania elementu odkuwanego użyto łatwej w obróbce stali niestopowej jakościowej C45. Obliczenia przeprowadzono w oparciu o metodę elementów skończonych (MES), przy użyciu oprogramowania DEFORM 3D.

Abstract

Die forging is one of the oldest methods of forming forgings. This technology is one of the basic ways of shaping machine parts and is used in almost every branch of mechanical engineering, aerospace, defense, automotive and construction industries. The most responsible parts of machines are made from forgings. It is caused by many advantages of this process, which include: high accuracy, ability to forge objects with complex shapes and the possibility of using fewer technological allowances. Steel forgings are the most popular produced elements in the world production, but the number of forgings made from non-ferrous alloys such as magnesium, titanium and aluminum alloys increase.

In this paper, theoretical and numerical analysis of die forging was presented on example of forming of lever forging. In first part die forging process and examples of their wide use in industry was described. In the next part drawings of the charge, the upper and lower dies and forgings were made, using Solid Edge. Material used to make forging element was carbon quality steel C45. Calculations were based on the finite element method (FEM) using DEFORM 3D. Press force of 10,000 kN and the coefficient of friction equal 0.1 were applied. Then, results of simulations, made in conditions of three dimensional state of strain were presented, allowed for determining distributions of strain intensity, stress, temperature and damage. On the basis of them, it was found that selection of parameters and course of process was appropriate, which

¹Email: mateuszczarnecki53@gmail.com, Koło Naukowe Technologii Materiałów, Wydział Mechaniczny Politechniki Lubelskiej, www.kntm.pollub.pl

²Email: bartosz.filip5@gmail.com, Koło Naukowe Technologii Materiałów, Wydział Mechaniczny Politechniki Lubelskiej, www.kntm.pollub.pl

³Email: m.szala@pollub.pl, Katedra Inżynierii Materiałowej, Wydział Mechaniczny, Politechniki Lubelskiej

Zastosowano siłę nacisku prasy wynoszącą 10000 kN oraz współczynnik tarcia równy 0,1. Następnie zaprezentowano wyniki symulacji przeprowadzonej w warunkach przestrzennego stanu odkształcenia, które umożliwiły wyznaczenie rozkładów intensywności odkształceń, naprężeń, temperatury oraz zniszczeń. Na ich podstawie stwierdzono poprawny dobór parametrów geometrycznych modelu oraz właściwy przebieg procesu, w którym nie zaobserwowano żadnych niewłaściwych deformacji lub pęknięć materiału.

Słowa kluczowe: kucie matrycowe, metoda elementów skończonych, dźwignia

influenced by many factors, including the selection of the respective radii of rounding the forging, which prevented the appearance of cracks in the first steps of the process.

Keywords: words: die forging, finite elements method, lever

1. Wprowadzenie

Technologia obróbki plastycznej materiałów była znana już w czasach starożytnych, kiedy to pierwsi kowale wytwarzali metodą kucia ręcznego m.in. proste przedmioty codziennego użytku, narzędzia rolnicze czy broń myśliwską. Z biegiem czasu powstawał nowe metody kształtowania, a istniejące były ulepszone i automatyzowane. Obecnie praktycznie każdy proces przeróbki plastycznej jest wykonywany przy użyciu maszyn, urządzeń oraz przyrządów, które zapewniają szybkie i precyzyjne przeprowadzanie wielu operacji. Obecnie w obróbce plastycznej najczęściej wykorzystuje się proces kucia, wykonywany m.in. na młotach, prasach czy kuźniarkach. W jednej z jego odmian – kuciu matrycowym – wykonywane wyroby stanowią ok. 78% wszystkich, jakie opuszczają europejskie kuźnie [1, 2].

Kierunek rozwoju kucia matrycowego jest determinowany przede wszystkim przez branżę motoryzacyjną, gdzie wykorzystuje się zdecydowanie najwięcej elementów odkuwanych, stanowiących ponad 80% światowej produkcji. Innym zastosowaniem kucia matrycowego jest przemysł rolniczy, górniczy, kolejowy, czy też maszynowy. Odkuwki są wykonywane głównie ze stali, ale stosuje się także m.in.: stopy aluminium, miedzi, tytanu, wolframu [3].

Potrzeba ciągłego doskonalenia procesów kucia matrycowego, wymaga prowadzenia wielu badań i analiz. Od kilkudziesięciu lat obserwuje się rozwój technologii komputerowych, które znacząco ułatwiły możliwości przeprowadzania symulacji. Jedną z technik, która istotnie przyczynia się do usprawnienia obróbki plastycznej jest metoda elementów skończonych (MES) [4, 5]. Umożliwia ona obliczenie deformacji, odkształceń, naprężeń czy też temperatur jakie występują w przerabianym materiale oraz stosowanym narzędziu. Dzięki temu możliwe jest zoptymalizowanie procesu pod względem kosztów i czasu produkcji, liczby przeprowadzonych operacji, trwałości narzędzi oraz jakości otrzymywanych wyrobów.

Celem pracy jest zaprezentowanie i omówienie sposobu analizy numerycznej procesu kucia matrycowego elementu typu dźwignia oraz przedstawienie wyników rozkładu: intensywności pęknięcia według kryterium Cockcrofta-Lathama, naprężeń i temperatur w badanym przedmiocie.

