

Numeryczna i eksperymentalna analiza deformacji hartowniczych wytłoczek w procesie tłoczenia na gorąco

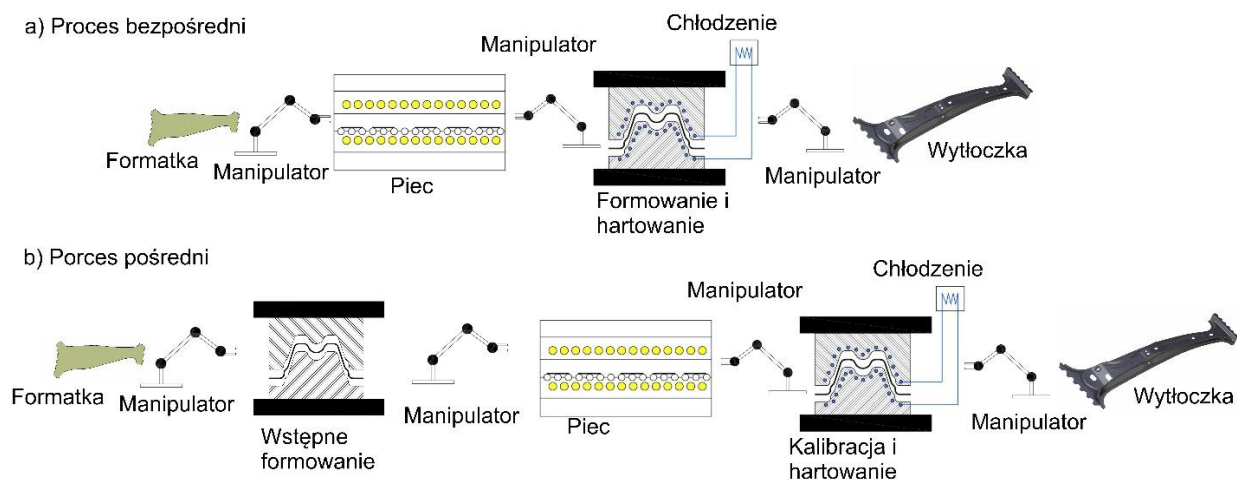
1. WSTĘP

Jednym z celów konstruktorów karoserii współczesnych samochodów osobowych jest zmniejszenie masy projektowanych konstrukcji [1, 2]. Wymusza to zastosowanie nowych rodzajów materiałów konstrukcyjnych i nowych technologii ich przetwarzania. Wybrane elementy karoserii produkowane są ze stali 22MnB5 [4, 5]. Stal 22MnB5 jest stalą dobrze hartującą się, przeznaczoną do tłoczenia na gorąco, podczas którego następuje równoczesne kształtowanie i hartowanie wytłoczki [3].

Technologię tłoczenia na gorąco można podzielić na dwie metody bezpośrednią i pośrednią. W metodzie bezpośredniej (rys. 1a) formatka po podgrzaniu w piecu (950 °C), przenoszona jest do prasy, gdzie następnie formowane i hartowane wytłoczki w zamkniętym narzędziu, które jest chłodzone wodą. W metodzie pośredniej (rys. 1b) wstępnie ukształtowana wytłoczka jest podgrzewana w piecu (950 °C), następnie jest przenoszona do prasy, gdzie następuje ostateczna kalibracja kształtu wytłoczki i jej hartowanie. Ważny jest odpowiedni dobór parametrów termicznych i mechanicznych procesu, takich jak: temperatura austenitizacji, czas przenoszenia formatki z pieca do prasy, szybkość chłodzenia w prasie, czas hartowania. Wszystkie te czynniki są krytyczne dla końcowych właściwości produktu.

Podczas procesu tłoczenia na gorąco materiał ze struktury ferrytyczno-perlitycznej przemienia się w strukturę martenzytyczną. Do tego wymagana jest wysoka szybkość chłodzenia wynosząca co najmniej 27 K / s. W tym celu stosuje się narzędzia ze specjalnie zaprojektowanymi kanałami chłodzącymi.

Po procesie tłoczenia na gorąco materiał wytłoczki może osiągnąć wytrzymałość na rozciąganie w przedziale 1500–1900 MPa. Technologia ta pozwala także na wyprodukowanie wytłoczek o zmiennych parametrach mechanicznych. W takim przypadku stosuje się specjalne narzędzie, w którym można wyodrębnić strefę podgrzewaną i strefą chłodzoną. W strefie podgrzewanej narzędzia w ukształtowanej wytłoczce nie zachodzi przemiana martenzytyczna i materiał ma niższe parametry mechaniczne niż w strefie chłodzonej wodą.



Rys. 1 Metody tłoczenia na gorąco (a) metoda bezpośrednia, (b) metoda pośrednia

Analizując proces technologiczny tłoczenia na gorąco zaobserwowano, że wytłoczki (szczególnie o bardziej złożonym kształcie) po wyjęciu ich z tłoczni, mają tendencję do niekontrolowanej deformacji. Jest to jedna z przyczyn niezgodności kształtowo wymiarowych produkowanych wytłoczek z dokumentacją. Niezgodności te obserwuje się wtedy, gdy docelowy tłocznik jest już wykonany i wyprodukowano partię prototypowych wytłoczek.

Badania zostały wykonane w ramach projektu pt. „Prace B+R nad technologią projektowania i konstrukcji tłoczników do obróbki metali metodą tłoczenia na gorąco, bazującą na systemie obliczeniowym mechaniki płynów i sprzężonych symulacjach przepływów ciepła i czynnika chłodzącego oraz uwzględniającą zjawiska odkształceń hartowniczych wytłoczek” finansowanego ze środków UE (poddziałanie 1.1.1 Programu Operacyjnego Inteligentny Rozwój). POIR.01.01.01-00-0572/15-00



Fundusze Europejskie



Rzeczpospolita Polska

Unia Europejska
Europejskie Fundusze
Strukturalne i Inwestycyjne



W praktyce przemysłowej, aby skompensować te niezgodności konieczna jest zmiana kształtu powierzchni roboczych tłoczni. Wykonuje się prace ślusarskie takie jak napawanie, frezowanie, szlifowanie, tuszowanie itp. Celem końcowym tych prac jest uzyskanie takiego kształtu powierzchni roboczych narzędzia prototypowego, aby na końcu można było wyprodukować wytłoczkę zgodną z dokumentacją pod względem kształtu i wymiarów. Takie podejście generuje duże koszty (prace ślusarskie, wielokrotne próby i testy). Przedstawione wyniki badań mają na celu określenie wartości i kształtu odkształceń hartowniczych wytłoczek produkowanych metodą tłoczenia na gorąco i ich skompensowanie za pomocą symulacji komputerowych. Kompensacja polega na odpowiedniej modyfikacji kształtu powierzchni roboczych narzędzi w taki sposób, aby produkowana wytłoczka spełniała oczekiwaną dokładność kształtowo-wymiarową. Prezentowany referat stanowi nowe podejście do rozwiązania problemu kompensacji deformacji hartowniczych. Wykorzystując symulacje numeryczne sprawdzono czy w danym procesie tłoczenia na gorąco pojawi się zjawisko deformacji hartowniczych, obliczono ich wartość oraz skompensowano je modyfikując kształt powierzchni kształtujących tłoczni.

