



Wybrane aspekty projektowania materiałowego elementów w strefie kontrolowanego zgniotu

M. Morawiec^a, A. Grajcar^b

^a Student Politechniki Śląskiej, Wydział Mechaniczny Technologiczny

^b Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Instytut Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych, Zakład Inżynierii Materiałów Konstrukcyjnych i Specjalnych
email: adam.grajcar@polsl.pl

Streszczenie: Praca przedstawia zagadnienie projektowania elementu strefy kontrolowanego zgniotu, jakim jest podłużnica przednia. Przeanalizowano warunki pracy elementu podczas eksploatacji pojazdu oraz w czasie kolizji. Analizie poddano proces technologiczny wybranego elementu wraz z problemami występującymi w jego trakcie. Wykonano analizę kryterialną doboru materiału dla analizowanego elementu.

Abstract: This work addresses the issue of designing a longitudinal member, which is an element of the car's crumple zone. The operating conditions of the element were analyzed for its operation time and a case of collision. The technological process of the selected element was analyzed and problems occurring along it were pointed out. Criterial analysis was performed for the material selection.

Słowa kluczowe: projektowanie materiałowe, analiza kryterialna, strefa kontrolowanego zgniotu, stal wysokowytrzymała.

1. WSTĘP

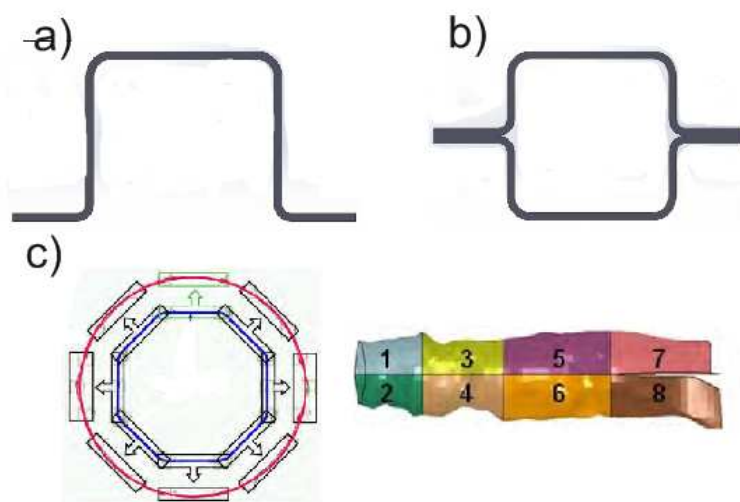
Strefa kontrolowanego zgniotu jest strefą odpowiedzialną za pochłanianie energii, a co za tym idzie za zmniejszenie przeciążeń działających na pasażerów podczas kolizji czołowej. Powoduje to, że projektowane są elementy o coraz bardziej złożonej geometrii pozwalającej na zwiększenie ilości energii możliwej do pochłonięcia. Również przemysł stalowniczy został postawiony przed zadaniem produkcji nowych generacji stali pozwalających na wytworzenie elementów o złożonej geometrii i będących w stanie pochłaniać energię z udziałem przemian strukturalnych. Obecnie stosowanymi stalami na elementy energochłonne są stale z grupy AHSS (Advanced High Strength Steel). Są to stale wielofazowe o wysokiej wytrzymałości. W grupie tej znajdują się stale: dwufazowe (DP), wielofazowe (CP) oraz stale, w których przemiana martenzytyczna indukowana jest odkształceniem plastycznym (TRIP) [1].

Proces technologiczny wytwarzania elementów wchodzących w skład strefy kontrolowanego zgniotu zależy od wytwarzanego elementu oraz zastosowanego materiału.

Ze względu na gwałtowny rozwój konstrukcji nośnych samochodów osobowych, również procesy technologiczne ulegają ciągłym zmianom. Należą do nich: tłoczenie na zimno, gięcie, tłoczenie na gorąco, hydroformowanie, spawanie, zgrzewanie, kształtowanie na walcach itp.

