

# Numeryczna kompensacja skrętnych deformacji hartowniczych wytłoczki wyprodukowanej metodą tłoczenia na gorąco

## Numerical compensation of torsional hardening deformations of parts made by hot stamping

IRENEUSZ WRÓBEL  
ANDRZEJ GRABOŚ\*

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2018.10.159>

W artykule przedstawiono analizę deformacji hartowniczych typowej belki drzwiowej samochodu osobowego. Opracowano model obliczeniowy procesu tłoczenia na gorąco, który posłużył do symulacji i kompensacji deformacji hartowniczych analizowanej belki.

**SŁOWA KLUCZOWE:** tłoczenie blach, symulacja MES, tłoczenie na gorąco, deformacje hartownicze

*The article presents an analysis of hardening deformations for a typical door beam of a passenger car. A calculation model for the hot stamping process of the analyzed beam was developed. Such a model was used to simulate which resulted in hardening deformation and to compensate for these deformations.*

**KEYWORDS:** hot forming, FEM simulation, hardening distortion

Konstruktorzy karoserii samochodów osobowych dążą do zmniejszenia masy projektowanych konstrukcji. W tym celu wykorzystuje się nowe rodzaje materiałów i nowe technologie ich przetwarzania. Elementy karoserii samochodów klasy premium są produkowane z blach stalowych, z blach ze stopów aluminium oraz z materiałów kompozytowych opartych na włóknie węglowym. Karoserie popularnych samochodów wykonuje się ze stali o zwykłej lub podwyższonej wytrzymałości.

Coraz więcej elementów karoserii jest wytwarzanych z dobrze hartującej się stali 22MnB5, przeznaczonej do tłoczenia na gorąco, zapewniającego równoczesne kształtowanie i hartowanie wytłoczki. Przed obróbką cieplno-plastyczną stal ma strukturę ferrytyczno-perlityczną, a po obróbce struktura zmienia się w martenzytyczną. Pod wpływem tłoczenia na gorąco zmieniają się również właściwości mechaniczne. Granica plastyczności zwiększa się od ok. 450 MPa przed obróbką cieplną do ok. 1050 MPa po obróbce cieplnej, granica wytrzymałości – od 600 MPa do 1500 MPa, a twardość – od 190 HV do 420 HV. W wyniku procesu tłoczenia na gorąco wytrzymałość i twardość stali wzrastają więc ponad dwukrotnie.

### Cel badań

Analizując proces technologiczny tłoczenia na gorąco, zaobserwowano, że wytłoczki po hartowaniu mają tendencję do niekontrolowanej deformacji, co jest główną przyczyną niezgodności kształtowo-wymiarowych. Niezgodności te obserwuje się wtedy, gdy docelowy tłocznik został już wykonany i wyprodukowano partię prototypowych wytłoczek. W praktyce przemysłowej do skompensowania tych niezgodności konieczna jest zmiana kształtu powierzchni roboczych tłoczniaka prototypowego.

Wymaga to przeprowadzenia prac ślusarskich, takich jak napawanie, frezowanie, szlifowanie i tuszowanie (jest to tzw. dostosowywanie). Te prace wykonuje się w pętach – aż do uzyskania takiego kształtu powierzchni roboczych narzędzia prototypowego, który pozwoli wyprodukować wytłoczkę o kształcie zgodnym z tolerancją kształtowo-wymiarową. Po procesie dostosowywania kształt powierzchni roboczych jest przeniesiony z narzędzia prototypowego na narzędzie docelowe. Opisane podejście generuje wysokie koszty (związane z wykonaniem narzędzia prototypowego, pracami ślusarskimi, wielokrotnymi próbami i testami, długim czasem dostosowywania).

Omówione w artykule badania mają na celu zidentyfikowanie – z wykorzystaniem symulacji komputerowych – zjawiska powstawania odkształceń hartowniczych wytłoczek produkowanych metodą tłoczenia na gorąco. Po zidentyfikowaniu tych odkształceń planowane jest takie zmodyfikowanie kształtu powierzchni roboczych narzędzi, aby skompensować odkształcenia w finalnej wytłoczce.

