



Analiza możliwości zastosowania elastomerowych systemów gąsienicowych w szybkobieżnych maszynach inżynieryjnych. Część I. Przegląd rozwiązań konstrukcyjnych

DANIELA SZPACZYŃSKA, MARIAN ŁOPATKA

Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Inżynierii Mechanicznej,
Instytut Robotów i Konstrukcji Maszyn, ul. gen. S. Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa,
daniela.szpaczynska@wat.edu.pl, marian.lopotka@wat.edu.pl

Streszczenie. W artykule przedstawiono analizę rozwiązań konstrukcyjnych układów jezdnych wykorzystujących gąsienice elastomerowe pod kątem możliwości ich użycia w szybkobieżnych maszynach inżynieryjnych, które wymagają intensywnego manewrowania oraz zdolności do rozwijania wysokich sił uciągu. Analizie poddano zarówno rozwiązania używane w aplikacjach cywilnych, jak i wyniki badań wykorzystania gąsienic elastomerowych w ciężkich pojazdach opancerzonych. Na tej podstawie sformułowano zalecenia konstrukcyjne do projektowania szybkobieżnych maszyn inżynieryjnych oraz wykorzystywanych w nich elastomerowych systemów gąsienicowych.

Słowa kluczowe: inżynieria mechaniczna, gąsienice elastomerowe, układy jezdne, szybkobieżne maszyny inżynieryjne

DOI: 10.5604.01.3001.0015.6960

1. Wprowadzenie

Elastomerowe systemy gąsienicowe łączą w sobie zalety systemów gąsienicowych i kołowych, umożliwiając efektywną pracę zarówno na podłożach gruntowych, jak i utwardzonych. Dlatego znajdują coraz szersze zastosowanie np. w maszynach budowlanych, rolniczych, leśnych itp.

Z uwagi na możliwości przemieszczania się w terenie, a także po drogach utwardzonych badane są również możliwości ich wykorzystania w pojazdach

wojskowych, szczególnie w układach jezdnych ciężkich szybkobieżnych pojazdów opancerzonych, takich jak wozy bojowe, transportery opancerzone, systemy artyleryjskie itp. Należy zwrócić uwagę, że w aplikacjach wojskowych oczekuje się zwykle możliwości zamiennego stosowania gąsienic stalowych i elastomerowych, aby umożliwić lepsze wykorzystanie posiadanych zasobów. Ogranicza to swobodę w kształtowaniu konstrukcji systemu gąsienicowego i narzuca sposób przenoszenia napędu oraz obciążeń zewnętrznych.

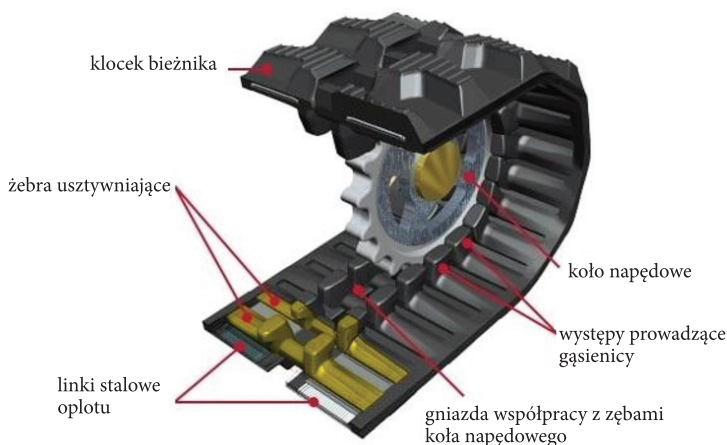
Specyficzną odmianą pojazdów opancerzonych są szybkobieżne maszyny inżynieryjne, które oprócz szybkobieżności powinny cechować się wysoką zwrotnością i manewrowością na miejscu pracy oraz zdolnościami do rozwijania dużych sił uciągu, niezbędnych do pracy osprzętami roboczymi. Najczęściej używane są osprzęty spycharkowe, ładowarkowe oraz koparkowe z wymiennymi narzędziami. W przypadku wykorzystywania udźwigu osprzętu roboczego bardzo ważny jest zapas stateczności, który w dużej mierze zależy od położenia środka ciężkości maszyny oraz zastosowanego układu jezdnego. Stawia to specyficzne wymagania układom jezdnym, napędowym oraz układom skrętu szybkobieżnych pojazdów gąsienicowych. Z tych względów często ich rozwiązania konstrukcyjne znacznie odbiegają od przyjmowanych w standardowych szybkobieżnych pojazdach opancerzonych. Akceptowalne jest odmienne ukształtowanie układu jezdnego i napędowego w celu zapewnienia wysokich możliwości roboczych.

Celem przedstawionej analizy jest określenie możliwości, ograniczeń oraz uwarunkowań efektywności wykorzystania systemów z gąsienicami elastomerowymi w szybkobieżnych maszynach inżynieryjnych.

2. Analiza rozwiązań elastomerowych systemów gąsienicowych stosowanych w aplikacjach cywilnych

Początkowo gąsienice elastomerowe wprowadzano do maszyn i pojazdów głównie w celu zapewnienia możliwości przemieszczania się po nawierzchniach utwardzonych. Standardowe układy jezdne wyposażone w gąsienice stalowe niszczyły bowiem podłoże podczas jazdy, a zwłaszcza manewrowania, co praktycznie uniemożliwiało pracę i przemieszczenie się maszyn gąsienicowych po utwardzonych nawierzchniach bez specjalnego przygotowania podłoża. Z tych względów szczególnie intensywnie systemy elastomerowe rozwijano w gąsienicowych maszynach budowlanych przeznaczonych do prac w terenie zurbanizowanym, gdzie nie ma możliwości przemieszczania się na stalowych gąsienicach bez naruszania struktury dróg i chodników. Istotnym czynnikiem przemawiającym za wprowadzeniem systemów elastomerowych do maszyn pracujących w terenie zurbanizowanym było również zmniejszenie hałasu wywołanego przez układ jezdny, zwłaszcza podczas manewrowania.