Na podstawie doświadczeń przemysłowych autora publikacji zaproponowano autorski podział deformacji z uwagi na ich kształt tj.:

- wygięcie – dominującą formą deformacji jest wygięcie się wytłoczki po wyjęciu z tłoczni,
- skręcanie (zwichrzenie) – dominującą formą deformacji jest skręcenie się wytłoczki wokół wyobrażalnej osi wytłoczki po wyjęciu z tłoczni,

Wykonano numeryczne symulacje procesu tłoczenia na gorąco dla reprezentatywnych wytłoczek, w których deformacje hartownicze można przypisać do wyżej wymienionych dwóch rodzajów.

2. DEFORMACJE HARTOWNICZE – ŹRÓDŁO POCHODZENIA

Deformacje hartownicze są efektem działania naprężeń własnych powstałych podczas obróbki cieplnej, a w szczególności podczas chłodzenia [11, 12]. Można wyodrębnić dwa zjawiska, które zachodzą podczas chłodzenia w hartowanych częściach maszyn. Pierwsze polega na tym że następuje wzrost objętości, który jest spowodowany przemianą struktury krystalicznej z gęstego ułożenia atomów (austenit) w strukturę krystaliczną o rzadszym ułożeniu atomów (feryt, cementyt i martenzyt). Drugie polega na powstawaniu naprężeń własnych w obrabianych cieplnie częściach maszyn będących efektem dużego skurczu cieplnego podczas chłodzenia. Dominującym zjawiskiem wpływającym na powstawanie naprężeń własnych jest wzrost objętości spowodowany przemianą austenitu w martenzyt podczas chłodzenia [11]. Zmiana objętości jest tym większa im większa jest szybkość chłodzenia, kiedy to materiał traci zdolność przystosowania się do zmiany objętości. W tym samym czasie powstaje skurcz cieplny. Oba zjawiska w efekcie końcowym powodują deformacje i zmiany wymiarowe hartowanego wyrobu [6,7,8].

3. POSTAĆ SKRĘTNA DEFORMACJI HARTOWNICZYCH

Do analiz deformacji hartowniczych, które mają charakter skręcenia wybrano belkę drzewiową. Na rysunku 2 a) przedstawiono konstrukcję wybranej belki. Jest to belka o następujących wymiarach: długość 1000 mm, szerokość 150 mm, grubość 1 mm. Analizę deformacji hartowniczych w procesie tłoczenia przeprowadzono w systemie Autoform v 7. W pierwszej kolejności wyznaczono kształt formatki, oraz wykonano modele CAD powierzchni roboczych narzędzi, to jest matrycy, stempli i docisków, które w dalszej kolejności posłużyły do budowy modelu dyskretnego narzędzia i formatki (rys.1 b). Matryca, stempel i dociski są zdyskretyzowane sztywnymi elementami skończonymi typu powierzchniowego. Formatkę zdyskretyzowano płaskimi elementami skończonymi typu EPS 11 (Elasto-Plastic Shell). Są to elementy o kształcie trójkątna mający pięć stopni swobody (dwie translacje wzdłuż wektora stycznego oraz jedną wzdłuż wektora normalnego oraz dwie rotacje wokół wektorów stycznych). Posiada on z jedenastoma punktami całkowania wzdłuż grubości. Elementy ten jest zgodny z teorią Reissnera-Mindlina . Do modelu formatki przypisano im właściwości materiałowe stali 22MnB5 [7,9].

Oddziaływanie pomiędzy powierzchniami roboczymi narzędzia a formatką zamodelowano za pomocą elementów kontaktowych (zgodne z algorytmem Panalty) z tarcieniem ze współczynnikiem tarcia równym 0,5 [GG]. Zdefiniowano także położenie pilotów, które odpowiadają za powtarzalne i stabilne położenie formatki względem tłoczni.

Badania zostały wykonane w ramach projektu pt. „Prace B+R nad technologią projektowania i konstrukcji tłoczników do obróbki metali metodą tłoczenia na gorąco, bazującą na systemie obliczeniowym mechaniki płynów i sprzężonych symulacjach przepływów ciepła i czynnika chłodzącego oraz uwzględniającą zjawiska odkształceń hartowniczych wytłoczek” finansowanego ze środków UE (poddziałanie 1.1.1 Programu Operacyjnego Inteligentny Rozwój). POIR.01.01.01-00-0572/15-00



Fundusze Europejskie



Rzeczpospolita Polska

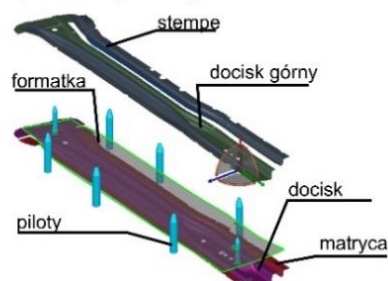
Unia Europejska
Europejskie Fundusze
Strukturalne i Inwestycyjne



a) model belki



b) model dyskretny tłoczніка



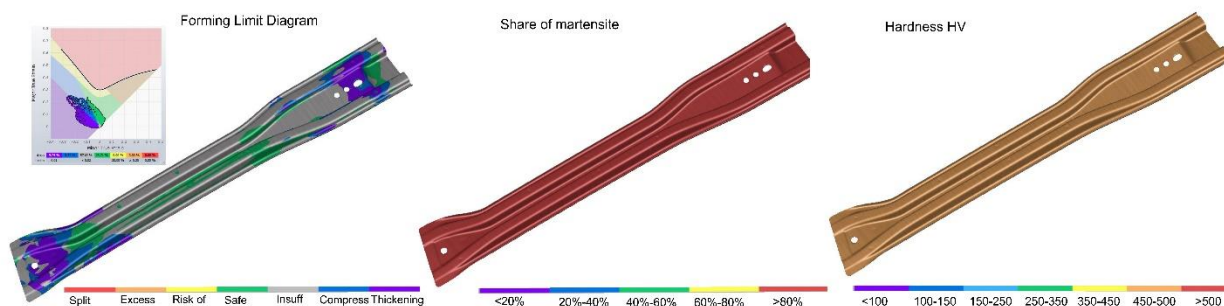
Rys.2 a) model CAD belki, b) model dyskretny tłoczніка

Dla opracowanego modelu tłoczніка i formátki zdefiniowano kinematykę procesu tłoczenia oraz jej parametry cieplne i mechaniczne. Miały one następujące wartości:

- prędkość tłoczenia $80 \frac{mm}{sek}$,
- temperaturę otoczenia $20^{\circ}C$,
- współczynnik przewodzenia ciepła z formátki do tłoczніка $3,5 \frac{mW}{mm^2 K}$ i był on skalowany w zależności od wartości nacisku tłoczніка do formátki,
- współczynnik przewodzenia ciepła z formátki i tłoczніка do otoczenia zmienny liniowo i zależny od temperatury formátki i tłoczніка (dla $20^{\circ}C$ równy $0,02 \frac{mW}{mm^2 K}$, dla $950^{\circ}C$ równy $0,075 \frac{mW}{mm^2 K}$),
- temperatura tłoczніка - $150^{\circ}C$,
- Siła docisku tłoczніка do wytłoczki podczas hartowania 1500 KN
- Czas hartowania 8sek.