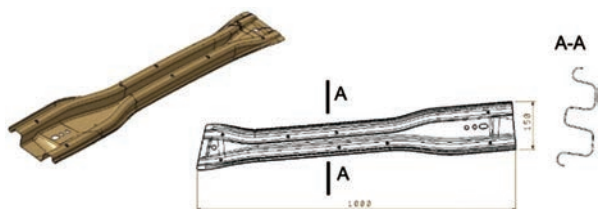
### Przyczyny deformacji hartowniczych [1]

Deformacje hartownicze są efektem działania naprężeń własnych, powstałych podczas obróbki cieplnej, a zwłaszcza podczas chłodzenia. Można wyodrębnić dwa zjawiska zachodzące w trakcie chłodzenia w hartowanych częściach maszyn. Pierwsze polega na tym, że następuje wzrost objętości, spowodowany przemianą struktury krystalicznej z gęstego ułożenia atomów (z austenitu) w strukturę krystaliczną o rzadszym ułożeniu atomów (w ferryt, cementyt i martenzyt), natomiast drugie – na powstawaniu naprężeń własnych w obrabianym cieplnie materiale, co jest efektem dużego skurczu cieplnego podczas chłodzenia. Dominującym zjawiskiem wywołującym naprężenia własne jest wzrost objętości wskutek przemiany austenitu w martenzyt podczas chłodzenia. Zmiana objętości jest tym większa, im szybciej zachodzi chłodzenie i materiał traci zdolność przystosowywania się do zmiany objętości. W tym samym czasie powstaje skurcz cieplny. Oba zjawiska w efekcie powodują deformacje i zmiany wymiarowe hartowanego wyrobu.

### Wybór elementu karoserii samochodu osobowego do analizy skrętnych deformacji hartowniczych

Do analizy deformacji hartowniczych, które mają charakter skręcenia, wybrano belkę drzwiową – typowy element drzwi samochodowych, który chroni kierowcę i pasażerów przed skutkami uderzenia bocznego. Belka ma przekrój poprzeczny w kształcie podwójnej litery U (rys. 1) oraz następujące wymiary: długość 1000 mm, szerokość 150 mm, grubość blachy 1 mm. Na podstawie dokumentacji technicznej i norm branżowych określono wymagania w zakresie tolerancji kształtowo-wymiarowej.

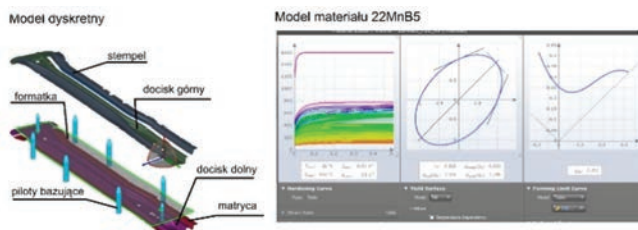
\* Dr hab. inż. Ireneusz Wróbel (iwrobel@ath.bielsko.pl) – Akademia Techniczno-Humanistyczna w Bielsku-Białej; mgr inż. Andrzej Graboś – Dział Badań i Rozwoju, Polsmotors sp. z o.o.



Rys. 1 Belka do badań deformacji hartowniczych o charakterze skręcenia

### Modele CAD tłoczniaka i formatki

Analizę deformacji hartowniczych w procesie tłoczenia przeprowadzono w systemie AutoForm v. 7. Najpierw wyznaczono kształt formatki, która po procesie tłoczenia na gorąco przyjmie kształt wytłoczki. Model CAD formatki oraz modele powierzchniowe CAD elementów tłoczniaka zaimportowano do oprogramowania AutoForm, a następnie zorientowano je względem siebie tak, jak w rzeczywistym tłoczniaku. Na rys. 2 przedstawiono model dyskretny stworzony na potrzeby symulacji procesu tłoczenia na gorąco. Matryca, stempel i docisk zostały zdykretyzowane sztywnymi elementami skończonymi typu powierzchniowego, a formatka – odkształcalnymi elementami skończonymi, którym przypisano właściwości materiałowe stali 22MnB5 oraz kierunek walcowania.



Rys. 2. Model dyskretny tłoczniaka i formatki oraz parametry modelu materiału na potrzeby symulacji tłoczenia na gorąco analizowanej belki

Oddziaływanie między powierzchniami roboczymi narzędzi a formatką zamodelowano za pomocą elementów kontaktowych z tarcieniem o współczynniku 0,45. Zdefiniowano też położenie pilotów, odpowiadających za powtarzalne i stabilne położenie formatki względem elementów tłoczniaka, oraz odpowiednią kinematykę procesu tłoczenia. W pierwszej kolejności docisk górny zamyka formatkę w docisku dolnym. W tym czasie zostaje uformowana środkowa część belki. Następnie porusza się stempel, który zamyka formatkę w matrycy i formuje brzeg belki. Narzędzia (docisk górny i stempel) poruszają się z dwiema prędkościami. Pierwsza to prędkość ruchu jałowego (dojście narzędzia do formatki), równa 650 mm/s, a druga – prędkość formowania, równa 80 mm/s.