W przestrzeni ograniczonej przez budynki i obiekty infrastrukturalne znaczenia nabierają rozmiary, zwrotność i manewrowość maszyn. Z tych względów wśród maszyn przeznaczonych do pracy w warunkach zurbanizowanych, w celu umożliwienia działania w ograniczonej przestrzeni, dominują minimaszyny (masa do ok. 5-6 Mg) oraz maszyny kompaktowe (masa do ok. 10-12 Mg), o zwiększonej ruchliwości osprzętu roboczego i specjalnie ukształtowanym nadwoziu. Dla zapewnienia odpowiedniej zwrotności są one zwykle wyposażane w burtowy układ skrętu, który umożliwia wykonanie skrętu w miejscu. Dominują wśród nich minikoparki i miniwozidła o prędkościach jazdy nieprzekraczających zwykle 5 km/h. Układ jezdny obciążany jest głównie siłami nacisku. Podczas jazdy wytwarzane są stosunkowo małe siły napędowe (tylko pokonywanie oporów ruchu), zwiększane jedynie podczas wykonywania manewrów skrętu. Z tych względów najczęściej wykorzystuje się w nich gaśnice elastomerowe z wkładkami w postaci stalowych żeber (rys. 1). Poprawiają one dystrybucję nacisków na podłoże oraz stanowią element kształtowego przenoszenia napędu, współpracując z zębami koła napędowego. Rozwój technologii pozwolił na zwiększenie przenoszonych obciążeń i zastosowanie tego typu rozwiązań w koparkach o masie do ok. 15 Mg oraz wozidłach o masie całkowitej do ok. 30 Mg (tab. 1).



Rys. 1. Budowa wolnobieżnej gaśnicy elastomerowej z żebrami stalowymi [1]

W celu zapewnienia dużej żywotności mimo intensywnego manewrowania i ścierania gaśnic podczas skrętu gaśnice tego typu posiadają relatywnie grubego bieżnika. Duża grubość pasa gaśnicowego powoduje jednak wyższą sztywność gaśnicy i znaczący wzrost oporów jej przewijania, a w efekcie oporów toczenia, a także zwiększone wydzielanie ciepła, co może powodować przegrzewanie gaśnic i stanowić problem podczas jazdy z wysokimi prędkościami [2, 3, 4]. Stąd ich maksymalne prędkości jazdy nie przekraczają 10-13 km/h.

TABELA 1
 Podstawowe parametry maszyn wyposażonych w elastomerowe systemy gąsienicowe

Typ maszyny	Układ skrętu	Liczba gąsienic	Długość gąs. na gruncie, m	Liczba koł/rolek jezdnych	Przeniesienie napędu	Masa, kg	Moc, kW	Prędkość maks., km/h
Ładowarka kompaktowa Caterpillar 299 D3XE	burtowy	2	1,8	2 × 7	kształtowe / zebra	5 333	82	13,5
Ładowarka kompaktowa ASV RT-120	burtowy	2	1,8	2 × 6	kształtowe	5 550	88	16
Koparka kompaktowa Takeuchi TB2150	burtowy	2	2,9	2 × 9	kształtowe / zebra	15 715	85	5,5
Koparka kompaktowa Wacker Neuson ET145	burtowy	2	2,9	2 × 9	kształtowe / zebra	16 335	55	5
Koparka kompaktowa Mecacac 10 MCR	burtowy	2	1,9	2 × 8	kształtowe / zebra	9 400-10 000	55	10
Wozidło Terramac RT 14	burtowy		3,1	2 × 8	kształtowe / zebra	15 540-28 140	231	11
Wozidło Morooka MST 1500VD	burtowy	2	3,1	2 × 8	kształtowe / zebra	10 900-17 900	168	11
Wozidło gąsienicowe Prinoth Panther T22	burtowy	2	3,8	2 × 5	kształtowe / zebra	18 395-33 592	225	13
Spycharka szybkieżna John Deere 764 HSD	przegubowy	4	1,35	4 × 4	kształtowe	15 422	164	26
Ciągnik rolniczy Challenger MT 800C	burtowy	2	3,0	2 × 6	cierne	19 051-26 762	495	40
Ciągnik rolniczy John Deere 8RT 410	burtowy	2	2,5	2 × 5	cierne	16 225-17 690	302	40
Ciągnik rolniczy John Deere 8RX 410	zwrotnicowy	4	1,5	2 × 4 + 2 × 5	kształtowe	16 225-17 690	302	40
Ciągnik rolniczy Case IH Quadtrac Steiger 620	przegubowy	4	1,5	4 × 5	kształtowe	24 629-29 030	460	40
Ciągnik rolniczy Claas XERION TRAC TS 5000	zwrotnicowy	4	1,5	4 × 5	kształtowe	24 000-30 000	374	30
Kombajn zbierający Claas Jaguar 960 Terra Trac/Hartog Abbecker	przegubowy	4	1,8	4 × 4	cierne	24 000-30 000	460	40
Wozidło do dłużyc Jarcac Dual	przegubowy	4	1,0	4 × 2	kształtowe / zebra	5 700-10 700	55	12
Wozidło eksperymentalne Ponsse and Prinoth	przegubowy	4	2,4	4 × 4	kształtowe / zebra	28 310-38 630	210	11

Rozwiązania takie są stosowane również w miniładowarkach, jednak w maszynach przeznaczonych do pracy na podłożach gruntowych, gdzie użytkownikowi zależy na rozwijaniu dużych sił uciążu, a zużycie ścierne gąsienic nie jest zbyt intensywne, coraz częściej wykorzystywane są znacznie lżejsze, cieńsze i bardziej elastyczne gąsienice bez stalowych żeber. Półelastyczny układ jezdny (rolki jezdne połączone są w wózki) w połączeniu z podatną gąsienicą zapewnia rozwijanie wyższych sił przyczepności oraz większych prędkości jazdy, umożliwiając uzyskanie wyższej wydajności pracy [6]. W celu ograniczenia lokalnych naprężeń i zwiększenia trwałości gąsienicy napęd przenoszony jest kształtowo na występy pasa gąsienicowego przez specjalnie ukształtowane koło napędowe, współpracujące jednocześnie z kilkoma rzędami występow pasa gąsienicowego (rys. 2).