Są to zalecane i potwierdzone w praktyce przez producenta oprogramowania Autoform wartości parametrów cieplno mechanicznych jakie należy przyjąć w symulacji procesów tłoczenia na gorąco.

Tak zbudowany model został poddany analizie procesu tłoczenia i hartowania. Była to sprzężona termomechaniczna analiza z typu implicit. Na rysunku 3 przedstawiono najważniejsze wyniki symulacji.



Rys 3 Wyniki symulacji tłoczenia na gorąco belki drzewiowej

Analizując wyniki symulacji przedstawionych na rysunku 3 można stwierdzić, że zaproponowany proces technologiczny tłoczenia na gorąco spełnia wymagania techniczne. Nie stwierdzono ryzyka pojawienia się w wytłoczce stref zmarszczeń i pęknięć. Nie przekroczono też dopuszczalnego pocienienia wytłoczki (15%). Wytłoczka uzyskała wymaganą twardość (powyżej 450 HV) i strukturę martenzytyczną (powyżej 80%).

Analizując deformacje hartownicze wytłoczki, porównano je do modelu referencyjnego dopasowując je w punktach referencyjnych RPS [HH], w których odległość modelu referencyjnego od modelu zdeformowanego jest równa zero. Na rysunku 4 przedstawiono deformację modelu wyznaczoną względem modelu referencyjnego, który dopasowano w punktach RPS.

Badania zostały wykonane w ramach projektu pt. „Prace B+R nad technologią projektowania i konstrukcji tłoczników do obróbki metali metodą tłoczenia na gorąco, bazującą na systemie obliczeniowym mechaniki płynów i sprzężonych symulacjach przepływów ciepła i czynnika chłodzącego oraz uwzględniającą zjawiska odkształceń hartowniczych wytłoczek” finansowanego ze środków UE (poddziałanie 1.1.1 Programu Operacyjnego Inteligentny Rozwój). POIR.01.01.01-00-0572/15-00

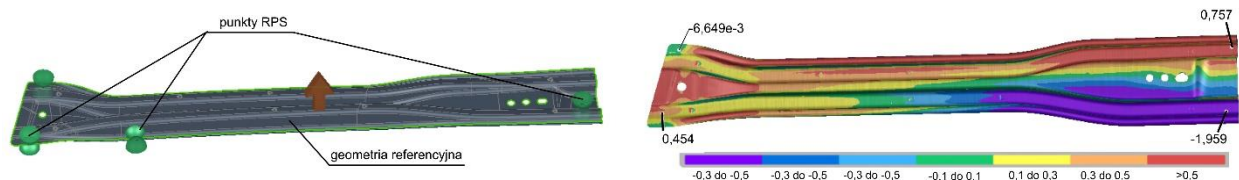


Fundusze Europejskie



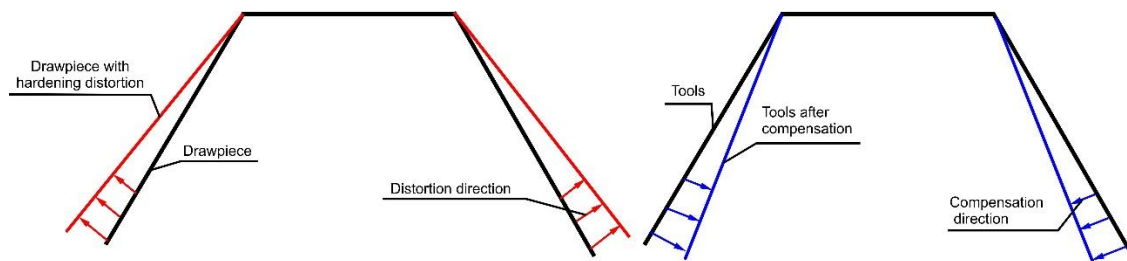
Rzeczpospolita Polska

Unia Europejska
Europejskie Fundusze
Strukturalne i Inwestycyjne



Rys. 4 Deformacja modelu belki wyznaczona w punktach RPS

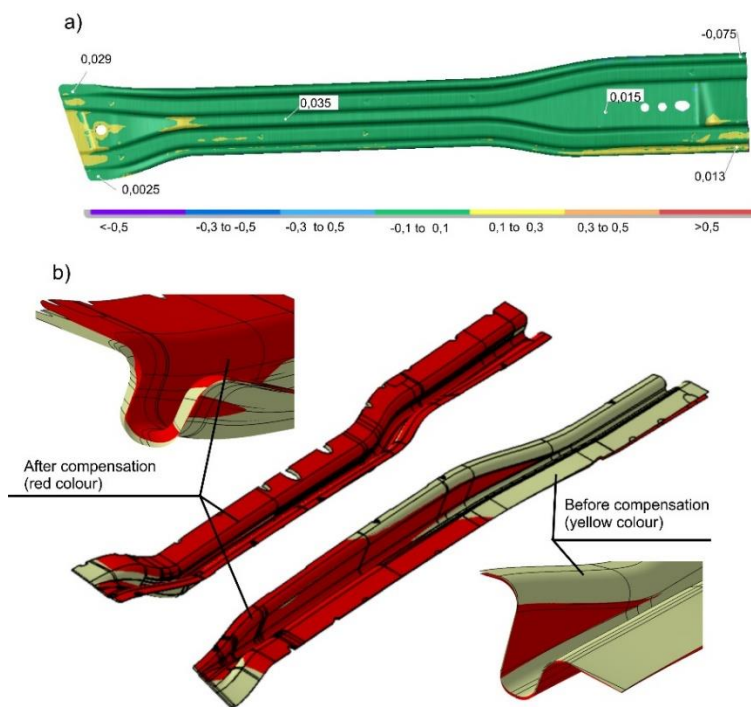
Wartości deformacji hartowniczych (max. -1.959 mm) przekraczają dopuszczalne wartości tolerancji kształtowo-wymiarowych jakie zdefiniowano w dokumentacji dla analizowanej belki ($\pm 0,4$ mm). Powstaje pytanie: w jaki sposób skorygować powierzchnie kształtujące narzędzi (stempli, matryc i docisków), aby skompensować deformacje hartownicze wytłoczki? Do tego celu wykorzystano narzędzie Autoform Compensator [10]. Narzędzie to w sposób automatyczny deformuje kształt powierzchni narzędzia (matrycy i stempla). Kierunek deformacji powierzchni narzędzia jest przeciwny do kierunku deformacji hartowniczych wytłoczki. Proces odbywa się iteracyjnie, tak aby po kilku iteracjach uzyskać wytłoczkę ze skompensowanymi deformacjami hartowniczymi. Proces kompensacji w każdej iteracji może być sterowany za pomocą współczynnika kompensacji (compensation factor), który odpowiada za siłę deformacji powierzchni narzędzi. Im on jest wyższy tym mniej iteracji kompensacyjnych, należy wykonać, aby skompensować deformacje hartownicze wytłoczki. Zaleca się dobrać tak ten współczynnik, aby deformację hartownicze zostały skompensowane w 4-5 iteracjach. Na rysunku 5 przedstawiono sposób działania narzędzia Autoform Compensator.