Założono także parametry cieplne procesu tłoczenia na gorąco. Przyjęto, że formatka po wyjęciu z pieca ma temperaturę równą 920°C i jest przenoszona z pieca do matrycy w ciągu 6 s. Po procesie tłoczenia wytłoczka jest zamknięta w narzędziu przez 8 s – w tym czasie następuje proces hartowania. Założono, że narzędzie ma temperaturę równą 150°C, a siła jego docisku do formatki w trakcie hartowania jest równa 1,5 kN. Po hartowaniu wytłoczka jest chłodzona na wolnym powietrzu, aż osiągnie temperaturę otoczenia (20°C). Po tym czasie badane są deformacje hartownicze.

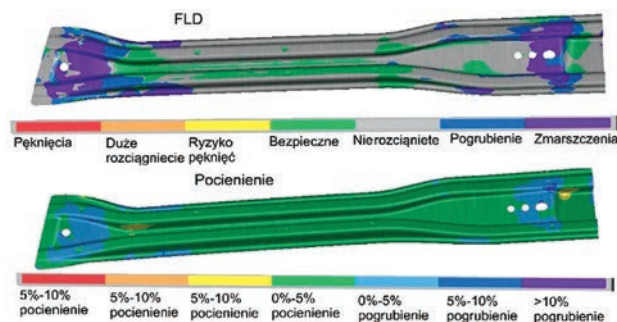
Opisany model został poddany analizie w solverze ThermoSolver oprogramowania AutoForm.

### Wyniki analizy

Do najważniejszych wyników symulacji MES procesów tłoczenia na gorąco, które są analizowane przez konstruk-

torów i technologów, można zaliczyć warstwicę FLD (*forming limit diagram*) wytłoczki oraz warstwicę pocienienia wytłoczki.

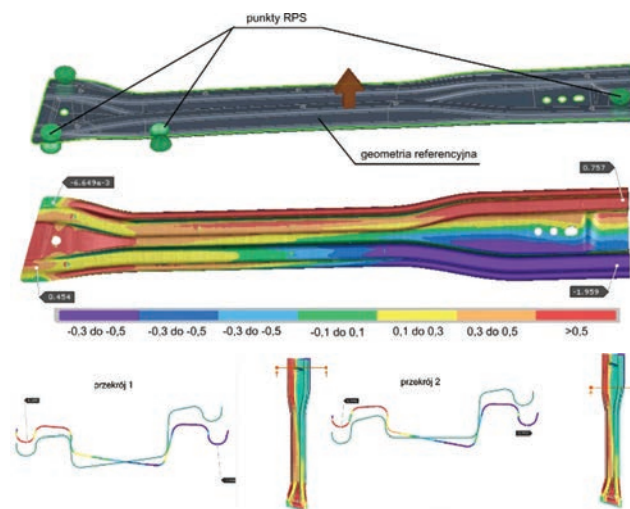
Na rys. 3 przedstawiono wyniki analizy belki drzewiowej. Na ich podstawie można stwierdzić, że zaproponowany proces tłoczenia na gorąco spełnia stawiane mu wymagania techniczne i technologiczne. Nie stwierdzono ryzyka pojawienia się na wytłoczce stref ze zmarszczkami i pęknięciami. Wytłoczka będzie miała wymagane parametry związane z hartowaniem (twardość i strukturę).



Rys. 3. Warstwicę FLD i pocienienia analizowanej belki drzewiowej

### Analiza deformacji hartowniczych belki drzewiowej

Deformacje hartownicze belki uzyskane na drodze symulacji porównano z modelem referencyjnym (CAD) w punktach RPS, w których odległość modelu referencyjnego od wyników obliczeniowego jest równa zero. Na rys. 4 przedstawiono deformacje modelu, analizowane w odniesieniu do modelu referencyjnego, dopasowane w punktach RPS. Maksymalne deformacje belki wynoszą +0,8 mm i -2 mm. Dominującą formą deformacji jest skręcenie.