Rys. 2. Elastomerowy system gąsienicowy ładowarki firmy ASV Posi-Track [5]

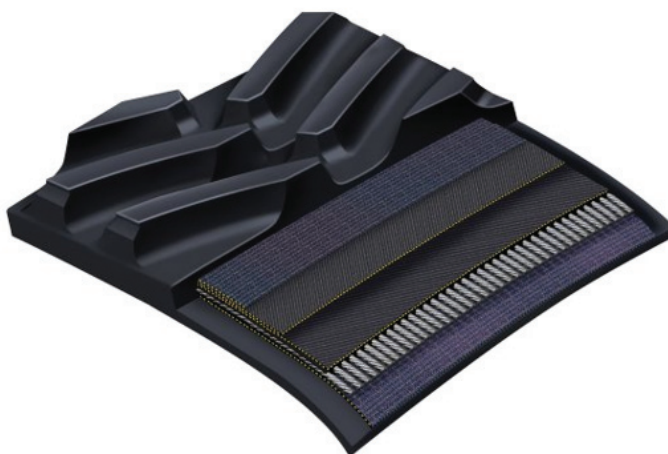
Rozwój konstrukcji i technologii produkcji pasów gąsienicowych pozwolił na zwiększenie dopuszczalnych obciążeń oraz prędkości jazdy i opracowanie systemów typu delta (rys. 3), które są gąsienicowymi zamiennikami ogumienia wielkogabarytowego dla ciężkich maszyn i pojazdów. Wymagało to:

- wprowadzenia oplotu wzdłużnego z galwanizowanych linek stalowych o średnicy od 4 do 7 mm [8, 9] na całej szerokości gąsienicy, wykonanego z jednego odcinka liny zwiększającego wytrzymałość pasa na rozciąganie (rys. 4);

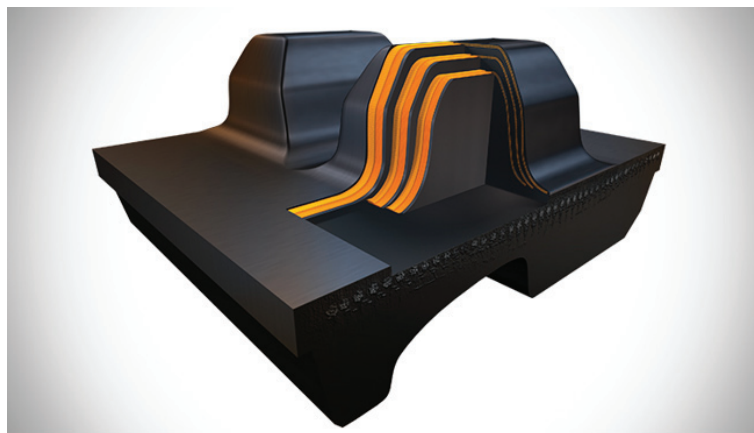
- opracowania wielowarstwowego opłotu z tkaniny zapewniającego sztywność poprzeczną łańcucha i jej odporność na przebicie i rozerwanie (rys. 4);
- odpowiedniego ukształtowania wytrzymałościowego występów przenoszących napęd oraz odpowiedzialnych za ukierunkowanie łańcucha podczas skrętu (rys. 5), w celu rozproszenia naprężeń oraz ich wielowarstwowego wzmocnienia za pomocą osnowy z tkanin.



Rys. 3. Zamiennik ogumienia wielkogabarytowego — system łańcuchowy typu delta [7]



Rys. 4. Budowa elastomerowego pasa łańcuchowego systemu delta [8]



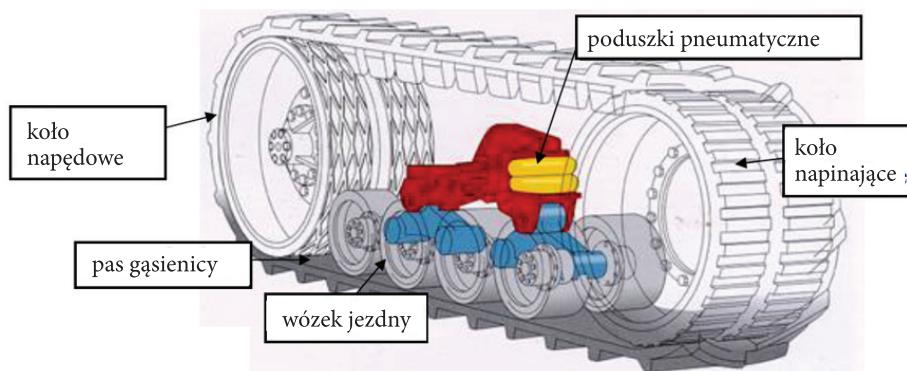
Rys. 5. Wielowarstwowe wzmocnienia występów napędu gąsienicy zapewniają jej odpowiednią trwałość przy przenoszeniu zwiększonych sił napędowych [10]

Opracowanie systemów typu delta umożliwiło budowę ciężkich ciągników rolniczych z gąsienicowym układem jezdny 4×4 o masie maksymalnej dochodzącej do 24-30 Mg, spycharek gąsienicowych o masie do 15 Mg (tab. 1) oraz gąsienicowych wersji ciągników do zgarniarek. Z uwagi na wysokie obciążenia układu jezdnygo i dążenie do minimalizacji oporów skrętu posiadają one przegubowe układy skrętu. W lżejszych ciągnikach stosowane są również układy zwrotnicowe. Maksymalne prędkości jazdy takich rozwiązań sięgają 20-25 km/h w przypadku braku elementów podatnych w wózkach jezdnych i 40 km/h (tab. 1) w przypadku zastosowania hydropneumatycznych elementów zawieszenia wózków o małym skoku (tzw. układ półelastyczny). W celu zabezpieczenia gąsienic przed przegrzewaniem podczas przejazdów oferowane są czujniki temperatury wbudowane w pas gąsienicowy [11].

Średnia trwałość gąsienic elastomerowych z kształtowym przeniesieniem napędu kształtuje się na poziomie 2000 h, ale w sprzyjających warunkach może wynieść nawet 5000 h [12] i jest porównywalna z trwałością ogumienia diagonalnego.

Równoległe z systemami o kształtowym przeniesieniu napędu rozwijano cierne przeniesienie napędu. Przykładem takiego rozwiązania jest system zastosowany w ciągnikach Challenger o skręcie burtowym (rys. 6). W celu przeniesienia napędu wymaga on ciągłego napinania gąsienicy. Realizowane jest to za pomocą cylindra hydraulicznego współpracującego z akumulatorem. Rolki jezdne pracujące w układzie wózkowym, wyposażone w poduszkę powietrzną, pozwalają na bardzo dobre kopiowanie nierówności terenowych i zapewniają rozwijanie wysokich sił uciągu oraz ograniczają generowane drgania i wibracje, pozwalając na rozwijanie wyższych prędkości przejazdowych. Na bazie doświadczeń zdobytych przy opracowywaniu ciągnika Challenger firma Caterpillar opracowała szybkobieżną opancerzoną

spycharkę gąsienicową DEUCE [13], która przy masie 15 Mg osiąga maksymalną prędkość przejazdową 48 km/h (30 mph). Wyposażona jest w zawieszenie hydro-pneumatyczne o zmiennych charakterystykach — elastycznej podczas przejazdów i półsztywnej podczas pracy (rys. 7).