Rys. 5 Sposób działania narzędzia Autoform Compensator

Aby skompensować deformacje hartownicze wytłoczki zdefiniowano powierzchnie narzędzi, których kształt będzie korygowany w trakcie kompensacji. Do kompensacji wybrano model geometryczny matrycy, stempla, docisku górnego i dolnego.

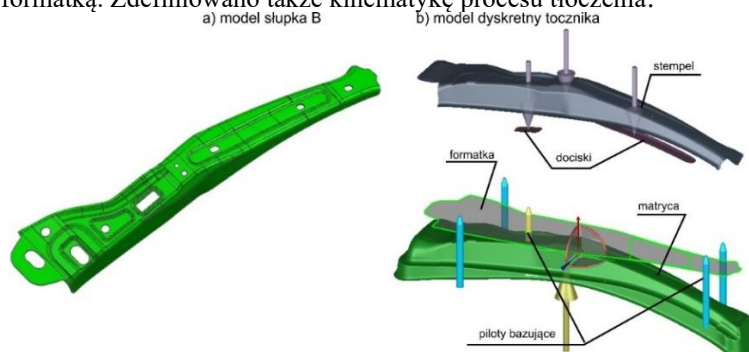
Na rysunku 6a) przedstawiono wyniki deformacji hartowniczych po kompensacji powierzchni kształtujących narzędzi, mierzone względem modelu referencyjnego dopasowanego w punktach RPS, a na rysunku 6b) przedstawiono modele CAD stempla przed i po kompensacji.



Rys. 6 a) Deformacje hartownicze belki po kompensacji, b) modele CAD stempla przed i po kompensacji

4. DEFORMACJE HARTOWNICZE W FORMIE WYGIĘCIA

Do analiz deformacji hartowniczych, w których dominuje wygięcie wybrano wewnętrzną część słupka B. Jest to element o następujących wymiarach: długość 1000 mm, maksymalna szerokość 200 mm. Dodatkowo wewnętrzna część słupka B element posiada nakładkę wzmacniającą (z ang. „patch”). Model CAD słupka B przedstawiono na rysunku 7a). Na potrzeby analizy MES procesu tłoczenia wykonano modele CAD i modele dyskretne MES matrycy stempla i docisków (rys. 4b). Dodatkowo określono położenie pilotów bazujących, współczynniki tarcia pomiędzy elementami narzędzia i formatką. Zdefiniowano także kinematykę procesu tłoczenia.



Rys. 7 a) Model CAD słupka B, b) model dyskretny tłocznika

Taki model został poddany obliczeniom w solverze thermosolver oprogramowania Autoform. Analizując wyniki symulacji można stwierdzić, że zaproponowany proces technologiczny tłoczenia na gorąco spełnia wymagania techniczne. Na rysunku 8 przedstawiono najważniejsze wyniki symulacji.

Badania zostały wykonane w ramach projektu pt. „Prace B+R nad technologią projektowania i konstrukcji tłoczników do obróbki metali metodą tłoczenia na gorąco, bazującą na systemie obliczeniowym mechaniki płynów i sprzężonych symulacjach przepływów ciepła i czynnika chłodzącego oraz uwzględniającą zjawiska odkształceń hartowniczych wytłoczek” finansowanego ze środków UE (poddziałanie 1.1.1 Programu Operacyjnego Inteligentny Rozwój). POIR.01.01.01-00-0572/15-00



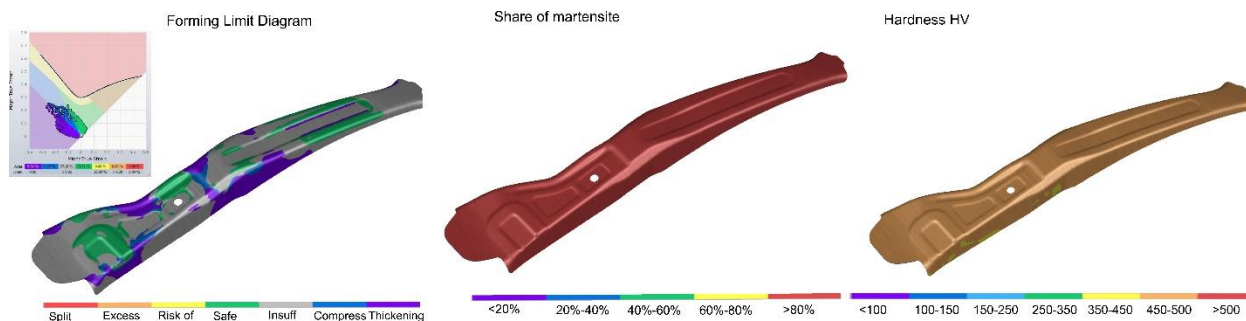
Fundusze Europejskie



Rzeczpospolita Polska

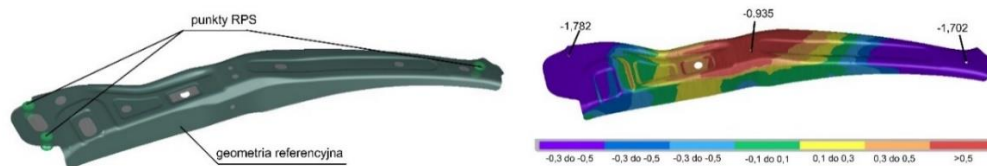
Unia Europejska
Europejskie Fundusze
Strukturalne i Inwestycyjne





Rys. 8 Wyniki symulacji tłoczenia na gorąco wnętrza słupka B

Nie stwierdzono ryzyka pojawienia się w wytłoczce stref zmarszczeń i pęknięć. Nie przekroczono też dopuszczalnego pocienienia wytłoczki (15%). Wytłoczka uzyskała wymaganą twardość (>400 HV) i strukturę martenzytyczną (>80%). W podobny sposób jak w przypadku belki drzwiowej przeanalizowano deformacje hartownicze słupka B. Na rysunku 9 przedstawiono deformacje modelu wewnętrznej części słupka B względem modelu referencyjnego.



