

Komputerowe wspomaganie projektowania procesu tłoczenia w podwyższonej temperaturze na przykładzie wytwarzania elementu ze stopu magnezu

Computer-aided design work for hot stamping process by the example of a magnesium alloy product

MATEUSZ AMBROZIŃSKI
ŁUKASZ RAUCH
MAREK PAĆKO
ZBIGNIEW GRONOSTAJSKI
PAWEŁ KACZYŃSKI
KAROL JAŚKIEWICZ
JAKUB KRAWCZYK*

DOI: 10.17814/mechanik.2016.1.6

Praca stanowi część projektu, którego celem jest ocena możliwości wykorzystania wyrobów ze stopów magnezu w elementach konstrukcyjnych nadwozi samochodowych. Motywacją do przeprowadzenia badań było dążenie do obniżenia masy komponentu z zachowaniem jego dotychczasowych funkcji konstrukcyjnych. Skupiono się na wykorzystaniu symulacji numerycznej procesu wytwarzania elementu wspornika będącego częścią usztywniającą konstrukcję belki wzmacniającej układ kierowniczy samochodu. Zbadano laboratoryjnie stop magnezu AZ31 i przeprowadzono symulacje numeryczne uwzględniające zachowanie się materiału podczas formowania w podwyższonych temperaturach. Przedstawiono uzyskane wyniki oraz ocenę przydatności stopów magnezu do wybranego zastosowania.

SŁOWA KLUCZOWE: przemysł motoryzacyjny, stop magnezu AZ31, tłoczenie, symulacja numeryczna

This work represents a segment of the investigation project work intended to review the prospects of application magnesium alloy materials for production of the car chassis parts. The need for the research has aroused from the concept of replacing the conventional heavy steel parts with the lightweight magnesium alloy substitutes revealing however equivalent strength and functional properties. The study focused on numerical simulation of the manufacturing process specified for the bracket supporting the steering system reinforcing beam. Laboratory tests of the magnesium alloy grade AZ31 material were performed and numerical simulations were conducted with due consideration given to material behavior when formed at elevated temperatures. Finally presented are the results of the tests and prospects of application of the magnesium alloys for selected purposes.

KEYWORDS: automotive industry, magnesium alloy AZ31, sheet forming, numerical simulation

Rozwój przemysłu motoryzacyjnego zdąży w kierunku innowacyjnych rozwiązań technologicznych, ulepszania procesów produkcyjnych oraz wprowadzania nowych materiałów. Elementy wykonane ze stali są zastępowane komponentami ze stopów lekkich, np. aluminium oraz coraz częściej stosowanych stopów magnezu. Wynika to z tendencji do obniżania masy nadwozia samochodu, a tym samym zmniejszania zużycia paliwa i zanieczyszczania środowiska. Stosowanie części ze stopów lekkich napotyka wiele przeszkód, począwszy od etapu ich wytwarzania poprzez łączenie z resztą konstrukcji karoserii, aż po ich pracę w trakcie użytkowania pojazdu. Badania możliwości łączenia różnych materiałów przedstawiono w [1] i nie są one poruszane w niniejszej pracy.

* Mgr inż. Mateusz Ambroziński (mambrozinski@gmail.com), dr inż. Łukasz Rauch (lrauch@agh.edu.pl), dr inż. Marek Paćko (packo@metal.agh.edu.pl) – AGH – Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie; prof. dr hab. inż. Zbigniew Gronostajski (zbigniew.gronostajski@pwr.wroc.pl), dr inż. Paweł Kaczyński (pawelkaczynski@pwr.wroc.pl), dr inż. Karol Jaśkiewicz (karol.jaskiewicz@pwr.wroc.pl), mgr inż. Jakub Krawczyk (jakub.krawczyk@pwr.wroc.pl) – Politechnika Wroclawska

Stopy magnezu charakteryzują się niską odkształcalnością w temperaturze otoczenia i dlatego ich obróbkę plastyczną prowadzi się w podwyższonej temperaturze. Formowanie materiałów w wyższej temperaturze jest trudniejsze w warunkach przemysłowych niż formowanie na zimno. Dlatego przedstawiono ocenę możliwości wykonania wspornika ze stopu AZ31 w warunkach podwyższonej temperatury. Przeprowadzono symulację numeryczną uwzględniającą wstępne nagrzewanie przygotowanego półwyrobu, a następnie formowanie wspornika. Symulacja formowania została wykonana po uzyskaniu rozkładu temperatury zbliżonego do rozkładu zmierzonego doświadczalnie. Zwrócono uwagę na wpływ prędkości formowania badanej części na jakość wyrobu. Przeprowadzono analizę numeryczną dla dwóch prędkości stempła: 2 mm/s oraz 10 mm/s.