2. GEOMETRIA PODŁUŻNICY SAMOCHODOWEJ

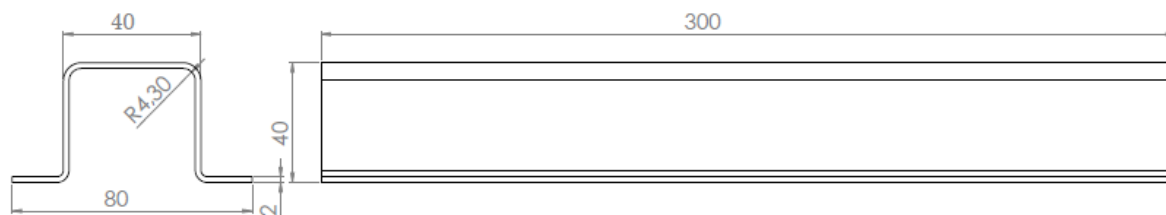
W pracy analizie poddano proces technologiczny wytwarzania przedniej podłużnicy samochodowej. Podłużnica jest elementem odpowiedzialnym za pochłanianie energii powstałej podczas kolizji (w przypadku gdy są to samochody wyposażone w crash-box podłużnica pochłania energię podczas uderzenia z szybkością powyżej 15 km/h). Podłużnica samochodowa najczęściej ma kształt jednoomegowy (rys. 1a) lub dwuomegowy (rys. 1b). Dąży się do wytwarzania podłużnic o bardzo złożonej geometrii (rys. 1c), co zwiększa maksymalną ilość energii jaką podłużnica jest w stanie pochłoniąć [2,3].



Rysunek 1. Obecnie stosowane geometrie: a) jednoomegowa, b) dwuomegowa oraz c) prototypowa geometria podłużnicy (na podstawie [3] i [4])

Figure 1. Currently used geometries: a) omega, b) dual-omega and c) longitudinal member prototype geometry (based on [3] and [4])

W pracy analizie poddano podłużnicę o geometrii jednoomegowej. Geometria elementu wraz z założonymi wymiarami została przedstawiona na rys. 2.



Rysunek 2. Geometria oraz wymiary analizowanej podłużnicy przedniej

Figure 2. The geometry and dimensions of longitudinal member

3. WARUNKI PRACY PODŁUŻNICY SAMOCHODOWEJ

Podłużnica samochodowa jest elementem, który poza odkształceniem przy kolizji jest narażony na wiele innych czynników, jak: działanie agresywnych substancji (oleje, płyny, spaliny, woda, uderzenia kamieni i wiele innych). Ze względu na to, przy projektowaniu procesu technologicznego oraz doborze materiału należy uwzględnić wymienione wcześniej zagrożenia i odpowiednio zabezpieczyć element. W przypadku agresywnego środowiska można dobrać skład chemiczny stali, aby była ona odporna na korozję lub – jeśli nie jest to możliwe – zastosować odpowiednie powłoki ochronne.

Najważniejszą rolą podłużnicy jest pochłanianie energii. W tabelicy 1 przedstawiono ilość energii powstałej podczas kolizji z nieruchomym przedmiotem w zależności od szybkości poruszania się pojazdu. Natomiast na rys. 3 przedstawiono graficzną interpretację wyników. Wartości energii podczas kolizji zostały obliczone na podstawie zależności (1) [3]:

$$E_z = \frac{(M_C - \Delta m)v^2}{2} \quad (1)$$

gdzie:

E_z – energia zderzenia,

M_C – masa całkowita pojazdu,

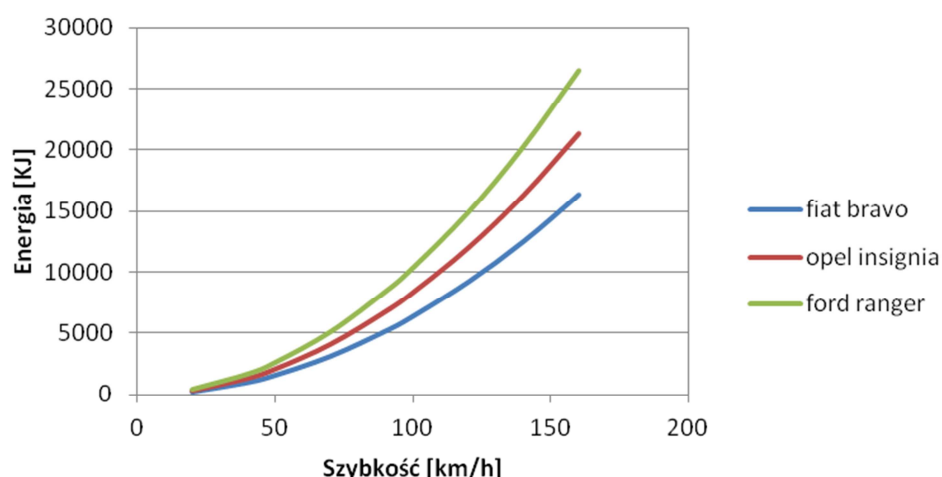
Δm – ubytek masy nieutwierdzonej w samochodzie (np. luźno przewożone przedmioty),

v – prędkość w momencie zderzenia.

W celu przedstawienia wpływu szybkości poruszania się pojazdu i jego masy na ilość energii powstałej podczas zderzenia obliczenia wykonano dla trzech pojazdów o różnej masie całkowitej.

Tablica 1. Wartość energii powstałej podczas kolizji dla pojazdów o różnej masie
Table 1. Energy value created upon collision of cars with different mass

	Fiat Bravo	Opel Insignia	Ford Ranger
M_C , kg	1275	1664	2073
Szybkość, km/h	Energia, KJ		
20	255	333	415
40	1020	1331	1658
50	1594	2080	2591
70	3124	4077	5079
90	5164	6739	8396
100	6375	8320	10365
120	9180	11981	14926
140	12495	16307	20315
160	16320	21299	26534



Rysunek 3. Krzywe zmiany energii uderzenia w zależności od szybkości poruszania się pojazdu

Figure 3. The curves of impact energy change depending on a vehicle's speed

Na podstawie tablicy 1 jak i rys. 3 widać, że wraz ze wzrostem prędkości w czasie zderzenia ilość energii znacząco wzrasta. Również masa pojazdu powoduje wzrost energii powstałej podczas kolizji. Wynika z tego, że w zależności od rodzaju pojazdu (jego masy), podłużnica powinna się różnić pod względem geometrycznym w celu zapewnienia optymalnej energochłonności.

4. PROCES TECHNOLOGICZNY PODŁUŻNICY SAMOCHODOWEJ

Proces technologiczny podłużnicy samochodowej zależy od jej geometrii. W pracy przedstawiono proces technologiczny wytwarzania jednoosobowej podłużnicy samochodowej. Główne etapy tego procesu to:

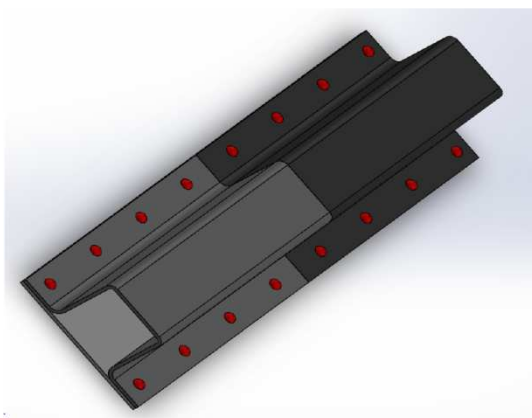
- przygotowanie arkusza blachy,
- kształtowanie profilu,
- zgrzewanie,
- lakierowanie.