Rys.9 Deformacja modelu wewnętrznej części słupka B wyznaczona w punktach RPS

Charakter deformacji hartowniczych pokazanych na rysunku 9 wskazuje, że dominującą formą deformacji jest wygięcie. Środek modelu przemieścił się do góry a końce w dół. Wartości deformacji hartowniczych przekraczają dopuszczalne wartości tolerancji kształtowo-wymiarowych jakie zdefiniowano w dokumentacji technicznej. Zastosowano podobne postępowanie jak opisane przy analizie deformacji hartowniczych belki drzwiowej. Do kompensacji wybrano model geometryczny matrycy, stempla, docisku górnego i dolnego. W wyniku przeprowadzonej analizy kompensacji uzyskano nowy zestaw modeli powierzchni roboczych tłocznika (matrycy, stempla, docisku górnego i docisku dolnego). Dla tego nowego modelu ponownie wykonano symulację procesu tłoczenia na gorąco. Na rysunku 10 a) przedstawiono wartości deformacji hartowniczych po kompensacji, mierzone względem modelu referencyjnego dopasowanego w punktach RPS a na rysunku 10 b) przedstawiono modele CAD matrycy przed i po kompensacji.

Badania zostały wykonane w ramach projektu pt. „Prace B+R nad technologią projektowania i konstrukcji tłoczników do obróbki metali metodą tłoczenia na gorąco, bazującą na systemie obliczeniowym mechaniki płynów i sprzężonych symulacjach przepływów ciepła i czynnika chłodzącego oraz uwzględniającą zjawiska odkształceń hartowniczych wytłoczek” finansowanego ze środków UE (poddziałanie 1.1.1 Programu Operacyjnego Inteligentny Rozwój). POIR.01.01.01-00-0572/15-00



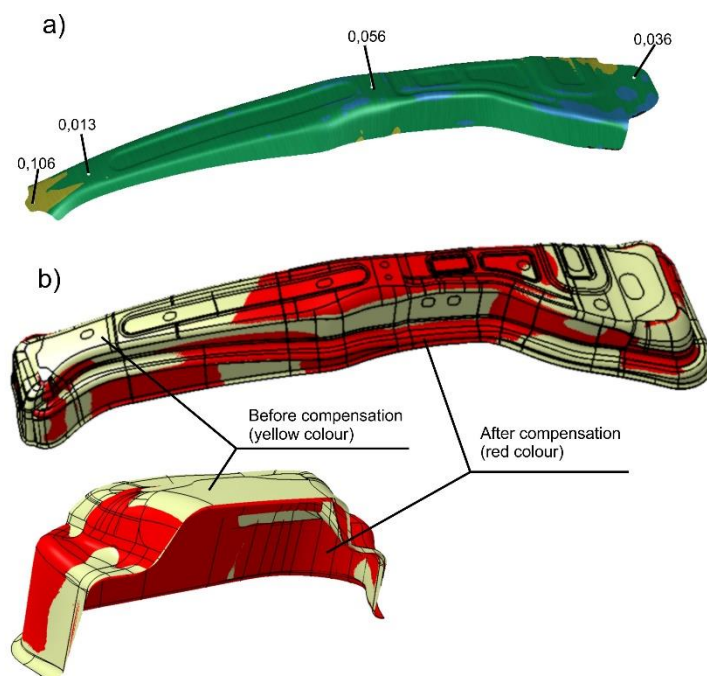
Fundusze Europejskie



Rzeczpospolita Polska

Unia Europejska
Europejskie Fundusze
Strukturalne i Inwestycyjne



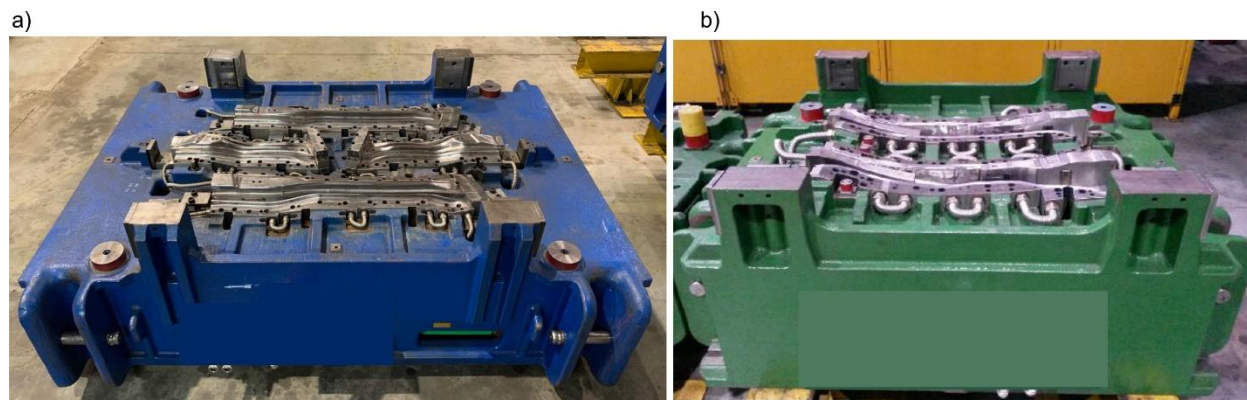


Rys. 10 a) Deformacje hartownicze po kompensacji, b) modele CAD stempla przed i po kompensacji

Analizując uzyskane wartości deformacji hartowniczych przedstawionych na rys. 10a) można zauważyć, że są one znacznie mniejsze (max. 0.106 mm) i zapewniają wyprodukowanie wytłoczek w zakładanej dokładności kształtowo-wymiarowej.

5. WERYFIKACJA DOŚWIADCZALANA WYNIKÓW ANALIZY

W celu weryfikacji zaproponowanej metody kompensacji deformacji hartowniczych zaprojektowano i wyprodukowano tłoczniaki do produkcji belki drzwiowej i wnętrza słupka B. Powierzchnie kształtujące wytłoczkę matryc i stempli były powierzchniami ze skompensowanymi deformacjami hartowniczymi, które wyznaczono na drodze symulacji komputerowych przedstawionych w referacie. Na rysunku 11 a) przedstawiono zdjęcie matrycy tłocznika do produkcji belki drzwiowej a na rysunku 11 b) zdjęcie matrycy tłocznika do produkcji wewnętrznej części słupka B.



Rys. 11 a) zdjęcie matrycy tłocznika do produkcji belki drzwiowej, b) zdjęcie matrycy tłocznika do produkcji wewnętrznej części słupka B.