Badania laboratoryjne

Stop AZ31 cechuje podwyższona wytrzymałość uzyskiwana na skutek hartowania z częściowym wyżarzaniem. Jest to materiał o dobrej odkształcalności, odporny na korozję i łatwo spawalny. Można go kształtować poprzez obróbkę ubytkową. Jest niemagnetyczny, wyróżnia się dobrym przewodnictwem cieplnym i elektrycznym, dzięki czemu możliwe jest jego zastosowanie w produkcji opłotów i osłon magnetycznych w elektronice. Odształcanie na gorąco stopu AZ31 umożliwia uzyskanie skomplikowanych kształtów wyrobów i pozwala na jego wykorzystanie w przemyśle samochodowym. Stop spełnia ponadto wymogi opisane w normie ASTM B90. Jego skład chemiczny i właściwości fizyczne przedstawiono w tabl. I oraz II.

Próby rozciągania przeprowadzono na dwukolumnowej, uniwersalnej maszynie wytrzymałościowej firmy ZWICK, wyposażonej w głowicę tensometryczną o zakresie pomiarowym 0÷100 kN. Do rejestracji odkształcenia zastosowano ekstensometr firmy ZWICK o długości bazy pomiarowej 25 mm, przeznaczony do pracy w temperaturze do 1200 °C.

TABLICA I. Skład chemiczny stopu AZ31

Al, %	Zn, %	Mn, %	Mg, %
2,5÷3,5	0,7÷1,3	0,2÷1,0	reszta

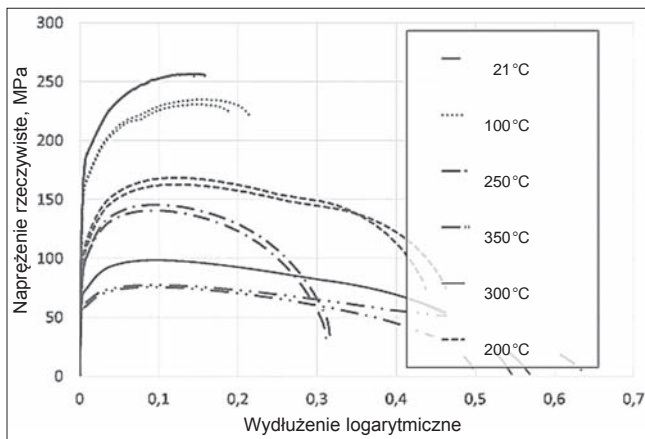
TABLICA II. Właściwości fizyczne stopu AZ31

Właściwość	Wartość
Masa właściwa, g/cm ³	1,78
Współczynnik rozszerzalności cieplnej, K ⁻¹	26,8 · 10 ⁻⁶
Ciepło właściwe, J · kg ⁻¹ K ⁻¹	1040
Przewodność cieplna, W · m ⁻¹ K ⁻¹	76,9
Oporność, nΩ · m	92
Moduł Younga, Pa	45 · 10 ⁹
Współczynnik Poissona	0,35
Temperatura topnienia, °C	566÷632

Badania wykonano przy prędkościach przesuwu belki wynoszących 4,5 oraz 0,045 mm/s, co odpowiadało prędkościom początkowym odkształcania wynoszącym odpowiednio 10^{-3} oraz 10^{-1} s^{-1} .

Rejestracja z użyciem ekstensometru odbywała się w jak największym zakresie, często aż do zerwania próbki. Celem tego zabiegu była rejestracja odkształcania obszaru tuż po wystąpieniu umownej granicy plastyczności.