Rys. 6. System z ciernym przeniesieniem napędu ciągnika rolniczego CAT Challenger [14]



Rys. 7. Spycharka szybkobieżna DEUCE [13]



Rys. 8. Budowa i działanie systemu gąsienicowego Terra Trac [15]

Podobne rozwiązanie pod nazwą Terra Trac, wykorzystujące zawieszenie hydro-pneumatyczne o małym skoku (120 mm), opracowała firma Class (rys. 8). Umożliwia ono oprócz dobrego kopiowania nierówności i ograniczania drgań oraz wibracji skracanie czynnej długości gąsienicy podczas skrętu, zmniejszając opory skrętu i niszczenie podłoża.

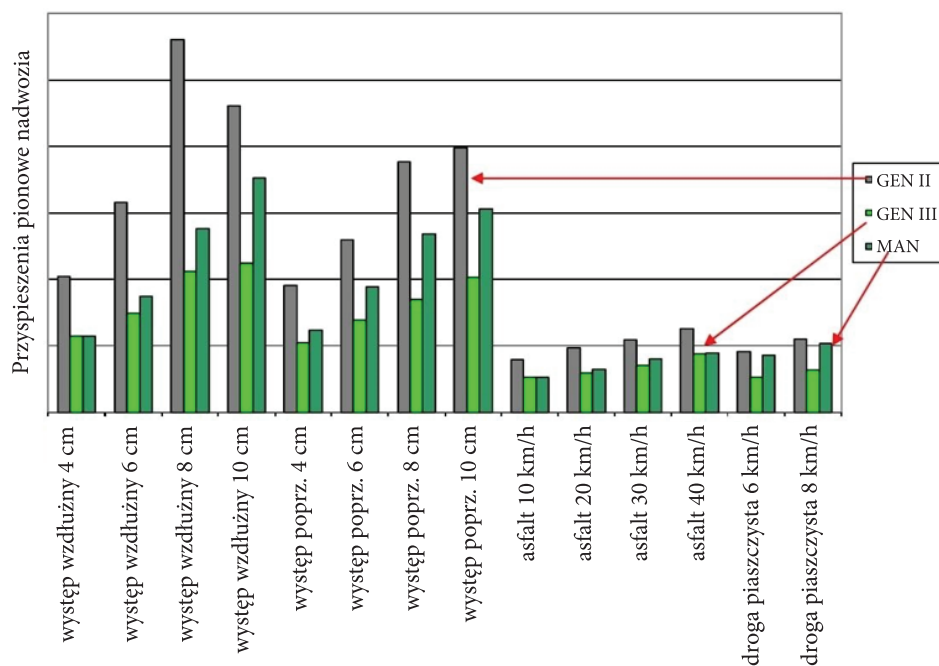
Zdaniem specjalistów [16], dzięki zastosowaniu ciernego przeniesienia napędu, niewywołującego koncentracji naprężeń w pasie gąsienicowym, znacząco zwiększa się trwałość pasa gąsienicowego — nawet do 7000 h. W układach z kształtowym przeniesieniem napędu w wyniku koncentracji naprężeń najczęściej uszkodzeniu ulegają występy przeniesienia napędu. Niższe obciążenia elementów zapewniają również większą niezawodność całego systemu gąsienicowego. Zaletą jest także mniejsza wysokość systemu gąsienicowego w stosunku do gąsienic typu delta. Do wad systemów z ciernym przeniesieniem napędu należy zaliczyć [16]: wrażliwość na położenie środka ciężkości w maszynach o burtowym układzie skrętu (wymagają dobrego wyważenia) oraz wrażliwość na obecność zanieczyszczeń, zwłaszcza płynnych, na współpracujących powierzchniach. Wymagają dobrego odprowadzenia piasku i błota, zwłaszcza z koła napędowego.

Przeprowadzone badania efektywności zawieszenia hydropneumatycznego systemu gąsienicowego Terra Trac [17] wykazały, że opracowane rozwiązanie może skutecznie zredukować niepożądane przyspieszenia oddziałujące na operatora podczas jazdy. Uzyskane rezultaty (rys. 9) wskazują, że zapewnia ono lepszy komfort jazdy niż zawieszenie samochodu ciężarowego.

Dopuszczalna masa ciągników rolniczych z burtowym układem skrętu (system dwóch gąsienic) wyposażonych w elastomerowe systemy gąsienicowe sięga ponad 20 Mg, a ciągników wyposażonych w przegubowe układy skrętu i cztery gąsienice może przekraczać 30 Mg, umożliwiając rozwijanie prędkości jazdy sięgających 40 km/h (tab. 1).

Podstawowe przesłanki determinujące coraz szersze zastosowanie gąsienic elastomerowych w rolnictwie, oprócz możliwości przemieszczania się po drogach utwardzonych, to:

- zapewnienie niskich nacisków jednostkowych, które nie wywołują znacznego zagęszczenia gleby podczas przejazdów maszyny, co jest niezwykle istotne dla prowadzonych upraw — badania wykazały bowiem, że przejazdy maszyn o dużych naciskach jednostkowych po polach uprawnych mają negatywny wpływ na żyzność gleby i produktywność upraw. Nadmierne zagęszczenie gleby zwiększa opór dla rosnących korzeni, a także zmniejsza przestrzenie między ziarnami gleby kumulujące wodę [18, 19, 20, 21, 22];
- osiągnięcie wysokich sił przyczepności przy niższych wartościach poślizgu, a co za tym idzie większej mocy uciążu potrzebnej do prac uciążowych i wyższej sprawności przeniesienia mocy na grunt, co zmniejsza energochłonność prac i zużycie paliwa [23, 24, 25, 26, 27, 28].