Badania zostały wykonane w ramach projektu pt. „Prace B+R nad technologią projektowania i konstrukcji tłoczników do obróbki metali metodą tłoczenia na gorąco, bazującą na systemie obliczeniowym mechaniki płynów i sprzężonych symulacjach przepływów ciepła i czynnika chłodzącego oraz uwzględniającą zjawiska odkształceń hartowniczych wytłoczek” finansowanego ze środków UE (poddziałanie 1.1.1 Programu Operacyjnego Inteligentny Rozwój). POIR.01.01.01-00-0572/15-00



Fundusze Europejskie



Rzeczpospolita Polska

Unia Europejska
Europejskie Fundusze
Strukturalne i Inwestycyjne



Na potrzeby badań dokładności kształtowo-wymiarowej oraz badań parametrów mechanicznych wyprodukowano po 50 sztuk belek drzwiowych i wewnętrznej części słupka B. Na rysunku 12 a) przedstawiono zdjęcie belki drzwiowej a na rysunku 12 b) zdjęcie wewnętrznej części słupka B, które zostały wyprodukowane na potrzeby weryfikacji dokładności kształtowo-wymiarowej i parametrów mechanicznych.

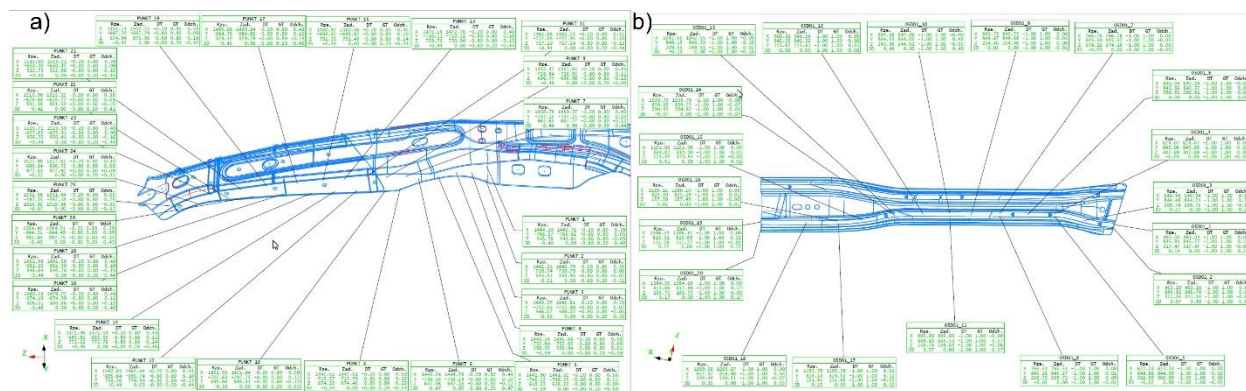


Rys. 12 a) zdjęcie belki drzwiowej, b) zdjęcie wewnętrznej części słupka B,

Badanie dokładności kształtowo-wymiarowej

Przystępując do badania dokładności kształtowo-wymiarowych wyprodukowanych wytłoczek w pierwszej kolejności przeanalizowano wymagania metrologiczne jakie zostały zdefiniowane w dokumentacji technicznej wytłoczek. Na podstawie tej analizy tolerancje wykonania obu wytłoczek podzielono odpowiednio na 3 grupy w zależności od wielkości pola tolerancji. Dla wewnętrznej strony słupka B były to: $(-0,5 +0,5)$; $(-0,7 +0,7)$ $(-0,2 -0,7)$ a dla belki drzwiowej $(-0,3 +0,3)$; $(-0,5 +0,5)$ $(-0,2 -0,5)$. Było to podstawą do wykonania planu pomiarów na współrzędnościowej maszynie pomiarowej, wybrania liczby i położenia punktów pomiarowych oraz było podstawą do wytycznych i zaleceń analizy danych pomiarowych. Pomiary wykonano na współrzędnościowej maszynie pomiarowej typu Zeiss Accura II. Analizując dokładność kształtowo-wymiarową wytłoczek, porównano je do modelu referencyjnego dopasowując je w punktach referencyjnych RPS. Położenie punktów RPS w trakcie pomiarów było takie samo jak przyjęto podczas analizy deformacji hartowniczych, które opisano w rozdziałach 3 i 4.

Pomiar belki drzwiowej wykonano w 198 punktach a wewnątrz słupka B w 160 punktach. Zmierzono po 50 sztuk każdego rodzaju wyprodukowanych wytłoczek (50 szt. wewnątrz słupka B i 50 sztuk belki drzwiowej). Na rysunku 13 a) przedstawiono przykładowe wyniki pomiarów wewnątrz słupka B a na rysunku 13 b) przykładowe wyniki pomiarów belki drzwiowej.



Rys.13 a) wyniki pomiarów wewnątrz słupka B, b) belki drzwiowej

Analizując raporty pomiarowe można stwierdzić, w żadnym z punktów pomiarowych nie przekroczono założonych tolerancji wykonania wytłoczki. W tabeli 1 podano wartości maksymalne i minimalne oraz odchylenie standardowe punktów pomiarowych dla belki drzwiowej i wewnątrz słupka B.

Badania zostały wykonane w ramach projektu pt. „Prace B+R nad technologią projektowania i konstrukcji tłoczników do obróbki metali metodą tłoczenia na gorąco, bazującą na systemie obliczeniowym mechaniki płynów i sprzężonych symulacjach przepływów ciepła i czynnika chłodzącego oraz uwzględniającą zjawiska odkształceń hartowniczych wytłoczek” finansowanego ze środków UE (poddziałanie 1.1.1 Programu Operacyjnego Inteligentny Rozwój). POIR.01.01.01-00-0572/15-00



Fundusze Europejskie



Rzeczpospolita Polska

Unia Europejska
Europejskie Fundusze
Strukturalne i Inwestycyjne



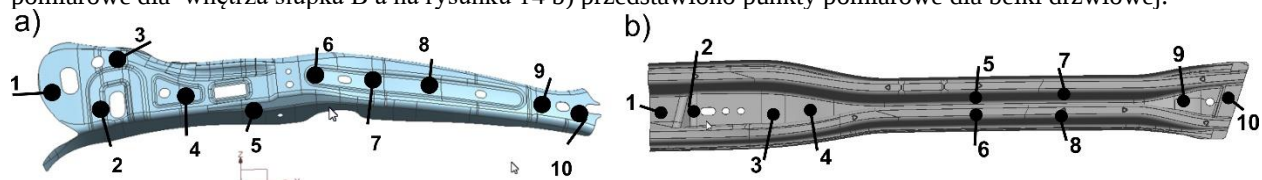
Tabela 1. Wartości maksymalne i minimalne oraz odchylenie standardowe wyników pomiarów belki drzwiowej i wnętrza słupka B.