Większość z badanych materiałów nie miała wyraźnej granicy plastyczności (niezależnie od temperatury i prędkości odkształcania), dlatego przyjęto ją umownie. Dla każdej próbki określono nachylenie krzywej: od 10 MPa do ok. 60÷70% górnej granicy przedziału, w którym zależność była liniowa. Wartość 60÷70% wybrano, aby zminimalizować zjawisko zaniżania wartości modułu Younga, jakie występuje w przypadku zbyt szerokiego zakresu (zawierającego obszar, w którym naprężenia zaczynają przyrastać wolniej). Następnie wyznaczano przecięcie krzywej równoległej przechodzącej przez punkt $\epsilon = 0,002$ i krzywej odkształcania próbki. Tę wartość uznano za umowną granicę plastyczności. Ten sam algorytm posłużył do ustalenia wartości modułu sprężystości wzdłużnej dla każdej próbki. Wartości maksymalnego naprężenia umownego oraz wydłużenia w momencie zerwania były odczytywane z wykresu. Następnie obliczano wartość średnią dla wszystkich próbek. Przykładowe wykresy rozciągania próbek z prędkością $0,1 \text{ s}^{-1}$ przedstawiono na rys. 1, a umowną granicę plastyczności, moduł sprężystości wzdłużnej, wytrzymałość na rozciąganie i wydłużenie w momencie zerwania przedstawiono w tabl. III.



Rys. 1. Krzywe rozciągania stopu magnezu AZ31 z prędkością $0,1 \text{ s}^{-1}$

TABLICA III. Właściwości fizyczne stopu AZ31 (wartości inżynierskie)

Temperatura, °C	v , 1/s	R_e , MPa	E , GPa	R_m , MPa	A , %
21 °C	0,001	166	44,4	258	0,22
	0,1	175	47,6	256	0,16
100 °C	0,001	144	44,8	212	0,36
	0,1	160	44,9	232	0,21
200 °C	0,001	85	25,2	119	0,54
	0,1	105	36,4	156	0,46
250 °C	0,001	69	18,7	85	0,49
	0,1	92	34,9	143	0,32
300 °C	0,001	52	23,3	54	0,76
	0,1	72	28,5	98	0,56
350 °C	0,001	41	19,1	42	0,88
	0,1	60	26,5	76	0,57

Objaśnienia: v – prędkość, R_e – granica plastyczności, E – moduł Younga, R_m – granica wytrzymałości, A – wydłużenie

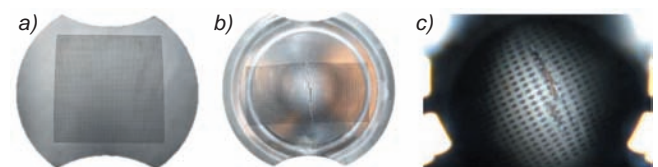
Określono graniczne krzywe tłoczości w zakresie temperatury 20÷300 °C. Do zbadania tłoczości blach wykorzystano testy Nakazimy. Przeprowadzono je na specjalnie zaprojektowanym przyrządzie do wyznaczania krzywych odkształceń granicznych (KOG) (rys. 2).



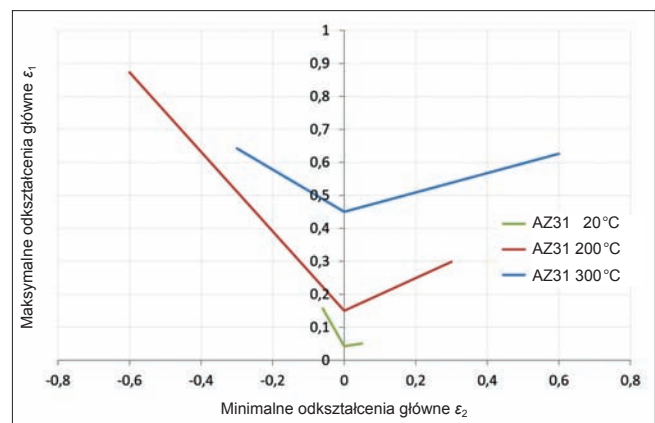
Rys. 2. Stanowisko laboratoryjne do pracy w podwyższonej temperaturze, zamontowane na prasie PDV 200

Próbki w postaci krążków o średnicy 200 mm wykrojono z blachy o grubości 1,8 mm. Próby tłoczości w teście Nakazimy wykonano dla serii próbek o zróżnicowanej szerokości, co umożliwiło określenie punktów na płaszczyźnie odkształceń głównych, przechodząc od dwuosiowego (pełny krążek) do prawie jednoosiowego rozciągania blachy (najwęższy krążek). Przyjęte kształty próbek pozwoliły na wyznaczenie odkształceń głównych w otoczeniu sześciu punktów. Skrajne punkty wyznaczają jednoosiowe i dwuosiowe rozciąganie na płaszczyźnie odkształceń głównych. Aby zmniejszyć tarcie na powierzchni próbki mającej kontakt ze stemplem, zastosowano przekładkę silikonową. Każda próba była zatrzymywana w momencie pojawienia się pęknięcia blachy. Prędkość suwaka prasy, z jaką przeprowadzono badania, wynosiła 2 mm/s. Na rys. 3 przedstawiono przykładowe kolejne etapy przeprowadzonych badań.