We współczesnych samochodach osobowych elementy energochłonne wykonywane są z arkusza o zmiennej sztywności. Arkusz taki można otrzymać np. przez zastosowanie technologii flexible rolling [2,4], w której podczas walcowania walce przesuwają się pionowo zmieniając lokalnie grubość blachy. Można również zastosować technologię tailored welded blanks, w której wykorzystuje się wiązkę lasera do zespawania arkuszy blachy o różnej grubości lub/i wykonanych z innych materiałów. W technologii tej stosowane jest również zgrzewanie tarciove z wymieszaniem metalu zgrzeiny. Obecnie technika ta z sukcesem stosowana jest do łączenia aluminium, choć prowadzone są próby łączenia stali z grupy AHSS [5]. Podczas łączenia arkuszy blach należy uwzględnić, że blachy stalowe dla motoryzacji są cynkowane ogniowo. Natomiast podczas spawania należy tak dobrać parametry, aby ograniczyć wypalenie cynku z powierzchni stali.

Po przygotowaniu arkusza blachy następuje proces kształtowania profilu. W przypadku podłużnicy jednoosobowej profil ten można otrzymać poprzez gięcie profili "U". Jednak

ze względu na wysoką wytrzymałość stale z grupy AHSS charakteryzują się dużym efektem sprężynowania [2,7,8]. Efekt ten powoduje, że po wyjęciu profilu z matrycy nie będzie on zachowywał projektowanego kształtu. Aby ograniczyć efekt sprężynowania należy stosować małe promienie krawędzi narzędzia w procesie gięcia.

W końcowym etapie procesu technologicznego następuje zgrzanie podłużnicy zewnętrznej i wewnętrznej ze sobą. Ze względu na dwuelementową konstrukcję podłużnicy, przy jej projektowaniu należy uwzględnić odpowiednią długość oraz promień kołnierza, który służy do zgrzewania obu elementów ze sobą. Źle dobrana długość oraz promień kołnierza może spowodować problemy przy zgrzewaniu oporowym, prowadzące do przesuwania się materiału w procesie zgrzewania i powstania zgrzeiny niespełniającej założonych wymagań jakościowych [9]. Na rysunku 4 przedstawiono gotową podłużnicę samochodową.



Rysunek 4. Schemat podłużnicy samochodowej po zgrzaniu obu jej części (czerwone miejsca to miejsca zgrzewania)

Figure 4. Schematic of longitudinal member after spot welding of both parts (red places indicate welding areas)

Ostatecznie podłużnicę samochodową poddaje się lakierowaniu w celu dodatkowego zabezpieczenia elementu przed korozją. Powłoka wykonana jest z kilku warstw. Na początku element pokrywa się dwoma warstwami podkładu antykorozyjnego, zabezpieczającego element przed korozją. Następnie kładzie się 2-3 warstwy lakieru, który zabezpiecza podkład antykorozyjny przed zniszczeniem oraz jeżeli jest to wymagane nadaje konkretny kolor elementowi. Na końcu kładzie się warstwę lakieru bezbarwnego zwanego klarem, w celu zabezpieczenia lakieru przed zarysowaniami. Całkowita grubość powłoki powinna się zawierać w przedziale od 100-200 μm [12].

5. ANALIZA KRYTERIALNA DOBORU MATERIAŁU

Analiza kryterialna jest jedną z podstawowych metod pozwalającą na określenie najlepszego możliwego wyniku na podstawie analizowanych czynników. W przypadku tej pracy jej wynikiem jest materiał najlepiej spełniający założenia projektowe. W przypadku analizowanego elementu rozważano dobór materiału z szerokiego zakresu stali o zróżnicowanym poziomie wytrzymałości i plastyczności:

- stal DP 600,

- stal DP 800,
- stal DL 800,
- stal DP 1000,
- stal X10CrNi18-8,
- stal TRIP 690.