2. Technologie kucia matrycowego

2.1. Podstawowe podziały kucia matrycowego

Poszczególne metody kucia matrycowego różnią się od siebie w zależności od przyjętych kryteriów podziału, jednak ich wspólną cechą jest oddziaływanie na przedmiot obrabiany, znajdujący się w wykroju matrycy siłą uderzenia lub nacisku, która powoduje że materiał odkształca się i wypełnia wykrój, przyjmując jego kształt [6, 7].

Proces kucia matrycowego stanowi szereg operacji, które decydują o jego złożoności. Można wśród nich wyróżnić takie zabiegi jak: cięcie materiału, nagrzewanie (w przypadku obróbki na zimno można zastosować odpowiednią obróbkę cieplną), kucie (odkuwanie przedkuwek i odkuwek), operacje wykańczające (okrawanie, wycinanie, dziurowanie), obróbka cieplna odkuwki, czyszczenie odkuwki (poprzez śrutowanie, piaskowanie) oraz operacje końcowe (kalibrowanie, dogniatanie, prostowanie) [8].

Jeżeli wziąć pod uwagę kryterium temperatury, proces kucia matrycowego można podzielić na dwa podstawowe rodzaje: kucie na zimno i na gorąco. Podział ten jest oparty o temperaturę rekrytalizacji materiału, dzięki której możliwe jest wyszczególnienie zakresu przeróbki na zimno i gorąco. Jest on jednak nie wystarczający, gdyż na występowanie rekrytalizacji ma wpływ wiele czynników, które mogą zmieniać zakres pojawiania się tego zjawiska. Obecny stan techniki pozwala na wyróżnienie trzech podstawowych rodzajów kucia w oparciu o temperaturę topnienia T_t , która odnosi się do temperatury procesu T (temperatura wyrażana w K):

- kucie na zimno: $T < 0,3 T_t$;
- kucie na półgorąco (na ciepło): $0,3 < T < 0,5 T_t$;
- kucie na gorąco: $T > 0,5 T_t$;

Dodatkowo stosuje się także podział na:

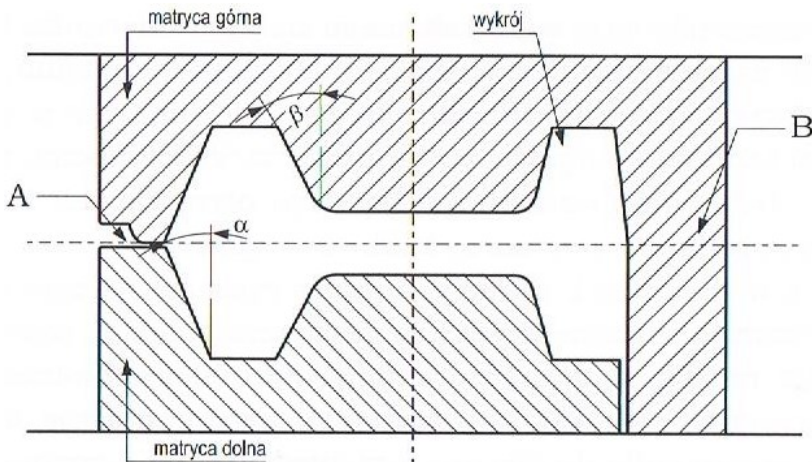
- kucie w matrycach gorących (temperatura narzędzi niższa o 300-500°C od temperatury kucia);
- kucie izotermiczne (temperatura narzędzi jest zbliżona do temperatury kucia).

Najczęściej w przemyśle stosuje się metody kucia na gorąco. Mniejszy rozwój kucia na zimno jest spowodowany ograniczoną plastycznością metali, małą trwałością narzędzi oraz koniecznością stosowania maszyn o znacznym nacisku lub energii [6,8].

Innym z podstawowych kryteriów podziału jest możliwość swobodnego płynięcia materiału. Wyróżnia się tutaj dwa typy: kucie z wypływką oraz kucie bez wypływki.

Aby zapewnić możliwość swobodnego płynięcia materiału, konieczne jest stosowanie matryc otwartych. Matryca otwarta, pokazana schematycznie na rys. 2.1 (po lewej stronie), posiada specjalnie zaprojektowany rowek składający się z mostka, który stawia opór wypływowi metalu na zewnątrz matrycy oraz magazynka, w którym gromadzi się nadmiar wypływającego metalu. Podczas procesu kucia materiał, po wypełnieniu wykroju wypływa między matrycę tworząc pierścień zwany wypływką. Podstawowymi funkcjami wypływki są:

- ograniczenie wypływania materiału poza wykroj;
- zabezpieczenie przed uderzeniem matrycy górnej o dolną;
- kompensacja niedokładności cięcia wsadu;
- ułatwienie wyjmowania odkuwki z wykroju.