Wykonano po pięć powtórzeń dla każdego punktu pomiarowego. Na każdą próbkę, w odpowiednim obszarze, naniesiono siatkę koordynacyjną o średnicy 1 mm. Rozstaw pomiędzy punktami wynosił 2 mm. Siatka była nanoszona metodą grawerowania laserem CO_2 . Do pomiaru pól odkształceń użyto komercyjnego systemu optycznego ARGUS firmy GOM.



Rys. 3. Próbkę kształtowano stemplem kulistym (test Nakazimy): a) przykładowa próbka do badań, b) próbka po odkształceniu, c) końcowa faza kształtowania



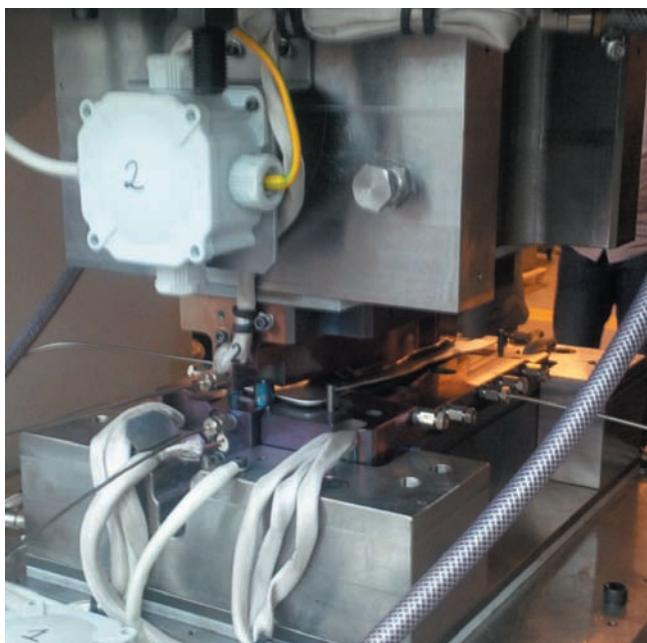
Rys. 4. Porównanie krzywych odkształceń granicznych stopu AZ31 uzyskanych w testach Nakazimy w temperaturze: 20, 200 i 300 °C

Porównując charakterystyki KOG (rys. 4), obserwuje się wyraźne zwiększanie odkształcalności wraz ze wzrostem temperatury. W temperaturze otoczenia badany stop można uznać praktycznie za nieodkształcalny w złożonych stanach odkształcenia. W miarę dobra odkształcalność występuje tylko dla jednoosiowego rozciągania.

Proces tłoczenia elementu ze stopu AZ31

W przemyśle motoryzacyjnym komponenty na nadwozia samochodowe najczęściej są tłoczone. Pozwala to na szybkie wykonywanie kilku części z blach cienkich (o grubości do ok. 2 mm) jednocześnie. Taki proces ma wiele zalet, w postaci np. możliwości wprowadzania usztywnień konstrukcji poprzez zaginanie oraz przetłaczanie blach, z jednoczesnym utrzymaniem niewielkiej wagi całej konstrukcji. Coraz częściej stosuje się stale o podwyższonej wytrzymałości (*advanced high strength steels – AHSS*), dzięki czemu można zmniejszać grubość poszczególnych elementów, redukując masę wyrobu [2, 3]. W przypadku elementów stalowych proces tłoczenia realizowany jest w głównej mierze na zimno; nie dotyczy to jednak stali martenzytycznych o bardzo wysokiej wytrzymałości, które są formowane w podwyższonych temperaturach [4, 5].