Rys. 9. Porównanie przyspieszeń pionowych nadwozia maszyny z systemem Terra Trac II i III generacji z przyspieszeniami pionowymi nadwozia samochodu ciężarowego MAN 10 TGL [17]

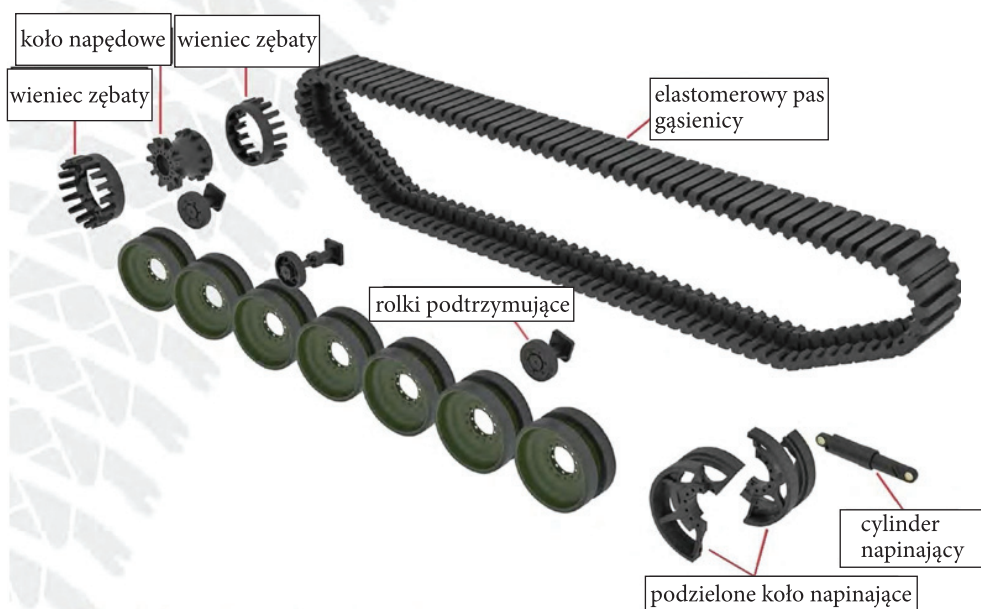
Należy zauważyć, że z punktu widzenia możliwości przejazdu po drogach publicznych systemy gąsienicowe umożliwiają projektowanie maszyn o wyższej masie dopuszczalnej, ponieważ traktowane są jako wózki jezdne, o dopuszczalnym obciążeniu drogowym 16 Mg, podczas gdy w maszynach kołowych obciążenie nie może przekraczać 11,5 Mg dla pojedynczej osi. Ponadto alternatywne rozwiązania z wielkogabarytowymi kołami bliźniaczymi znacznie zwiększają szerokość ciągników, istotnie przekraczając standardowe skrajnie drogowe.

3. Specyfika wymagań i oczekiwanych zdolności systemów gąsienic elastomerowych dla opancerzonych pojazdów szybkojezdnych

Priorytetem pojazdów wojskowych jest prędkość, manewrowość i mobilność terenowa. Transportery gąsienicowe, gąsienicowe wozy bojowe oraz czołgi, wyposażone w stalowe gąsienice, dzięki dobrej przyczepności do podłoża cechują się wysoką mobilnością terenową. Problemem jest ich szybkie przemieszczanie po utwardzonych drogach. Wykorzystanie nakładek gumowych na pasy gąsienicowe nie rozwiązuje w pełni problemu, ponieważ zwiększa znacząco masę gąsienic, zmniejsza ich przyczepność do podłoża oraz nie zapewnia wysokiej trwałości układu jezdnego [29, 30, 31]. Podczas przejazdów po drogach utwardzonych w wyniku realizowanych skrętów oraz hamowań nakładki ulegają szybkiemu zużyciu. Segmenty gumowe muszą być naprawiane lub wymieniane średnio co ok. 400 km przebiegu [31]. Ponadto metalowe gąsienice intensywnie degradują nie tylko drogi, lecz także środowisko naturalne [30, 32]. Stąd zainteresowanie systemami gąsienic elastomerowych. Poważnym ograniczeniem w ich rozpowszechnieniu jest jednak oczekiwanie, że będą zamiennikami dla gąsienic stalowych, niewymagającymi wprowadzania istotnych zmian konstrukcyjnych w pojazdach. Oznacza to, że wykorzystywany będzie burtowy układ skrętu, a długość gąsienicy na gruncie będzie się kształtować od 3,5 m dla lekkich pojazdów opancerzonych (masy do ok. 15 Mg) do 4,7 m dla ciężkich czołgów (masy ok. 63 Mg). Zarówno oczekiwane prędkości jazdy, jak i masy pojazdów oraz ich wymiary znacznie odbiegają od rozwiązań spotykanych w aplikacjach cywilnych. Stąd niezbędne było opracowanie specjalnych rozwiązań konstrukcyjnych oraz technologii wytwarzania.

Najbardziej zaawansowanymi rozwiązaniami szybkojezdnych gąsienic elastomerowych dysponuje firma Soucy, która rozwija tę technologię od ponad 20 lat. Pierwsze konstrukcje przeznaczone były dla transporterów opancerzonych M113 o masie 13 Mg, obecnie oferowane są rozwiązania dla pojazdów opancerzonych o masie do 35 Mg, a przygotowywane są systemy dla pojazdów o masie 50 Mg [31]. Zastosowanie gąsienicy elastomerowej wymaga wymiany koła napędowego (napęd kształtowy), kół jezdnych, koła napinającego i rolek podtrzymujących (rys. 10).

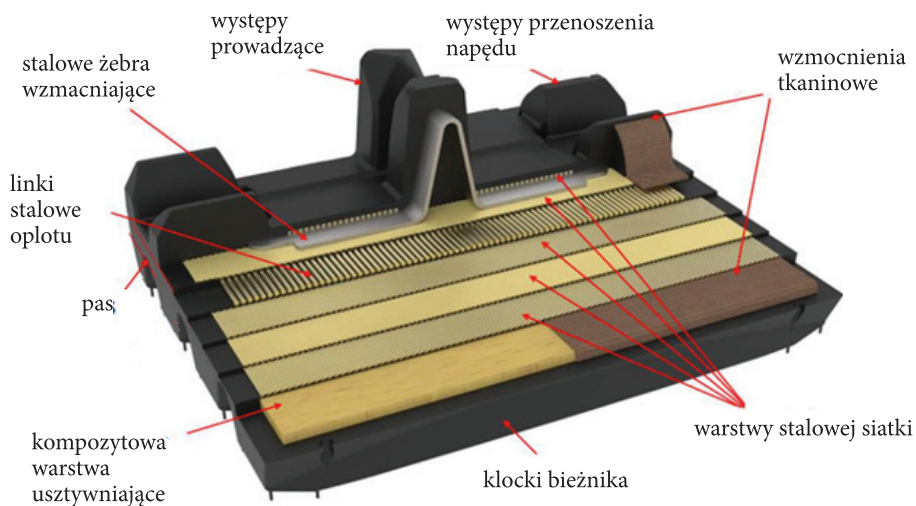
Pas gąsienicowy dla zwiększenia wytrzymałości zbrojony jest oprócz linek stalowych stalowymi siatkami, włóknami grafitowymi oraz posiada specjalne wkładki kompozytowe zwiększające sztywność poprzeczną gąsienicy (rys. 11). Napęd przenoszony jest przez dwa rzędy specjalnie wzmocnionych występów na skraju gąsienicy, a właściwe prowadzenie kierunkowe zapewniają również specjalnie wzmocnione występy centralne. W efekcie koła jezdne są relatywnie wąskie, co nie pozwala na dobry rozkład poprzeczny nacisków i sprzyja szybkiej degradacji gąsienicy.