	Wnętrze słupka B			Belka drzwiowa		
Pola tolerancji	-0,5 +0,5	-0,7 +0,7	-0,2 -0,7	-0,3 +0,3	-0,5 +0,5	-0,2 -0,5
Wartość maksymalna	+0,42	+0,55	-0,11	0,15	0,42	-0,14
Wartość minimalna	-0,40	-0,55	-0,62	-0,25	-0,21	-0,45
Odch. standardowe	0,027	0,031	0,024	0,021	0,036	0,054

Dokładność kształtowo-wymiarowa obu wytłoczek jest na wymaganym przez konstruktorów poziomie. Oznacza to, że opracowana strategia kompensacji deformacji hartowniczych dała dobre rezultaty.

Badanie parametrów mechanicznych

W wytłoczkach tłoczonych na gorąco bardzo ważne są parametry mechaniczne stali po procesie tłoczenia i harowania. Zakłada się, że stal powinna posiadać następujące parametry mechaniczne: granica plastyczności $R_{p0,2}=950\div1200$ MPa, granicę wytrzymałości $R_m=1300\div1650$ MPa, oraz twardość $HV=400\div550$. Zbadano twardość, granicę wytrzymałości, granicę plastyczności w wybranych 10 punktach pomiarowych. Punkty te wybrano mając na uwadze wyniki pomiarów temperatury matrycy i stempli podczas produkcji. W okolicach tych punktów matryce i stemple miały najwyższą temperaturę (ok. 180 °C) co mogło skutkować gorszymi warunkami hartowania i możliwością nieuzyskania wymaganych parametrów mechanicznych. Na rysunku 14 a) przedstawiono punkty pomiarowe dla wnętrza słupka B a na rysunku 14 b) przedstawiono punkty pomiarowe dla belki drzwiowej.



Rys. 14 Punkty pomiarowe dla a) wnętrza słupka B, b) dla belki drzwiowej

Do badań parametrów mechanicznych wykorzystano metodę nieniszczącą i urządzenie 3MA, produkcji Franchoufer Institution. Urządzenie mierzy parametry mechaniczne stali ferromagnetycznych i zostało skalibrowane do stali 22nB5 po hartowaniu. W tabeli 1 przedstawiono wartości maksymalne, minimalne średnie i odchylenie standardowe wszystkich wykonanych pomiarów twardości, granicy plastyczności i granicy wytrzymałości dla belki i wnętrza słupka B.

Tabela 1. Wartości maksymalne, minimalne średnie i odchylenie standardowe wykonanych pomiarów twardości, granicy plastyczności i granicy wytrzymałości dla belki i wnętrza słupka B.

	max		min		średnia		odch. stand	
	belka	słupek B	belka	słupek B	belka	słupek B	belka	słupek B
Twardość HV	546	533	464	450	510.6	492.2	10.2	12.5
Ra MPa	1151	1142	984	953	1087.4	1076.7	10.8	18.7
Rm MPa	1559	1616	1372	1296	1504.8	1495.1	9.4	10.2

Badania zostały wykonane w ramach projektu pt. „Prace B+R nad technologią projektowania i konstrukcji tłoczników do obróbki metali metodą tłoczenia na gorąco, bazującą na systemie obliczeniowym mechaniki płynów i sprzężonych symulacjach przepływów ciepła i czynnika chłodzącego oraz uwzględniającą zjawiska odkształceń hartowniczych wytłoczek” finansowanego ze środków UE (poddziałanie 1.1.1 Programu Operacyjnego Inteligentny Rozwój). POIR.01.01.01-00-0572/15-00



Fundusze Europejskie



Rzeczpospolita Polska

Unia Europejska
Europejskie Fundusze
Strukturalne i Inwestycyjne



Analizując dane pomiarowe można stwierdzić że,

- w każdym punkcie pomiarowym obie materiały obu wytłoczek osiągnęły wymaganą twardość. Mieściła się ona w założonym zakresie 400 do 550 HV.
- granica plastyczności w każdym punkcie pomiarowym, miała wymaganą wartość w zakresie od 950 do 1200 MPa,
- granica wytrzymałości także osiągnęła wymaganą wartość w zakresie 1300÷1650 MPa w każdym punkcie pomiarowym.

WNIOSKI

Wykorzystując zaawansowane systemy CAE można analizować i rozwiązać złożony problem jakim jest kompensacja deformacji hartowniczych występujących podczas produkcji wytłoczek za pomocą technologii tłoczenia na gorąco.

Aby poprawnie rozwiązać to zadanie należy wykonać następujące kroki:

- określić wymagania dotyczące tolerancji kształtowo- wymiarowych analizowanych wytłoczek,
- zbadać czy kształt wytłoczki jest technologiczny – tzn. czy można go wyprodukować w procesie tłoczenia na gorąco,
- opracować plan procesu technologicznego wykonania wytłoczki, uwzględniający wszelkie wymagania i ograniczenia zintegrowanej obróbki plastycznej i cieplnej,
- opracować sposób bazowania wytłoczki w narzędziu,
- opracować modele powierzchniowe CAD powierzchni roboczych narzędzi (matryce, dociski, stemple),
- opracować założenia techniczne technologii tłoczenia na gorąco (temperatura formatki, czas przenoszenia formatki z pieca do prasy, czas tłoczenia, przebieg prędkości ruchu suwaka prasy, czas hartowania, temperatury narzędzi, wymaganą twardość wytłoczki, model materiałowy dla określonej grubości wytłoczki),
- wyznaczyć kształt formatki, który gwarantuje uzyskanie gotowej wytłoczki w żądanej tolerancji wykonania obrysu formatki,
- opracować modele MES formatki i powierzchni roboczych tłocznika, zdefiniować jego wszystkie elementy składowe, parametry kinematyczne i termiczne,
- przeprowadzić symulację i przeanalizować wyniki symulacji z uwagi na charakterystykę warunkującą prawidłową obróbkę plastyczną (diagramy FLD i pocienienie) oraz obróbkę cieplną (rozkład twardości i martenzytu),
- przeanalizować wyniki symulacji z uwagi na wartości deformacji hartowniczych wytłoczki w odniesieniu do wymagań, co do tolerancji kształtowo-wymiarowych określonych w dokumentacji technicznej.

W przypadku gdy deformacje hartownicze mają większe wartości niż wymagania należy wykonać analizę kompensacji tych deformacji. Analizę tę wykonuje się w następujących krokach:

- opracowanie modelu obliczeniowego do kompensacji deformacji hartowniczych i wykonanie analizy kompensacji hartowniczych przy założonych parametrach kompensatora,
- przeanalizowanie uzyskanych wyników kompensacji narzędzia na deformacje hartownicze wytłoczki, gdy deformacje hartownicze będą miały zbyt duże wartości wykonanie kolejnej pętli obliczeń. Pętle te powtarza się aż do uzyskania wytłoczek których deformacje hartownicze mieszczą się w założonym polu tolerancji.
- zapisanie skompensowanych modeli powierzchniowych CAD elementów narzędzi, które następnie będą wykorzystywane przez inżynierów konstruktorów narzędzi jako powierzchnie bazowe do opracowania konstrukcji narzędzi.