Badane stopy magnezu AZ31, wykorzystywane w przemyśle motoryzacyjnym, charakteryzują się o wiele mniejszą gęstością, a więc mniejszą masą. Ma to znaczenie z punktu widzenia ochrony środowiska, ponieważ zmniejszenie wagi pojazdu o 1,1% obniża zużycie paliwa o ok. 0,7% [6]. Jednakże takie części trzeba wykonywać w podwyższonych temperaturach. Do tego celu przygotowano specjalne stanowisko ze stempli i matryc, które można było podgrzewać do temperatury ok. 450°C, co pozwoliło na przeprowadzenie testów laboratoryjnych wytwarzania wspornika. Doświadczenie to posłużyło do weryfikacji obliczeń przedstawionych w dalszej części artykułu. Na rys. 5 pokazano stanowisko do realizacji rzeczywistego procesu tłoczenia wspornika magnezowego w podwyższonej temperaturze.



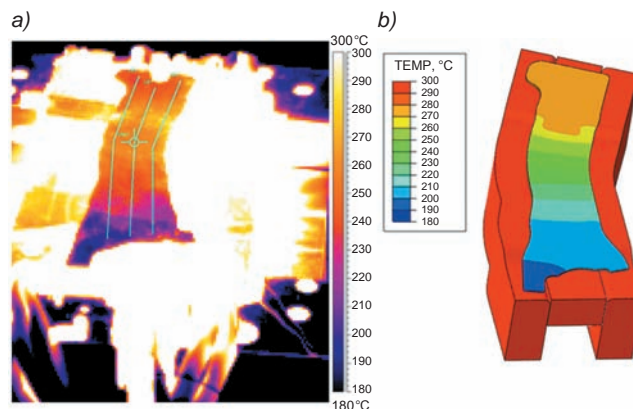
Rys. 5. Stanowisko do przeprowadzenia fizycznej symulacji procesu wytwarzania wspornika

Zestaw narzędzi (tłocznik) poprzez zamontowany układ grzałek został nagrany do zadanej temperatury. Przygotowaną wykrojkę ułożono na dolnym narzędziu, a stempel górny przybliżono do wsadu. W takim układzie narzędzi nastąpiło wstępne nagrzanie wsadu, po czym w kolejnym kroku rozpoczęło się formowanie poprzez przesuw stempla górnego z prędkościami: 2 mm/s lub 10 mm/s.

Numeryczna symulacja procesu tłoczenia

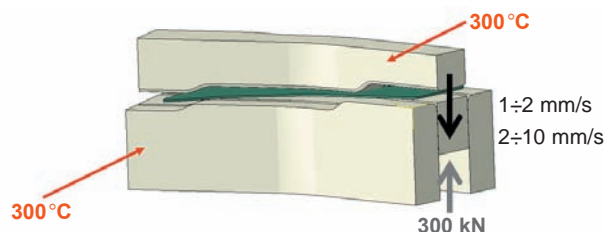
Na pierwszym etapie symulacji wytwarzania wspornika wyznaczono rozkład temperatury w wykrojce, pomijając odkształcenia wywołane rozszerzalnością cieplną. Rozkład temperatury uzyskany z obliczeń numerycznych był zbliżony do wyników doświadczenia fizycznego (rys. 6). Można więc było przejść do drugiego etapu badań, czyli sprzężonej symulacji termomechanicznej, uwzględniającej podczas tłoczenia rozkłady odkształceń, z jednoczesnym śledzeniem dalszego nagrzewania się wyłoczeki wspornika od narzędzi.

W symulacji numerycznej nie uwzględniano anizotropii kształtowanego materiału, ponieważ w badaniach przeprowadzonych na analizowanym stopie w temperaturze 300°C wartości współczynników Lankforda były bliskie 1.



Rys. 6. Rozkład temperatury uzyskany z eksperymentu fizycznego (a) oraz symulacji numerycznej (b)

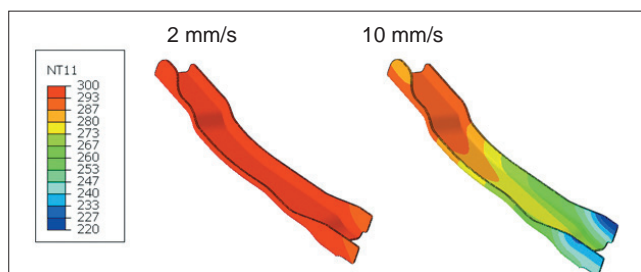
Następnie wykonano symulację wytwarzania elementu z uwzględnieniem zmian rozkładu temperatury. Warunki brzegowe wykorzystane podczas obliczeń ilustruje rys. 7. Siła na dociskaczu wynosiła 300 kN.