Rys. 4. Deformacje hartownicze (w mm) względem modelu referencyjnego, dopasowanego w punktach RPS

### Kompensacja deformacji hartowniczych

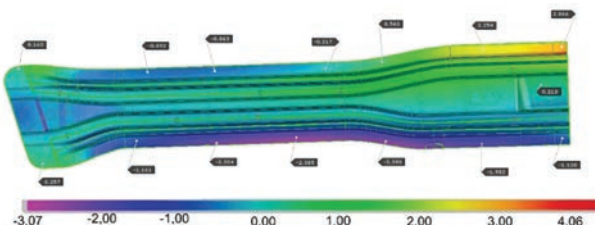
Wartości deformacji hartowniczych przekraczają dopuszczalne tolerancje kształtowo-wymiarowe podane dla analizowanej belki. Jak więc skorygować powierzchnie kształtujące narzędzi (stempli, matrycy i docisków), aby skompensować te deformacje? Ostatecznym celem jest uzyskanie wytłoczki, która po zahartowaniu będzie się mieściła w tolerancji kształtowo-wymiarowej.

Do rozwiązania tego zadania wykorzystano narzędzie AutoForm Compensator. Zdefiniowano te powierzchnie

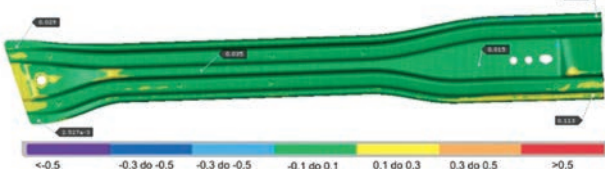
narzędzi, których kształt będzie korygowany. Zadanie kompensacji deformacji hartowniczych rozwiązywano iteracyjnie do momentu, w którym w ostatniej pętli maksymalne deformacje hartownicze mieściły się w polu tolerancji kształtowo-wymiarowej belki.

Do kompensacji wybrano model geometryczny matrycy, stempla, docisku górnego i dolnego. W drugiej iteracji uzyskano poprawę dokładności kształtowo-wymiarowej wyłóczki. Zdefiniowano zalecane parametry procesu kompensacji geometrii: współczynnik kompensacji i współczynnik wygładzania [2].

Na rys. 5 przedstawiono warstwicę reprezentującą wartości korekt kształtu powierzchni roboczej tłoczniaka (w stosunku do narzędzia bazowego) po drugiej iteracji kompensacji, a na rys. 6 – deformacje hartownicze po drugiej iteracji kompensacji, mierzone względem modelu referencyjnego, dopasowanego w punktach RPS. Jak widać, deformacje hartownicze zmniejszyły się do wartości, które zapewniają wyprodukowanie wyłóczek w zakładanej dokładności kształtowo-wymiarowej. Największa wartość deformacji wynosi 0,13 mm. Przeanalizowano także diagramy FLD, pocienienia, twardość oraz udział martenzytu w wyłóczce. Nie stwierdzono ryzyka powstawania wad wyłóczek.



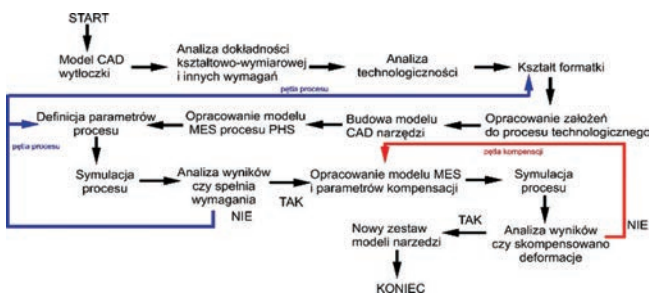
Rys. 5. Warstwicę korekt kształtu powierzchni roboczych tłoczniaka po drugiej iteracji kompensacji



Rys. 6. Deformacje hartownicze (w mm) po drugiej iteracji procesu kompensacji

## Wnioski

Na rys. 7 pokazano schemat czynności, które należy wykonać podczas analizy kompensacji deformacji hartowniczych. Proces zaczyna się od analizy dokładności kształtowo-wymiarowej wyłóczki i wymagań dotyczących parametrów mechanicznych po procesie tłoczenia na gorąco. Wynikiem tej analizy są szczegółowe wymagania dotyczące dokładności wykonania wyłóczki – tolerancje obrysu, tolerancje odwzorowania powierzchni, tolerancje wykonania oraz pozycji otworów itp.