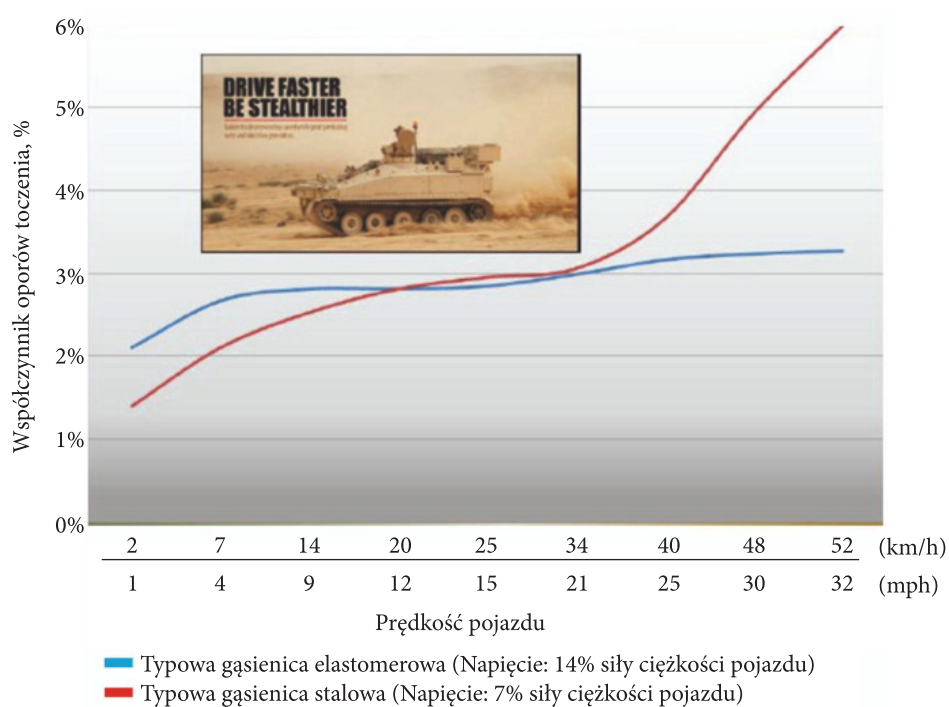
Rys. 10. Szybkobieżny system gąsienicy elastomerowej firmy Soucy [33]

Badania eksperymentalne [33] wykazały, że gąsienice elastomerowe umożliwiają rozwijanie prędkości maksymalnych rzędu 100 km/h — porównywalnych do prędkości maksymalnych transporterów kołowych, jednak z uwagi na cechy konstrukcyjne pojazdów oczekuje się rozwijania prędkości maksymalnych na poziomie 70 km/h [34].

Ponadto stwierdzono, że elastyczna struktura pasów gąsienicowych współpracująca z kołami jezdnyimi pokrytymi gumowymi bandażami pozwala na płynniejszą jazdę, tłumiąc i redukując drgania i wibracje pojazdu oraz negatywne oddziaływania na jego załogę. Zarejestrowano 70-procentową redukcję wibracji [33]. Dodatkowym efektem uelastycznienia struktury gąsienicy było ograniczenie emitowanego hałasu o ponad 13 dB [31, 32, 35].



Rys. 11. Budowa szybkobieżnego pasa gąsienicowego firmy Soucy [34]



Rys. 12. Porównanie współczynników oporów toczenia gąsienic metalowych i elastomerowych [31]

Testy porównawcze stalowych i elastomerowych systemów gąsienicowych dla czołgu Leopard 1 C2 o masie 42 Mg wykazały, że pasy elastomerowe są o 47% lżejsze od stalowych. Dzięki zmniejszeniu masy gąsienic o ponad 1600 kg znacznie poprawiły się zdolności pojazdów do przyspieszania [31].

Zaobserwowano również korzystny wpływ systemów elastomerowych na opory toczenia pojazdu (rys. 12). Opory znacząco maleją, zwłaszcza podczas przejazdów z prędkościami powyżej 40 km/h. W efekcie podczas testów zaobserwowano zmniejszenie zużycia paliwa o 20-33%, a tym samym istotne zwiększenie zasięgu operacyjnego [31].

W badaniu [36] oszacowano trwałość gąsienic elastomerowych zastosowanych w pojeździe o masie ok. 60 Mg, wykonującym pracę z prędkością 20 km/h po osiem godzin dziennie, na 750 dni. Z kolei trwałość eksperymentalnej gąsienicy firmy Soucy o szerokości 580 mm po zamontowaniu na 42-tonowym czołgu Leopard 1 wyniosła 6600 km [31]. Firma deklaruje, że trwałość jej seryjnie produkowanych gąsienic kształtuje się na poziomie 4-8 tys. km [31] i jest porównywalna do gąsienic stalowych. Należy zauważyć, że jest jednak znacznie mniejsza od trwałości gąsienic stosowanych w aplikacjach cywilnych — zakładając prędkość jazdy na poziomie 25 km/h, wynosi zaledwie 160-320 h. Jest konsekwencją przyjętego kształtowego systemu napędu, dużych obciążeń wynikających z masy pojazdu oraz dużej długości gąsienicy na gruncie. Intensywne manewrowanie oraz hamowania mogą istotnie zmniejszyć żywotność gąsienicy. Ponadto podczas badań stwierdzono, że nadal występuje problem z przegrzewaniem się gąsienic oraz że można zauważyć wysoki stopień zużycia już po przejechaniu 70-80 km [37, 38].