Rys. 7. Warunki brzegowe procesu wytwarzania w dwóch wariantach prędkości: 2 mm/s i 10 mm/s

Wyniki

Na rys. 8 przedstawiono wyniki obliczeń pól temperatury dla dwóch prędkości tłoczenia. Przy prędkości 2 mm/s czas procesu pozwolił na uzyskanie jednolitego rozkładu temperatury w całości elementu, czego nie zaobserwowano podczas tłoczenia z większą prędkością.



Rys. 8. Rozkład temperatury po procesie kształtowania

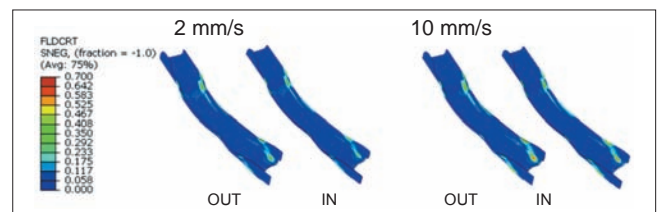
Na rys. 9 przedstawiono współczynnik ξ określający możliwość pęknięcia wytłoczki. Zdefiniowano go jako stosunek wartości lokalnego odkształcenia do odkształcenia krytycznego dla temperatury występującej w tym punkcie, a więc dla wartości $\xi < 1$ pęknięcia nie wystąpią. Na rys. 9 zastosowano oznaczenie „OUT” dla powierzchni zewnętrznej oraz „IN” dla powierzchni wewnętrznej. Przy mniejszej prędkości przemieszczania stempla współczynnik ξ miał wartość ok. 0,4, dlatego można stwierdzić, że element zostanie wykonany bez zagrożenia uszkodzenia materiału. Gdy prędkość stempla wynosiła 10 mm/s, współczynnik ξ lokalnie przyjmował wartości ok. 0,7. Zaobserwowano wówczas znaczne zbliżenie się wielkości odkształceń głównych do poziomu krytycznego na granicznej krzywej tłoczności (GKT).

Aby dokładniej przeanalizować wartości odkształceń głównych występujących w miejscach najbardziej narażonych na zniszczenie w postaci pęknięcia podczas procesu wytwarzania, wybrano cztery miejsca uznane za niewrażliwe w wytłoczce. Zostały one przyjęte niezależnie od prędkości wytłaczania. Na rys. 10 przedstawiono te miejsca na wsporniku oraz wykresy GKT, na których odpowiednie odkształcenia główne zostały zaznaczone punktami. W wariancie tłoczenia z prędkością 10 mm/s wartość odkształceń głównych przybliżyła się znacznie do krzywej otrzymanej w temperaturze 300 °C. Uwzględniając również to, że temperatura w dolnej części wytłoczki wynosi ok. 250 °C, w analizie trzeba odnosić się do krzywej, która przebiega nieco niżej niż krzywa dla 300 °C. Należy jednoznacznie stwierdzić, że tłoczenie z prędkością 10 mm/s może spowodować uszkodzenie wytłoczki w postaci pęknięć w miejscach zagięć ramion wspornika.