Do najważniejszych kryteriów branych pod uwagę w analizie doboru materiału na podłużnicę samochodową należą:

K1 – granica plastyczności,

K2 – wytrzymałość na rozciąganie

K3 – wydłużenie,

K4 – tłoczność,

K5 – podatność na spawanie,

K6 – podatność na odkształcenie plastyczne.

Tablica 2. Zestawienie analizowanych własności wybranych stali [2,10,11]

Table 2. Analysed properties of selected steels [2,10,11]

	R _{p0,2} , MPa	R _m , MPa	A, %	Tłoczność	Spawalność	Min. promień gięcia dla 90°
DP 600	350÷450	600÷700	16	Dobra	B. dobra	0xt
DP 800	500÷650	800÷950	10	Dobra	B. dobra	1xt
DL 800	390÷540	800÷950	13	Dobra	B. dobra	1xt
DP 1000	700÷950	1000÷1200	7	Dobra	Dobra	2xt
X10CrNi18-8	195÷280	500÷950	40	Dobra	B. dobra	-
TRIP 690	410÷510	690÷800	≥ 25	Dobra	Niska	-

t – grubość arkusza blachy

Tablica 3. Analiza kryterialna doboru materiału

Table 3. Weighted property index method of material selection

	K1	K2	K3	K4	K5	K6	Suma	Waga
K1	X	0,5	0,5	0,5	0,6	0,6	2,7	0,45
K2	0,5	X	0,5	0,4	0,5	0,6	2,5	0,41
K3	0,5	0,5	X	0,4	0,6	0,5	2,5	0,41
K4	0,5	0,6	0,6	X	0,4	0,5	2,6	0,43
K5	0,4	0,5	0,4	0,6	X	0,6	2,5	0,41
K6	0,4	0,4	0,5	0,5	0,4	X	2,2	0,36

Wybrane własności stali zestawiono w tablicy 2, natomiast w tablicy 3 dokonano analizy kryterialnej doboru materiału ze względu na wybrane kryteria. Następnie analizowane własności poddano skalowaniu. Skalowanie jest metodą pozwalającą na sprowadzenie wszystkich własności do jednego przedziału liczbowego. Skalowania własności można dokonać poprzez zastosowanie zależności (2) [13]:

$$\beta = \frac{\text{wartość danej własności} \cdot 100}{\text{najwyższa wartość spośród analizowanych wielkości}} \quad (2)$$

Tablica 4. Własności materiałów po skalowaniu oraz otrzymany indeks wagowy

Table 4. Scaled properties and weighted property index

	R _e , MPa	R _m , MPa	A, %	Tłoczność	Spawalność	Min. promień gięcia dla 90°	Indeks wagowy
DP 600	47	58	40	100	100	100	187
DP 800	68	79	25	100	100	80	195
DL 800	57	79	32,5	100	100	80	191
DP 1000	100	100	17,5	100	80	40	157
X10CrNi18-8	29	79	100	100	100	0	158
TRIP 690	54	67	62,5	100	40	0	151

Własności materiałów po skalowaniu oraz otrzymany indeks wagowy zestawiono w tablicy 4. Do wyznaczenia opłacalności danego materiału w analizowanym problemie należy obliczyć parametr CUS (z ang. *cost of unit strength*). Parametr ten określa cenę 1 MPa dla danego materiału. Wielkość tą oblicza się przy użyciu równania (3) [13]:

$$CUS = \frac{C \cdot \rho}{\sigma} \quad (3)$$

gdzie:

C – cena za kg materiału,

ρ – gęstość materiału,

σ – granica plastyczności.