Rysunek 2.1 Porównanie konstrukcji matrycy otwartej (po lewej) i zamkniętej (po prawej) [8]

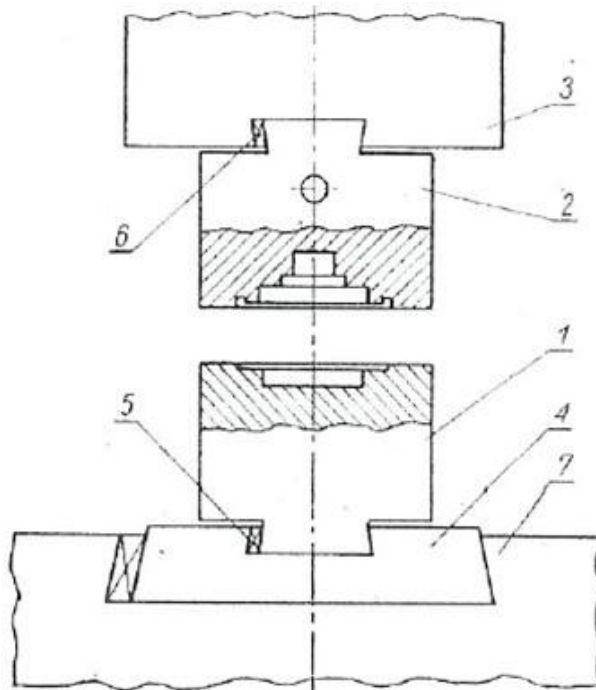
Kucie w matrycach zamkniętych powoduje, że materiał nie ma możliwości wydostania się na zewnątrz i zostaje w całości wykorzystany do wypełnienia wykroju. Powoduje to zmniejszenie zużycia materiału, które w przypadku kucia złożonych kształtów, mogą wynosić nawet kilkadziesiąt procent. Brak wypływki wiąże się z kilkoma zaletami tej metody obróbki plastycznej. Przede wszystkim nie powstaje konieczność okrawania wypływki, co przekłada się na oszczędności związane z brakiem zapewnienia stanowiska do okrawania oraz czasem przerabiania elementu [1, 6÷8].

W zależności od rodzaju wykorzystywanych maszyn, kucie matrycowe można wykonywać na młotach matrycowych, prasach kuźniczych (śrubowych, korbowych i hydraulicznych), walcach kuźniczych lub też na maszynach specjalnych, np. kuźniarkach i prasach trójsuwakowych [8].

2.2. Kucie matrycowe na młotach

Młoty matrycowe są szeroko stosowane w przemyśle maszynowym jako urządzenia o udarowym charakterze pracy. W swoim działaniu wykorzystują energię kinetyczną ruchomych mas, która zamieniana jest na pracę odkształcenia elementu. Wartość tej pracy jest jednak znacznie mniejsza niż dostarczona energia, co przekłada się na niską sprawność młotów, wynoszącą ok. 5% [8].

Na rys. 2.2 przedstawiono schemat budowy podstawowych części młota matrycowego. Są to bijak, który uderza w kształtowany materiał oraz szabota, która przejmuje uderzenia bijaka. W bijaku i szabocie mocuje się matryce, a następnie zabezpiecza się je klinami [8, 10].



Rysunek 2.2 Matryca jednowykrojowa do kucia na młotach: 1 – dolna część matrycy, 2 – górna część matrycy, 3 – bijak, 4 – poduszka szaboty, 5,6 – klin, 7 – szabota [6]

Pod względem energetycznym, w obróbce plastycznej można wyróżnić dwa typy młotów matrycowych: pojedynczego oraz podwójnego działania.

Młoty matrycowe pojedynczego działania charakteryzują się tym, że wykorzystują energię potencjalną mas, podniesionych na pewną wysokość, która zostaje zamieniona na energię kinetyczną spadającego bijaka, a ta z kolei podczas uderzenia w obrabiany materiał, zamienia się w prace odkształcenia plastycznego oraz rozprasza w postaci drgań. Aby uzyskiwać wymaganą energię uderzenia należy podnieść bijak z matrycą na dosyć dużą wysokość, a to wiąże się z małą liczbą uderzeń na minutę.

Młoty matrycowe podwójnego działania różnią się od poprzedniego rodzaju obecnością dodatkowego czynnika zwiększającego prędkość ruchu bijaka i narzędzi. Daje to możliwość zwiększenia energii uderzenia. Jako czynnik roboczy wykorzystuje się powietrze, parę lub ciecz pod ciśnieniem, a także energię sprężystości. Jednymi z popularniejszych typów młotów podwójnego działania są młoty parowo – powietrzne.

Istotnym problemem kucia matrycowego na młotach są drgania. Dynamiczny charakter pracy, powodujący rozpraszanie energii i hałas wpływa negatywnie na zdrowie osób znajdujących się w pobliżu maszyny, konstrukcję hal produkcyjnych, a także na środowisko. W tym celu opracowano nowoczesne systemy wibroizolacji maszyn z układami łączącymi elementy sprężyste z tłumikami wiskotycznymi, które zmniejszają masę i wymiary fundamentów młota [7, 10].

2.3. Kucie matrycowe na prasach

Pomimo znacznego rozpowszechnienia młotów matrycowych w obróbce plastycznej, to jednak najbardziej liczną grupę maszyn stanowią prasy. Są one stosowane w wielu gałęziach przemysłu ze względu na swoją uniwersalność. Cechą charakterystyczną pras jest ciągły i względnie powolny nacisk na części roboczych na odkształcany materiał. W porównaniu z młotami matrycowymi prasy mają szereg zalet, na które składają się:

- wyeliminowanie drgań maszyny;
- duża dokładność prowadzenia suwaka;
- sztywność korpusu oraz części prowadzących;
- wyposażenie maszyn w wyrzutnik dolny oraz górny.