Na rysunku 15 przedstawiono schemat postępowania podczas analizy kompensacji deformacji hartowniczych.

Badania zostały wykonane w ramach projektu pt. „Prace B+R nad technologią projektowania i konstrukcji tłoczników do obróbki metali metodą tłoczenia na gorąco, bazującą na systemie obliczeniowym mechaniki płynów i sprzężonych symulacjach przepływów ciepła i czynnika chłodzącego oraz uwzględniającą zjawiska odkształceń hartowniczych wytłoczek” finansowanego ze środków UE (poddziałanie 1.1.1 Programu Operacyjnego Inteligentny Rozwój). POIR.01.01.01-00-0572/15-00



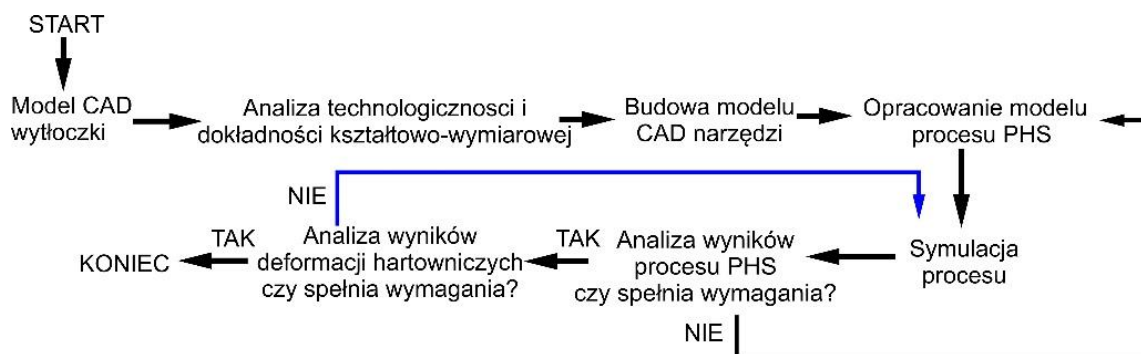
Fundusze Europejskie



Rzeczpospolita
Polska

Unia Europejska
Europejskie Fundusze
Strukturalne i Inwestycyjne





Rys. 15 Schemat postępowania podczas analizy kompensacji deformacji hartowniczych

Przedstawiona na rysunku 15 metoda kompensacji deformacji hartowniczych z wykorzystaniem obliczeń numerycznych jest nowym podejściem do rozwiązania problemu niedokładności kształtowo-wymiarowych wytłoczek produkowanych metodą tłoczenia na gorąco. Dała ona bardzo dobre rezultaty dla dwóch zbadanych typowych elementów karoserii: wnętrza słupka B i belki drzwiowej. Pozwala ona przewidzieć oraz skompensować deformacje hartownicze wytłoczek produkowanych na gorąco już na etapie projektowania procesu i znacznie zredukować wysokie koszty produkcji narzędzi (tłoczników). **Wyniki numerycznej kompensacji deformacji hartowniczych zostały zweryfikowane doświadczalnie. Dokładność kształtowo-wymiarowa, parametry mechaniczne oraz mikrostruktura stali dla testowej partii wyprodukowanych wytłoczek mieściły się w wymaganiach jakie stawia się tego typu wyrobom.**

REFERENCES

1. K. Mori (1), P.F. Bariani , B.-A. Behrens , A. Brosius , S. Bruschi ,T. Maeno , M. Merklein , J. Yanagimoto, *Hot stamping of ultra-high strength steel parts*, (CIRP Annals - Manufacturing Technology, 2017), pp. 755–777.
2. M. Miyanishi, *Manufacturing of Light Weight Cars*, (Steel Research International Supplement Metal Forming, 2010, pp.1 –8.
3. P. Feuser, T. Schweiker, M. Merklein, (2011) *Partially Hot-Formed Parts from 22MnB5 – Process Window, Material Characteristics and Component Test Results*, (Proceedings of 10th International Conference on Technology of Plasticity 2011), pp. 408-413,
4. H. Ping, S. Dongyong , Y. Liang, S. Guozhe, L. Wenquan Liu, *The finite element analysis of ductile damage during hot stamping of 22MnB5 steel*, (Materials and Design, 2015), pp.141–152.
5. J. Cui, V. Lei, Z. Xing, C. Li *Microstructure distribution and mechanical properties, prediction of boron alloy during hot forming using FE simulation*, (Mater SciEng, 2012), pp. 121-132,
6. M. Blicharski, *Material Engineering*, (WNT, 2012).
7. M. Nikraves, M. Naderi, G.H. Akbari, W. Bleck, *Phase transformations in a simulated hot stamping process of the boron bearing steel*, (Materials and Design, 2015), pp. 18–24.
8. H. Ping, Y. Liang, H. Bin, *Hot Stamping Advanced Manufacturing Technology of Lightweight Car Body*, (Springer, 2017).
9. H. Liu, W. Liu, J. Bao, Z. Xing, B. Song, and Ch. Lei, *Numerical and Experimental Investigation into Hot Forming of Ultra High Strength Steel Sheet*, (ASM, International, 2011), pp.1-10
10. Autoform, Autoform help system
11. Y. Nakagawa, K. Mori, T. Maeno, *Springback-free mechanism in hot stamping of ultra-high-strength steel parts and deformation behaviour and quenchability for thin sheet*, *Int J Adv Manuf Technol.* ,2018,
12. L. Hongsheng, B. Jun, X. Zhongwen, S. Baoyu, Y. Yuying, *Analysis of Mechanism of Springback in 22MnB5 Super-high Strength Steel Formin*, *Acta Aeronautice et Astronautica Sinica*, 2010
13. Z. Dunwen, H. Chuanzhen, Ch. Ming, L. Jun, J. Guo, *Hot Forming Springback and Control of 22MnB5 Boron and Magnesium Alloy Sheet*, *Key Engineering Materials*, 2012,

Badania zostały wykonane w ramach projektu pt. „Prace B+R nad technologią projektowania i konstrukcji tłoczników do obróbki metali metodą tłoczenia na gorąco, bazującą na systemie obliczeniowym mechaniki płynów i sprzężonych symulacjach przepływów ciepła i czynnika chłodzącego oraz uwzględniającą zjawiska odkształceń hartowniczych wytłoczek” finansowanego ze środków UE (poddziałanie 1.1.1 Programu Operacyjnego Inteligentny Rozwój). POIR.01.01.01-00-0572/15-00



Fundusze Europejskie



Rzeczpospolita Polska

Unia Europejska
Europejskie Fundusze
Strukturalne i Inwestycyjne