4. Podsumowanie

Przeprowadzone analizy wykazały, że stosowane w maszynach i pojazdach elastomerowe systemy gąsienicowe różnią się zasadniczo pod względem zdolności przenoszenia obciążeń oraz rozwijania wysokich prędkości przejazdowych. Rozwiązania cywilne projektowane są z myślą o zapewnieniu odpowiednich zdolności roboczych. Najczęściej głównym wyznacznikiem ich przydatności są niskie naciski jednostkowe maszyny na podłoże oraz zdolności do zapewnienia odpowiednio wysokiej siły uciągu. Z tego względu w układach gąsienicowych szeroko stosowane są wózki jezdne. Ma to na celu dokładniejsze odwzorowanie nierówności terenowych i zapewnienie jak największej powierzchni przylegania gąsienicy do podłoża. W niektórych aplikacjach, wymagających rozwijania wyższych prędkości przejazdowych, systemy gąsienicowe wyposażane są w elementy podatne, takie jak poduszki powietrzne oraz zawieszania hydropneumatyczne. W celu zwiększenia dopuszczalnej masy maszyny oraz trwałości gąsienic stosowane są konstrukcje

czterogąsienicowe z przegubowym układem skrętu. Pozwala to na skrócenie długości gąsienicy na gruncie, a w efekcie zmniejszenie oporów skrętu i zużycia gąsienicy podczas manewrowania oraz dzięki rozproszeniu napędu (zastosowanie czterech kół napędowych) zmniejszenie obciążeń poszczególnych pasów gąsienicowych.

Dla zwiększenia trwałości gąsienic szczególnie ważne zagadnienie to koncentracja naprężeń w pasie gąsienicowym podczas przenoszenia napędu. Jest to poważny problem w systemach o kształtowym przeniesieniu napędu. Pod tym względem korzystniejszym rozwiązaniem jest przenoszenie napędu metodą tarciovą. Wymaga jednak zastosowania rozbudowanego systemu napinania gąsienicy.

Elastomerowe systemy gąsienicowe pojazdów opancerzonych projektowane są głównie jako zamienniki dla gąsienic metalowych, dopuszcza się przy tym wymianę kół jezdnych oraz kół napinających i napędowych. Wyniki testów pojazdów wojskowych wyposażonych w gąsienice elastomerowe pokazują obiecującą poprawę właściwości związanych z redukcją drgań i hałasu podczas jazdy. Dodatkowo wykorzystanie gąsienic elastomerowych zmniejsza masę pojazdu oraz opory jazdy z wyższymi prędkościami. Gąsienice elastomerowe umożliwiają przemieszczanie pojazdów zarówno po utwardzonej, jak i nieutwardzonej powierzchni bez konieczności wykorzystywania nakładek na płyty gąsienic. Ich trwałość z punktu widzenia zastosowania w maszynach inżynierskich jest jednak niezadowalająca. W wyniku intensywnego manewrowania oraz rozwijania dużych sił uciągu będą ulegały bardzo szybkiemu zużyciu (w porównaniu do gąsienic w maszynach cywilnych), a dodatkowo w efekcie zastosowania burtowego układu skrętu i wysokich naprężeń w strefie kształtowego przekazywania napędu może dochodzić do uszkodzeń pasa gąsienicowego. Z tych względów wskazane jest zastosowanie przegubowej konstrukcji maszyn inżynierskich, o czterech gąsienicach, niewielkiej długości na podłożu, wyposażonych w półelastyczne zawieszania, a także ciernego systemu przeniesienia napędu. Umożliwi to konstrukcję maszyn o relatywnie dużej masie oraz uzyskanie większej trwałości i niezawodności układu jezdnego, mimo intensywnego manewrowania, rozwijania wysokich sił uciągu oraz okresowego rozwijania wyższych prędkości przejazdowych.

Źródło finansowania pracy — działalność statutowa Wojskowej Akademii Technicznej.

Artykuł wpłynął do redakcji 16.08.2021. Zatwierdzono do publikacji 12.12.2021.

Daniela Szpaczyńska <https://orcid.org/0000-0003-3273-6154>

Marian Łopatka <https://orcid.org/0000-0003-3449-4611>

LITERATURA

- [1] Strona firmy DRB, Rubber track, <http://www.drbworl.com/en/business/rubber-track-and-undercarriage-system/rubber-track.php>, [dostęp 10.12.2021].
- [2] DUDZIŃSKI P., CHOŁODOWSKI J., *Energy efficiency of rubber tracked chassis*, Journal of KONES, 23, 2, 2016, 97-104.
- [3] DUDZIŃSKI P., CHOŁODOWSKI J., *Method for predicting the internal motion resistance of rubber-tracked undercarriages, Pt. 1. A review of the state-of-the-art methods for modeling the internal resistance of tracked vehicles*, Journal of Terramechanics, 96, 2021, 81-100.
- [4] CHOŁODOWSKI J., DUDZIŃSKI P., *A Method for Experimental Identification of Bending Resistance of Reinforced Rubber Belts*, AIP Conference Proceedings 2078, 2019.
- [5] LESCOHIER J., *It's gotta be the shoes*, For Constructions Pros, 4.10.2017, <https://www.forconstructionpros.com/equipment/earthmoving-compact/track-loaders/article/20977431/how-to-select-the-right-tracks-for-your-track-loaders>, [dostęp 10.12.2021].
- [6] ASV POSI-track sets the benchmark for CTLs, Earthmoving Equipment Magazine, 13.03.2020, <https://www.earthmovers-magazine.com.au/asv-posi-track-sets-the-benchmark-for-ctls/>, [dostęp 10.12.2021].
- [7] MCCONNELL A., *Comso debuts new CTS and quality affordable track design*, Successful Farming, 17.02.2017, <https://www.agriculture.com/machinery/tractors/camso-debuts-new-cts-and-quality-affordable-track-design>, [dostęp 10.12.2021].
- [8] *Agricultural track and wheels lineup for John Deere*, Camso 1708 AG, Brochure Track Wheel JD 8,5x8,5 EN, Canada 2018.
- [9] Strona firmy Bridgestone, *Introduction to agricultural tracks*, <http://www.bridgestoneindustrial.eu/products/ag-tracks/>, [dostęp 10.12.2021].
- [10] Strona firmy Continental, *Drive lug reinforcement*, <https://www.continental-industry.com/en/solutions/undercarriage/rubber-tracks/products/product-range/drive-lug-reinforcement>, [dostęp 10.12.2021].
- [11] HILL PETER, *This temperature sensor helps extend rubber track life*, Future Farming, 24.11.2017, <https://www.futurefarming.com/Machinery/Articles/2017/11/This-temperature-sensor-helps-extend-rubber-track-life-4134WP/>, [dostęp 10.12.2021].
- [12] STORLIE B., *Tips to Extend the Life of Compact Track Loaders' Rubber Tracks*, For Construction Pros, 25.04.2017, <https://www.forconstructionpros.com/equipment/fleet-maintenance/undercarriage/article/20859383/tips-to-extend-the-life-of-compact-track-loaders-rubber-tracks>, [dostęp 10.12.2021].
- [13] Military Vehicles and Equipment for Sale, Caterpillar Deuce Dozer, <https://www.modsurplus.co.uk/index.php/export-licensing/siel-stock/article/40143-caterpillar-deuce-dozer>, [dostęp 10.12.2021].
- [14] *Service Guide, Agricultural Track, Caterpillar Challenger 65, 70, 75, 85, 95 (Cat Legacy Tillage)*, CPB-317, Camso 2018.
- [15] *Le chenilles, une solution gagnante pour les engins de récolte et les sols*, Le Sillon Beige, 27.08.2020, <https://www.sillonbelge.be/6426/article/2020-08-27/les-chenilles-une-solution-gagnante-pour-les-engins-de-recolte-et-les-sols>, [dostęp 10.12.2021].
- [16] TUSCHNER J., *Friction vs. Positive Drive Ag Track Systems*, Farm Equipment, 23.10.2020, <https://www.farm-equipment.com/articles/18856-friction-vs-positive-drive-ag-track-systems>, [dostęp 10.12.2021].