Dzięki tym zaletom możliwe jest bardzo dokładne kształtowanie odkuwek, co przekłada się na korzyści w postaci mniejszych pochyłeń kuźniczych i nadatków na dalszą obróbkę mechaniczną [10].

Kucie na prasach nie jest niestety pozbawione wad. Mniejsza uniwersalność w porównaniu z młotami oraz wysoki koszt maszyn i eksploatacji sprawia, że bardzo istotną staje się konieczność właściwego doboru parametrów procesu. Aby zwiększyć trwałość narzędzi, należy brać pod uwagę kilka

czynników związanych z odkuwką, eksploatacją i matrycą. O ile dwa pierwsze są zazwyczaj narzucone z góry, to trzeci czynnik można dosyć łatwo kształtować dokonując badań symulacyjnych [6, 12].

Proces kucia na prasach, z uwagi na różnorodność wykonywanych prac, posiada bardzo wiele rozwiązań, zwłaszcza konstrukcyjnych, które decydują o sposobach jego klasyfikacji. Wymienić tu można kucie na prasach: mechanicznych, śrubowych, mimośrodowych, korbowych, specjalizowanych, czy hydraulicznych. Najstarszymi maszynami wykorzystywanymi w obróbce plastycznej były prasy śrubowe, chociaż najliczniejszą grupę stanowią prasy mimośrodowe. Obecnie obserwuje się rosnące znaczenie napędu hydraulicznego w prasach, który charakteryzuje się lepszymi właściwościami niż napędy mechaniczne. Do najważniejszych cech pras hydraulicznych można zaliczyć:

- większa dokładność wykonywanych operacji;
- mniejszy koszt wykonania;
- znacznie prostszą konstrukcję maszyny;
- niezawodność działania;
- większe bezpieczeństwo pracy związane z możliwością zatrzymania suwaka w dowolnym położeniu;
- stały nacisk pracy w całym zakresie skoku suwaka;
- możliwość uzyskania bardzo dużych nacisków przy niewielkich wymiarach gabarytowych.

Prasy hydrauliczne dzielą się na wiele mniejszych podkategorii, w zależności od przeznaczenia, konstrukcji i wielkości nacisków, jednakże zasada ich działania jest podobna i opiera się na prawie Pascala [10].

Na rys. 2.3 przedstawiono przykładową prasę hydrauliczną firmy OMERA o nacisku 1500 t.



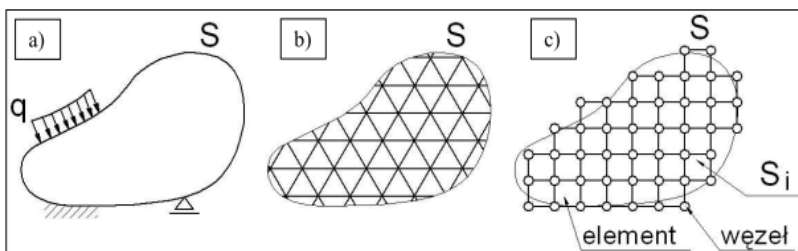
Rysunek 2.3 Prasa hydrauliczna o nacisku 1500 t [11]

3. Modelowanie i symulacja obiektu badań

3.1. Metoda Elementów Skończonych

Metody komputerowego wspomaganie prac inżynierskich mają stosunkowo krótką historię. W latach osiemdziesiątych dostęp do nich miały jedynie duże przedsiębiorstwa, często w ograniczonym zakresie. W ostatnich latach widoczne jest znaczne spopularyzowanie metod numerycznych nawet wśród małych przedsiębiorstw. Wykorzystanie ich znaczenie skraca czas potrzebny do uruchomienia produkcji oraz poszczególnych jej etapów. Współcześnie wiodącą metodą komputerową w modelowaniu procesów przeróbki plastycznej jest metoda elementów skończonych (MES).

Metoda Elementów Skończonych polega na dyskretyzacji układów geometrycznych ciągłych (rys. 3.1) na skończoną liczbę elementów łączących się w węzłach, w wyniku czego powstaje model geometryczny dyskretny. Należy przyjąć funkcję kształtu (tzw. macierze sztywności) dokładnie odwzorowującą rzeczywiste wielkości fizyczne, co przy coraz gęstszym podziale obszaru na elementy skończone zbliża otrzymane wartości do wartości dokładnej [13, 15].



Rysunek 3.1 Dyskretyzacja modelu ciągłego – transformacja w zbiór (siatkę) elementów skończonych: a) model geometryczny ciągły, b) model dyskretny idealny, c) model dyskretny obliczeniowy [13]

Koncepcja MES zakłada, że podczas obliczeń każda wielkość przedstawiona w układzie za pomocą funkcji ciągłych (np. przemieszczenia, naprężenia, obciążenia) ulega dyskretyzacji. Podczas dyskretyzacji określonej wielkości fizycznej dąży się do maksymalnego zbliżenia jej postaci dyskretnej i ciągłej z zastosowaniem metod aproksymujących.