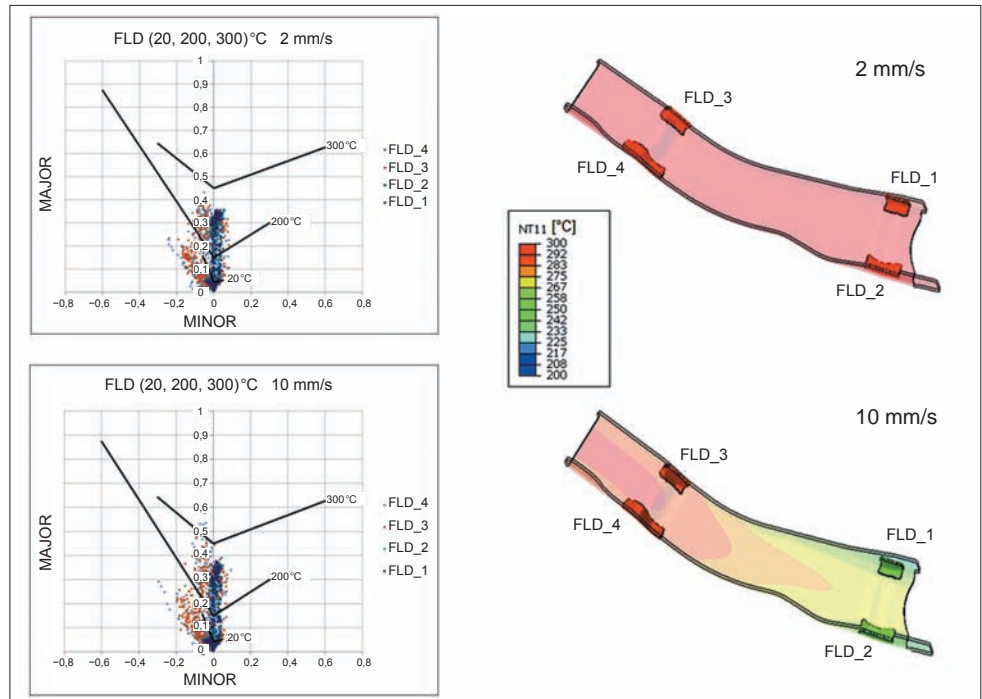
Podsumowanie

Przedstawiono ocenę możliwości wykorzystania narzędzi do symulacji numerycznej podczas projektowania złożonych fizycznie procesów, takich jak wytwarzanie elementów na nadwozia samochodowe z nowych materiałów kształtowanych w podwyższonej temperaturze. Zastosowano oprogramowanie Abaqus, oparte na metodzie elementów skończonych.

Przy uruchamianiu bardzo złożonych procesów technologicznych sugeruje się konieczność równoległego prowadzenia badań doświadczalnych. Celem tego jest wymiana danych o zmiennych parametrach procesu i danych materiałowych niezbędnych do poprawnego przeprowadzenia modelowania numerycznego oraz zwrotne wykorzystanie wyników teoretycznych do korekty doświadczenia. W analizowanym procesie prowadzonym z dwoma prędkościami tłoczenia pokazano, z wykorzystaniem GKT, możliwość przewidywania efektów procesu wytłaczania wybranego elementu konstrukcyjnego karoserii samochodowej wraz ze wskazaniem miejsc, w których mogą wystąpić pęknięcia.



Rys. 9. Współczynnik określający możliwość wystąpienia pęknięcia podczas procesu wytwarzania przy dwóch prędkościach tłoczenia (IN – pęknięcie wewnętrzne, OUT – pęknięcie zewnętrzne)



Rys. 10. Wykres GKT z naniesionymi punktami z wybranych miejsc wytłoczki dla dwóch prędkości tłoczenia: 2 mm/s i 10 mm/s

Przeprowadzone badania wskazują na możliwość ograniczenia kosztownych prób technologicznych przeprowadzanych na potrzeby prototypowania nowych procesów technologicznych. Dzięki obliczeniom numerycznym można już na etapie projektowania procesu przewidzieć problemy, jakie mogą wystąpić podczas przemysłowych prób technologicznych.

LITERATURA

1. Gronostajski Z., Polak S., Bartczak B. „Joining of high-strength steel sheets by clinching”. *Steel Research International*. Special edition (2012): pp. 611÷614.
2. Hofmann H., Mattissen D., Schaumann T.W. „Advanced cold rolled steels for automotive applications”. *Steel Research International*. No. 80 (2009): pp. 22÷28.
3. Hadasik E., Kuziak R., Kawalla R., Adamczyk M., Pietrzyk M. „Rheological model for simulation of hot rolling of new generation steel strips for automotive industry”. *Steel Research International*. No. 77 (2006): pp. 927÷933.
4. Lechler J., Merklein M., Geiger M. „Determination of thermal and mechanical material properties of ultra-high strength steels for hot stamping”. *Steel Research International*. No. 79 (2009): pp. 98÷104.
5. Pellegrini D., Lechler J., Ghiotti A., Bruschi S., Merklein M. „Interlaboratory comparison of forming limit curves for hot stamping of high strength steels”. *Key Engineering Materials*. No. 410 (2009): pp. 209÷304.
6. Karaś M. „Magnez przemysłu. Przykłady zastosowań stopów magnezu”. *STAL. Metale & Nowe Technologie*. Nr 5–6 (2015): s. 154÷155.