- [17] HAGEN A., *Claas Gen III TT System – the track story of Class*, Claas Industrietechnik GmbH, Kansas City, Jan 2013.
- [18] KELLER T., SANDIN M., COLOMBI T., HORN R., OR D., *Historical increase in agricultural machinery weights enhanced soil stress levels and adversely affected soil functioning*, Soil and Tillage Research, 194, 2019.
- [19] MCPHEE J.E., ANTILLE D.L., TULLBERG J.N., DOYLE R.B., BOERSMA M., *Managing soil compaction. A choice of low-mass autonomous vehicles or controlled traffic?*, Biosystems Engineering, 195, 2020, 227-241.
- [20] THORSØE M.H., NOE E.B., LAMANDÉ M., FRELH-LARSEN A., KJELDSSEN C., ZANDERSEN M., SCHJØNNING P., *Sustainable soil management – Farmers’ perspectives on subsoil compaction and the opportunities and barriers for intervention*, Land Use Policy, 86, 2019, 427-437.
- [21] BŁASZKIEWICZ Z., *Identification and quantification of selected factors determining soil compression by tractors of weights with single wheels and dual wheels*, Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering, 64, 1, 2019, 4-12.
- [22] MARSILI A., SERVADIO P., *Compaction effects of rubber or metal-tracked tractor passes on agricultural soils*, Soil and Tillage Research, 37, 1, 1996, 37-45.
- [23] ARVIDSSON J., WESTLIN H., KELLER T., GILBERTSSON M., *Rubber track systems for conventional tractors – Effects on soil compaction and traction*, Soil and Tillage Research, 117, 2011, 103-109.
- [24] ANSORGE D., *Soil Reaction to Heavily Loaded Rubber tracks and Tyres*, Doctoral thesis, Cranfield University 2007.
- [25] RASOOL S., RAHEMAN H., *Improving the tractive performance of walking tractors using rubber tracks*, Biosystems Engineering, 167, 2018, 51-62.
- [26] GRISSO R., PERUMPRAL J., ZOZ F., *An empirical model for tractive performance of rubber-tracks in agricultural soils*, Journal of Terramechanics, 43, 2, 2006, 225-236.
- [27] MOLARI G., BELLENTANI L., GUARNIERI A., WALKER M., SEDONI E., *Performance of an agricultural tractor fitted with rubber tracks*, Biosystems Engineering, 111, 1, 2012, 57-63, 1537-5110.
- [28] MOLARI G., MATTETTI M., WALKER M., *Field performance of an agricultural tractor fitted with rubber tracks on a low trafficable soil*, Journal of Agricultural Engineering, 46, 477, 2015, 162-166.
- [29] DONG Z., QUAN L., YANG J., *Tracked walking mechanism for large hydraulic excavators*, Automation in Construction, 96, 2018, 88-102.
- [30] PALAZZO A.J., AYERS P.D., FEHMI J.S., SHOOP S., SULLIVAN P., *Assessing the impacts of military vehicle traffic on natural areas. Introduction to the special issue and review of the relevant military vehicle impact literature*, Journal of Terramechanics, 42, 3-4, 2005, 143-158.
- [31] HÅLAND W.C., *Power on Rubber Tracks*, Truppendienst, 2018, www.truppendienst.com/themen/beitraege/artikel/power-on-rubber-tracks, [dostęp 10.12.2021].
- [32] KANE J.R., AYERS P., HOWARD H., ANDERSON A., KOCH D., *Multipass coefficients for terrain impacts based on military vehicle type, size and dynamic operating properties*, Journal of Terramechanics 50, 3, 2013, 175-183.
- [33] *Composite rubber track technology for defense and security*, Soucy Composite Rubber Track Systems, Rev. 05, September 2018, Canada.
- [34] Soucy Defense, <https://www.army-technology.com/contractors/hydraulics/soucy-defense/>, [dostęp 10.12.2021].
- [35] MARCOTTE T., *Soucy Composite Rubber Track Technology*, 2016 NDIA ground vehicle systems engineering and technology symposium. Power and mobility technical session, 2-4 August 2016, Novi, Michigan.

- [36] LIU W., CHENG K., WANG J., *Failure analysis of the rubber track of a tracked transporter*, Advances in Mechanical Engineering, 10, 7, 2018, 1-8.
- [37] MORENO A., *Abbreviated Test Report for the Technical Feasibility Test of the Demonstration of the Future Combat Vehicle System 15-Inch M1113A3 "Heavy" Band Track*, Yuma Country, Ariz.: Yuma Proving Ground, 2004.
- [38] MATSUMURA J., GORDON J., STEEB R., BOSTON S., LEE C., PADILLA P., PARMENTOLA J., *Assessing Tracked and Wheeled Vehicles for Australian Mounted Close Combat Operations Lessons Learned in Recent Conflicts, Impact of Advanced Technologies, and System-Level Implications*, RAND Corporation, Santa Monica, Calif., 2017.

D. SZPACZYŃSKA, M. ŁOPATKA

Analysis of the possibility of using rubber track systems in high-speed engineering machines. Part I. Review of design solutions

Abstract. The article presents an analysis of the design solutions of the running gear with rubber tracks in terms of their applicability in high-speed engineering machines that require intensive maneuvering and the ability to develop high tractive forces. Both solutions used in civil applications and the results of research on the use of rubber tracks in heavy armoured vehicles were analysed. On their basis, recommendations were formulated for the design of high-speed engineering machines and the rubber track systems used in them.

Keywords: mechanical engineering, rubber tracks, running gear, high-speed engineering machines

DOI: 10.5604.01.3001.0015.6960