W celu otrzymania modelu dyskretnego należy:

- dokonać podziału kontinuum na skończoną liczbę prostych geometrycznie elementów połączonych ze sobą węzłami;
- określić w węzłach wartości fizyczne, w których będą wymuszone warunki równowagi i zgodności;
- określić funkcje określające wartości wielkości fizycznych wewnątrz elementów w zależności od wartości w węzłach;
- ułożyć funkcje aproksymujące (np. wielomiany, ciągi, szeregi) węzły zdyskretyzowanego układu na podstawie informacji z poziomu elementów.

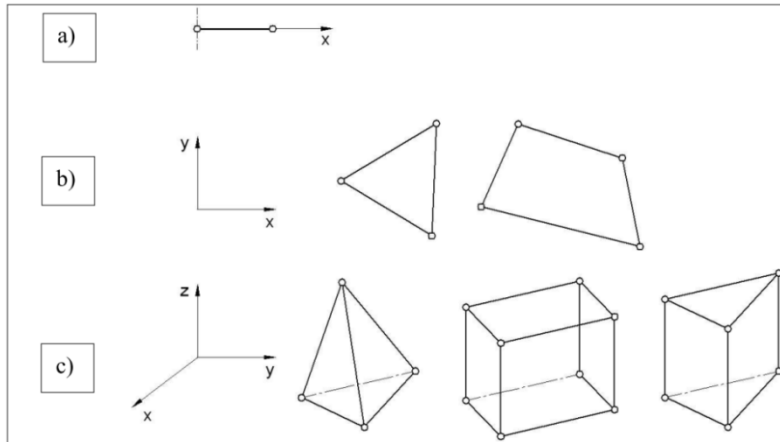
Dla każdego elementu można przyjąć inne funkcje aproksymujące, jednak wszystkie należy dobierać w taki sposób, aby zachować jak najlepszą ciągłość między poszczególnymi funkcjami na brzegach elementów. Rozwiązanie uzyskane w ten sposób jest obciążone błędem aproksymacji, którego dokładne oszacowanie jest niemożliwe ze względu na nieznaną prawdziwego rozwiązania, jednak opierając się na własnościach przestrzeni aproksymacji można go ograniczyć w znacznym stopniu [14÷16].

Obecnie istnieje bardzo duża ilość typów elementów skończonych, które charakteryzuje cały zespół cech. Aby określić typ elementu skończonego należy wprowadzić szereg kryteriów określających jego cechy, do których zaliczamy:

- liczbę wymiarów, którymi opisany jest element;
- kształt geometryczny;
- typ i stopień wielomianu dla założonej funkcji kształtu elementu skończonego;

- liczbę węzłów w elemencie;
- rodzaje więzów nałożone na element.

Biorąc pod uwagę wymiar, elementy skończone mogą być jednowymiarowe (belki), dwuwymiarowe (membrany) oraz trójwymiarowe (bryły) [15, 17]. Przykładowe schematy elementów skończonych zostały pokazane na rys. 3.2.



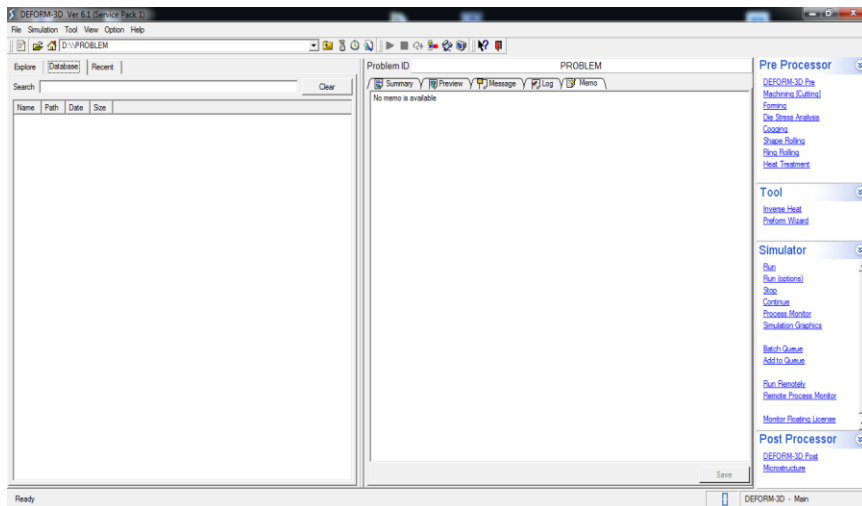
Rysunek 3.2 Schematy ideowe wybranych elementów skończonych: a) 1D, b) 2D, c) 3D [13]

Dzisiejsze oprogramowanie CAE, w których MES znajduje zastosowanie posiadają trzy wzajemnie współpracujące moduły, którymi są [13]:

- preprocesor, służący m.in. do importu lub przygotowania geometrii, doboru elementów skończonych, dyskretyzacji kontinuum oraz przyłożenia warunków brzegowych;
- solver, przeznaczony do budowy i rozwiązywania układów równań, co pozwala na uzyskanie poszukiwanych wartości wielkości fizycznych;
- postprocesor, który służy do prezentacji i interpretacji uzyskanych wyników.