Rys. 7. Schemat postępowania podczas analizy kompensacji deformacji hartowniczych

Kolejnym etapem jest analiza technologiczności wyłóczki, polegająca na wyszukaniu optymalnego kierunku tłoczenia oraz sprawdzenia, czy zostało zachowane odpowiednie pochylenie ścianek wyłóczki względem kierunku tłoczenia. Następnie wyznacza się kształt formatki i opracowuje: założenia do procesu technologicznego produkcji wyłóczki, koncepcję budowy narzędzia, sekwencje formowania obszarów wyłóczki itp. Na bazie modelu CAD wyłóczki modeluje się wszystkie elementy narzędzia – są to modele powierzchniowe. Dalej opracowuje się model MES procesu technologicznego wykonania wyłóczki i definiuje się wszystkie parametry techniczne związane z procesem. Po przeprowadzeniu symulacji MES analizuje się wyniki FLD i pocienienia oraz wyniki związane z procesem hartowania (twardość i udział martenzytu w wyłóczce). Jeśli wyniki nie spełniają wymagań, zmienia się określone założenia do procesu technologicznego (np. sekwencję wykonania wyłóczki), kształt formatki (w niewielkim zakresie) lub wybrane parametry procesu (np. czas przenoszenia formatki z pieca do prasy), a następnie ponownie wykonuje się symulacje. Symulacje przeprowadza się w pętlach (kolor niebieski na rys. 7) – aż do uzyskania poprawnych wyników. Gdy wyniki symulacji potwierdzą, że analizowana wyłóczka spełnia wymagania procesu obróbki plastycznej i cieplnej, w kolejnym kroku analizowane są deformacje hartownicze w celu ich skompensowania. Najpierw budowany jest model MES ze skompensowanymi modelami narzędzi, który poddaje się symulacji. W wyniku uzyskuje się skompensowane deformacje hartownicze, które po każdej pętli powinny mieć coraz mniejsze wartości. Symulacje przeprowadza się w pętlach – do uzyskania deformacji spełniających wymagania dotyczące dokładności kształtowo-wymiarowej analizowanej wyłóczki.

Efektom końcowym analizy jest zestaw modeli CAD narzędzi, których kształt (uzyskany na drodze symulacji komputerowej) umożliwia produkcję wyłóczek w zakładanej dokładności kształtowo-wymiarowej. Modele te posłużą jako baza do konstruowania elementów tłoczniaka.

Komputerowa analiza deformacji hartowniczych pozwoli wyeliminować kosztowne i czasochłonne procesy dostosowania narzędzi na etapie uruchamiania produkcji, a także potrzebę budowania prototypowych narzędzi do badania deformacji hartowniczych.

Przedstawiona metodologia może być zbiorem najlepszych praktyk w rozwiązywaniu takich problemów.

**Badania wykonano w ramach projektu pt. „Prace B+R nad technologią projektowania i konstrukcji tłoczniaków do obróbki metali metodą tłoczenia na gorąco, bazującą na systemie obliczeniowym mechaniki płynów i sprzężonych symulacjach przepływów ciepła i czynnika chodzącego oraz uwzględniającą zjawiska odkształceń hartowniczych wyłóczek”, finansowanego ze środków UE (poddziałanie 1.1.1 Programu Operacyjnego Inteligentny Rozwój).**

## LITERATURA

1. Blicharski M. „Inżynieria materiałowa”. WNT, 2012.
2. Autoform v7 Help System.
3. Ping Hu, Liang Ying, Bin He. „Hot Stamping Advanced Manufacturing Technology of Lightweight Car Body”. Springer, 2017.
4. Liu H., Liu W., Bao J., Xing Z., Song B., Lei Ch. „Numerical and Experimental Investigation into Hot Forming of Ultra High Strength Steel Sheet”. ASM International, 2011.
5. Gunnarsdóttir S.A., Rodríguez Basurto A., Wärmefjord K., Söderberg R., Lindkvist L., Albinsson O., Wandebäck F., Hansson S. “Towards Simulation of Geometrical Effects of Laser Tempering of BoronSteel before Self-Pierce Riveting”. 6th CIRP Conference on Assembly Technologies and Systems, 2016.