Natomiast opłacalność obliczona została na podstawie zależności (4):

$$\text{Opłacalność} = \frac{\text{Indeks wagowy}}{CUS} \quad (4)$$

Z przeprowadzonej analizy kryterialnej wynika, że materiałem najlepiej spełniającym założenia projektowe jest stal dwufazowa DP 800 (tablica 5). Stal ta jest optymalnym wyborem na materiał przeznaczony do produkcji przedniej podłużnicy samochodowej ze względu na odpowiednią sztywność, podatność na kształtowanie oraz dobrą spawalność. Jednak ze względu na małe duże różnice między trzema pierwszymi materiałami mogłoby się okazać, że przy zmianie analizowanych własności, zmieniłby się również optymalny materiał. W metodzie tej wynik końcowy zależy w głównej mierze od projektowanego elementu, a co za tym idzie od analizowanych własności materiału.

Tablica 5. Ranking przydatności poszczególnych stali

Table 5. Rank of the usability of particular steels

	CUS × 100	Indeks wagowy	Opłacalność	Ranking
DP 600	8,7	187	21,4	4
DP 800	6,0	195	32,5	1
DL 800	7,3	191	26,2	3
DP 1000	4,9	157	31,9	2
X10CrNi18-8	28,0	158	5,6	6
TRIP 690	9,2	151	16,3	5

6. PODSUMOWANIE

Projektowanie elementów wchodzących w skład kontrolowanej strefy zgniotu jest procesem skomplikowanym i czasochłonnym, wymagającym szerokiej wiedzy z zakresu procesów technologicznych jak i materiałoznawstwa. Optymalną zdolność do pochłaniania energii podłużnicy samochodowej uzyskuje się poprzez dobór odpowiedniej geometrii podłużnicy, rodzaju gatunku stali, jak i metody łączenia. Biorąc pod uwagę przyjęte uproszczenia projektowe, najbardziej przydatnym materiałem na analizowany element strefy kontrolowanego zgniotu jest stal typu DP 800 o strukturze ferrytyczno-martenzytycznej.

LITERATURA

1. A. Grajcar, Struktura stali C-Mn-Si-Al kształtowana z udziałem przemiany martenzytycznej indukowanej odkształceniem plastycznym, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice, 2009.
2. M.Y. Demeri, Advanced high-strength steels, science technology and applications, ASM International, Ohio, 2013.
3. A. Kopczyński, E. Rusiński, Bezpieczeństwo bierne, pochłanianie energii przez profile cienkościennie, Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 2010.
4. FutureSteelVehicle, Steel Market Development Institute, 2011, www.worldautosteel.org.
5. M. Ghosh, K. Kumar, R. S. Mishra, Friction stir lap welded advanced high strength steel, *Material Science and Engineering A* 528 (2011) 8111-8119.
6. Advanced high strength steel (AHSS) application guidelines, Version 4.1, June 2009, <http://www.worldautosteel.org>.
7. H. Lundh, P. Bustad, B. Carlsson, G. Engberk, L. Gustafsson, R. Lidgren, Sheet steel forming handbook, size shearing and plastic forming, SSAB Tunplatt AB, Borlange, 1997.
8. Z. Gronostajski, R. Kuziak, Metalurgiczne, technologiczne i funkcjonalne podstawy zaawansowanych wysokowytrzymałych stali dla przemysłu motoryzacyjnego, *Prace IMŻ*, 1 (2010) 22-26.
9. T. Nilsson, M. Reinberth, S. Jansson, P. Augustsson, L. Johansson, L. Hedin, V. Tannerfors, L. Schon, H. Trogen, Sheet steel joining handbook, joining of high strength steels, SSAB Tunplatt AB, Borlange, 2004.
10. www.ssab.com/pl/Brands/Docol/Products/
11. www.euro-inox.org, Własności stali odpornych na korozję, Wydawnictwo Euro Inox, 2002.
12. www.bluetechology.pl.
13. F. Findik, K. Turan, Materials selection for lighter wagon design with a weighted property index method, *Materials and Design* 37 (2012) 470-477.