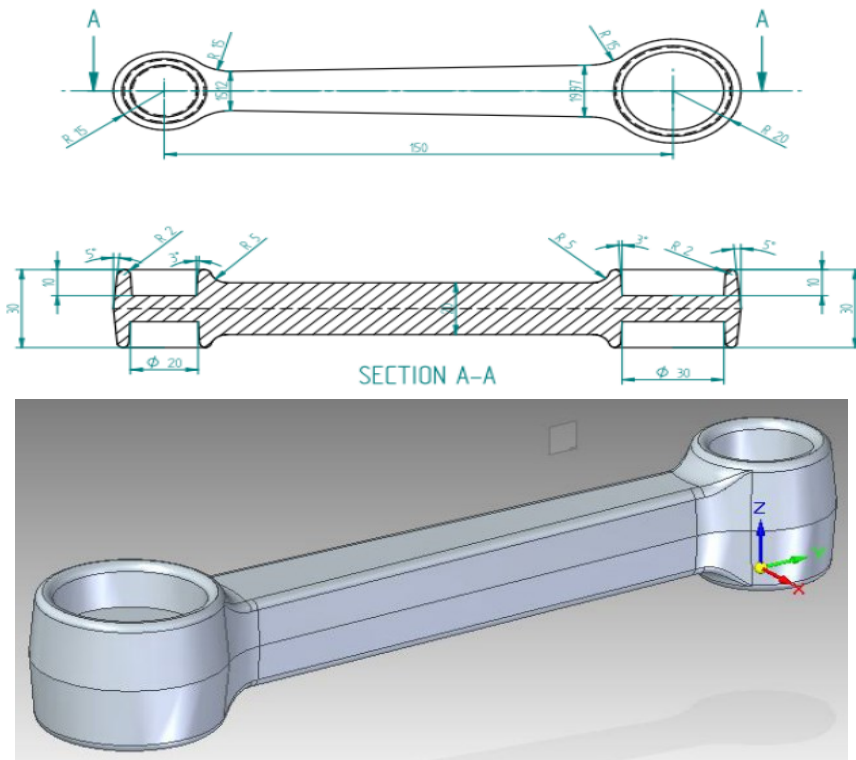
3.2. Warunki symulacji

Symulację procesu kucia matrycowego dźwigni na gorąco przy użyciu prasy hydraulicznej przeprowadzono korzystając z pakietu oprogramowania DEFORM-3D (rys. 3.3.). Jest to system symulacji wykorzystujący metodę elementów skończonych do analizy trójwymiarowej procesów przeróbki plastycznej. DEFORM-3D jest wiodącym oprogramowaniem używanym w instytutach badawczych i w przemyśle [18].

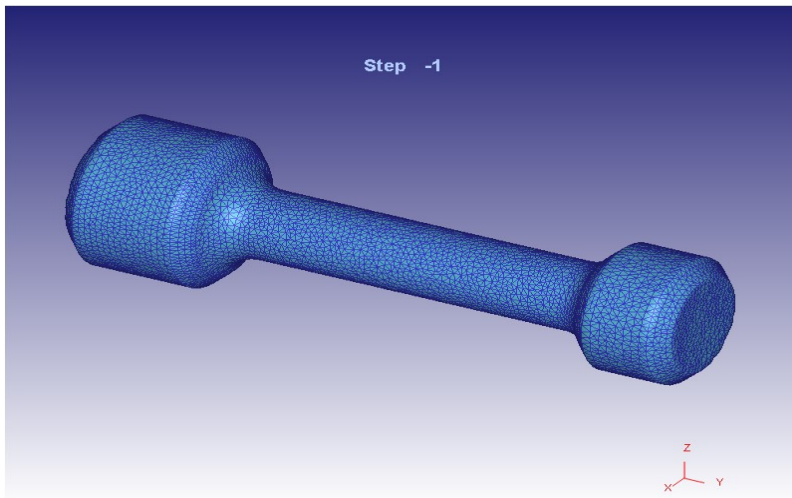


Rysunek 3.3 Ekran startowy oprogramowania DEFORM-3D [opracowanie własne]

Wsad w procesie kucia matrycowego dźwigni, której model geometryczny został przedstawiony na rys. 3.4 stanowiła przedkuwka w kształcie wałka stopniowanego, modelowana za pomocą czterowęzłowych elementów tetragonalnych. Wielkość elementu bazowego przyjęto równą 1 mm, co pozwoliło na podział wsadu w początkowym etapie obliczeń na 75000 elementów (rys. 3.5). W analizie numerycznej procesu kucia matrycowego wykorzystano model materiałowy stali niestopowej jakościowej C45. Stal ta znajduje zastosowanie w produkcji elementów maszyn i urządzeń, np. wrzecion, osi, wałów, dźwigni, krzywek itp. W obliczeniach przyjęto siłę nacisku prasy $F = 10000$ kN, współczynnik tarcia $\mu = 0,1$ oraz naddatek technologiczny wynoszący 15%. Założono, że matryca górna wykonuje ruch posuwisty do dołu ze stałą prędkością $v = 0,1$ m/s, natomiast matryca dolna pozostaje nieruchoma. Zastosowano tradycyjny rowek na wypływkę.



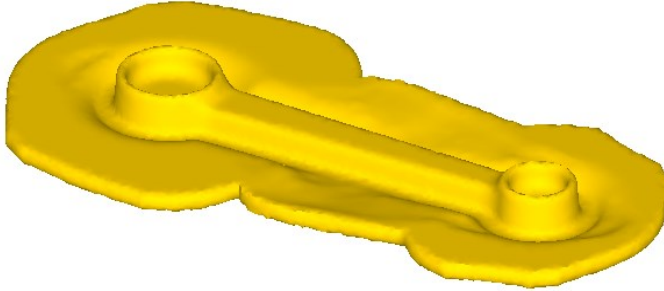
Rysunek 3.4 Model geometryczny dźwigni [opracowanie własne]



Rysunek 3.5 Model dyskretny wsadu w procesie kucia matrycowego [opracowanie własne]

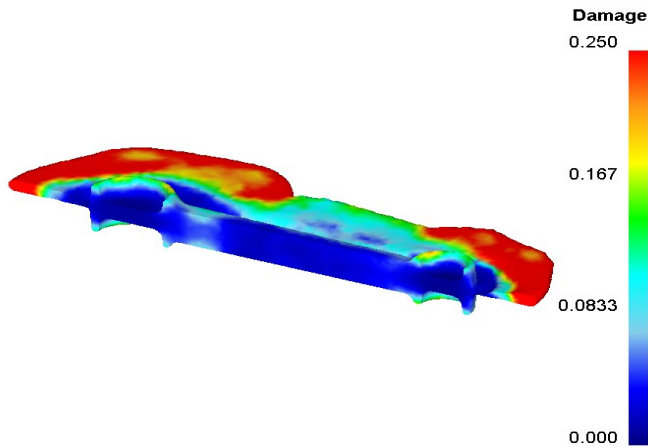
4. Wyniki i ich analiza

Na rys. 4.1. przedstawiono kształt dźwigni uzyskany w efekcie przeprowadzonej analizy numerycznej, w procesie kucia matrycowego w matrycach otwartych. Dla założonych parametrów procesu nie zaobserwowano występowania niedoskonałości, tj. pęknięć materiału, co stanowi potwierdzenie prawidłowości dobranych promieni zaokrągleń wsadu oraz deformacji kształtu.



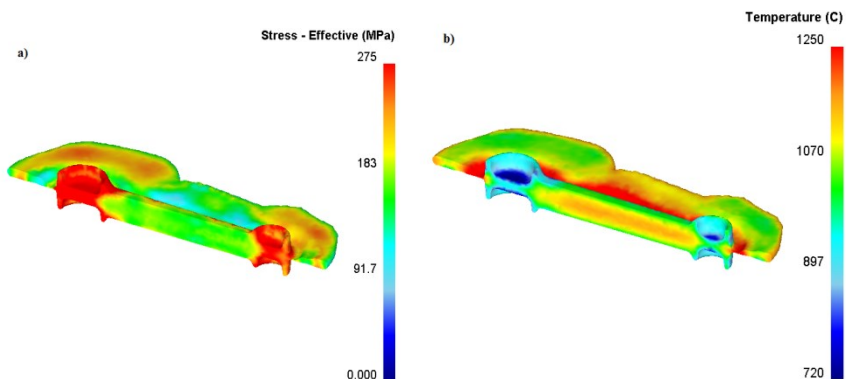
Rysunek 4.1 Odkuwka dźwigni uzyskana w symulacji numerycznej procesu kucia
[opracowanie własne]

Na rys. 4.2 przedstawiono rozkład wyników uzyskanych dla kryterium pęknięcia wg. Cockcrofta - Lathama w kutej dźwigni. Polega ono na określeniu wartości krytycznej odkształcenia plastycznego, w której dochodzi do utraty spójności kształtowanego materiału [19]. Zaobserwowane wartości kryterium występujące w elemencie są minimalne i obejmują stosunkowo niewielki obszar, co świadczy o poprawności dobranych parametrów procesu kucia. Największe wartości kryterium zaobserwowano na wypływcę, której zadaniem jest zapobieganie wypływaniu metalu z wykroju matrycy oraz zabezpieczanie matrycy górnej i dolnej przed wzajemnym uderzeniem i w rezultacie uszkodzeniem. Stosunkowo wysokie wartości parametru odnotowane dla wypływki wynikają z faktu iż stanowi ona najbardziej narażony na występowanie pęknięć obszar kutego elementu.



Rysunek 4.2 Rozkład intensywności uszkodzeń w odkuwce w końcowym etapie procesu [opracowanie własne]

Na rys. 4.3a) przedstawiono rozkład naprężeń w odkuwce w końcowym etapie procesu. Największe naprężenia występują na obu krańcach odkuwki, gdzie materiał stygnie dość intensywnie, przez co następuje wzrost oporów kształtowania. Równie wysokie wartości naprężeń odnotowano na końcach wyplwki, gdzie materiał jest zgniatany przez pracujące narzędzia. Maksymalne zarejestrowane naprężenia wynoszą 280 MPa i są stosunkowo niewielkie, co pozytywnie wpływa na trwałość narzędzi. Rozkład temperatur w przekroju odkuwki przedstawiono na rys. 4.3b). Największy spadek temperatury odnotowano w obszarze kształtowania wgłębień w odkuwce, gdzie narzędzia stykają się z materiałem najdłużej. Jest to zgodne z wcześniejszym stwierdzeniem o znacznym wzroście naprężeń w tych miejscach związanych ze spadkiem plastyczności w wyniku intensywnego stygnięcia metalu. Bardzo duży wzrost temperatury zaobserwowano na wyplwce wokół zarysu odkuwki. Temperatura w tym obszarze sięga 1250°C, co jest spowodowane dużą intensywnością odkształcania plastycznego wyplwki. W pozostałych obszarach temperatura jest stosunkowo wyrównana.



Rysunek 4.3 Rozkłady: a) naprężeń, b) temperatur w przekroju poprzecznym odkuwki [opracowanie własne]

5. Podsumowanie i wnioski

Wybór technologii kucia zamiast innych technik wytwarzania (np. odlewania) jest uwarunkowany wymaganiami dotyczącymi lepszych właściwości mechanicznych. Z odkuwek wykonuje się najbardziej odpowiedzialne części maszyn, co jest spowodowane licznymi zaletami tego procesu, do których należą m.in.: wysoka dokładność wykonania, możliwość łatwego i szybkiego kształtowania przedmiotów o skomplikowanej geometrii czy możliwość stosowania mniejszych naddatków technologicznych.

Analizę procesu kucia matrycowego dźwigni w matrycach otwartych przeprowadzono wykorzystując pakiet oprogramowania DEFORM-3D, przy użyciu metody elementów skończonych (MES). Obliczenia realizowano w warunkach przestrzennego stanu odkształcenia, ze względu na charakter płynięcia materiału. W symulacji zostały wyznaczone rozkłady kryterium uszkodzeń, naprężeń i temperatury w przekroju analizowanego wyrobu.

Przeprowadzona analiza numeryczna procesu kucia dźwigni, potwierdza poprawność dobranych parametrów procesu. Na dokładność końcowego wyrobu miało wpływ wiele czynników, np. odpowiednie dobranie promieni zaokrągleń wsadu. W innym przypadku istnieje wysokie prawdopodobieństwo powstania pęknięć w materiale już w pierwszych krokach procesu. Uzyskany w wyniku symulacji rozkład naprężeń nieprzekraczający 280 MPa, jest ważną informacją, która decyduje o wytrzymałości odkuwanego elementu, jak również trwałości narzędzi.

Literatura

1. Samołyk G., Pater Z. *Rowek na wyływkę*, Lubelskie Towarzystwo Naukowe, Lublin, 2005
2. Samołyk G. *Nowa technika symulacji procesu kucia matrycowego*, Przegląd Mechaniczny, 12/2003, s. 32-34
3. Samołyk G. *Podstawy analizy procesu kucia matrycowe z wykorzystaniem metody linii poślizgu i charakterystyk*, Eksploatacja i Niezawodność, 2/2003, s. 56-58
4. MacCormack C., Monaghan J. *Failure analysis of cold forging dies using FEA*, Journals of Materials Processing Technology, 17 (2001), s.209-215
5. Watanabe A., Fujikawa S., Ikeda A., Shiga N. *Prediction of Ductile Fracture in Cold Forging*, 11th International Conference on Technology of Plasticity, Japonia 2014, s. 425-430
6. Wasiunyk P. *Kucie matrycowe*, WNT, Warszawa, 1975
7. Wasiunyk P. *Teoria procesów kucia i prasowania*, WNT, Warszawa 1982
8. Pater Z., Samołyk G. *Podstawy technologii obróbki plastycznej metali*, Politechnika Lubelska, Lublin, 2013
9. Skubisz P., Sińczak J., Bednarek S., Łukaszek-Sołek A. *Technologie kucia matrycowego*, ARBOR FP, Kraków, 2010
10. Tomczak J., Bartnicki J. *Maszyny i urządzenia do obróbki plastycznej*, Politechnika Lubelska, Lublin, 2012
11. Dane z Internetu: <http://www.tomaco.pl>, (16.03.2015)
12. Meller A., Legutko S., Smolik J. *Badanie wpływu warstw hybrydowych na trwałość matryc do kucia na gorąco*, Archiwum Technologii Maszyn i Automatyzacji, 4(2010), s. 199-211
13. Budzyński A. *Krótki wstęp do zastosowania Metody Elementów Skończonych (MES) do numerycznych obliczeń inżynierskich*, dane z Internetu: <http://www.knse.pl/publikacje/65.pdf>(19.02.2015)
14. Łodygowski T., Kąkol W. *Metoda Elementów Skończonych w wybranych zagadnieniach mechaniki konstrukcji inżynierskich*, Politechnika Poznańska, Poznań 2003
15. Rusiński E., Czmochoowski J., Smolnicki T. *Zaawansowana metoda elementów skończonych w konstrukcjach nośnych*, Oficyna wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2000
16. Balonek K., Gozdur S. *Wprowadzenie do Metody Elementu Skończonego*, dane z Internetu: fatcat.ftj.agh.edu.pl/~i6balone/MES.pdf
17. Banas K. *Wprowadzenie do MES*, dane z Internetu: http://www.metal.agh.edu.pl/~banas/wprowadzenie_do_MES.pdf
18. Dane z oficjalnej strony internetowej Deform Simulation Software: <http://www.deform.com/products/deform-3d/>
19. Trębacz L. *Identyfikacja kryteriów pękania plastycznego w oparciu o wyniki badań doświadczalnych*, Rozprawa doktorska AGH, Kraków 2011