

KRZYSZTOF FILIPOWICZ
MARIUSZ KUCZAJ
PAWEŁ GRUSZKA

Doświadczalna ocena zabezpieczeń mechanicznych stosowanych w podatnych skrętnie sprzęgłach Raptor-SK

Sprzęgła serii Dodge®Raptor należą do sprzęgieł nierozłącznych, mechanicznych, podatnych skrętnie o możliwości kompensacji odchyłek współosiowości. W sprzęgłach o oznaczeniu Raptor-SK zastosowano dodatkowo kołki ścinane, zabezpieczające układ napędowy przed przeciążeniem. Zastosowanie „bezpieczników” w sprzęgle w postaci kołków ścinanych ogranicza wartość przenoszonego momentu obrotowego do wartości ustalonej (bezpiecznej), po której przekroczeniu następuje ich ścięcie, a w konsekwencji rozłączenie napędu. W odniesieniu do sprzęgła Raptor-SK przeprowadzono obliczenia mające na celu dobór średnicy kołków ścinanych w zależności od wartości momentu granicznego M_{gr} . W celu oceny poprawności doboru kołków użytych w mechanizmie sprzęgła przeprowadzono badania doświadczalne z użyciem maszyny wytrzymałościowej. Dokonano porównania wykonanych obliczeń konstruktorskich kołków ścinanych z wynikami badań na stanowisku badawczym.

Słowa kluczowe: sprzęgło bezpieczeństwa, dobór kołków ścinanych, badania wytrzymałościowe kołków

1. WPROWADZENIE

Sprzęgła mają zastosowanie praktycznie w każdym układzie napędowym maszyny. W wielu przypadkach nowoczesnych konstrukcji spełniają one funkcję nie tylko łącznika wałów, przez który przekazywany jest moment obrotowy na kolejne podzespoły układu napędowego, lecz muszą one również spełniać funkcje dodatkowe. Tymi funkcjami mogą być na przykład redukcja mimośrodowości ustawienia łączonych wałów (sprzęgła samonastawne), złagodzenie obciążeń dynamicznych (sprzęgła podatne), rozłączanie wałów podczas ich pracy (sprzęgła sterowane, samoczynne, odśrodkowe), przenoszenie momentu obrotowego tylko w jednym kierunku (sprzęgło jednokierunkowe) i wiele innych.

Układy napędowe maszyn narażone są często na wystąpienie przeciążeń i stanów pracy nieustalonej (np. rozruchów, zablokowań). W celu ochrony jego zespołów stosuje się sprzęgła bezpieczeństwa nazywane również przeciążeniowymi. Działanie tych sprzęgieł opiera się przede wszystkim na dwóch rozwiąza-

niach [1]. W pierwszym dochodzi do całkowitego rozłączenia członów sprzęgła pod wpływem granicznej, założonej wartości momentu obrotowego. Ulega wtedy zniszczeniu odpowiednio dobrany łącznik (najczęściej w postaci kołka), który jest najsłabszym elementem nośnym w sprzęgle, a tym samym w całym układzie napędowym. Drugim rozwiązaniem jest zastosowanie sprzęgła z mechanizmem ograniczenia wartości przenoszonego momentu do wartości bezpiecznej. Do tej grupy sprzęgieł należą np. sprzęgła z łącznikiem ciernym, gdzie podczas przeciążenia dochodzi do względnego poślizgu na wykładzinach ciernych pomiędzy członem czynnym i biernym sprzęgła (np. sprzęgła SafeSet firmy Voith [2]).

Rozpatrywane sprzęgło Raptor-SK ze ścinanymi kołkami łączy w sobie cechy sprzęgła podatnego skrętnie oraz sprzęgła bezpieczeństwa.

W ochronie przez sprzęgło elementów układu napędowego maszyny przed przeciążeniami najbardziej istotne jest, aby rozłączenie napędu odbyło się przy ściśle określonej wartości momentu obrotowego z możliwie dużą dokładnością jej zachowania.

2. BUDOWA SPRZĘGŁA RAPTOR-SK

Sprzęgła serii Dodge®Raptor należą do sprzęgieł nierozłącznych, mechanicznych, podatnych skrętnie o możliwości kompensacji odchyłek współosiowości (rys. 1).

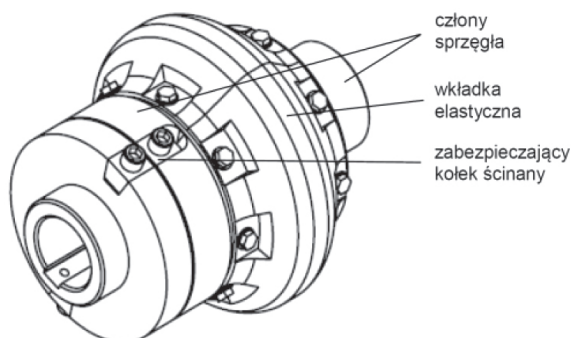


Rys. 1. Widok ogólny sprzęgła serii Dodge®Raptor [3]

Sprzęgło Raptor charakteryzuje się przede wszystkim oryginalną konstrukcją wkładki elastycznej wykonanej z kauczuku naturalnego. Zastosowana opatentowana technologia o nazwie WingLock [4] optymalizująca konstrukcję wkładki elastycznej, według producenta, zapewnia dużą wytrzymałość doraźną i zmęczeniową oraz długą żywotność w porównaniu z innymi konstrukcjami tego typu sprzęgieł.

Sprzęgła Dodge®Raptor produkowane są w wielu wariantach, np. sprzęgło może być zespolone z tarczą lub z bębniem hamulcowym, wyposażone w ogranicznik kąta skręcenia pomiędzy członami sprzęgła.

Przedmiotowe sprzęgło o oznaczeniu Raptor-SK (rys. 2) zostało wyposażone w dodatkowy człon, w którym montowane są „bezpieczniki” w postaci kołków (lub kołka) podlegających ścinaniu przy określonej wartości przenoszonych momentu obrotowego. W niniejszym opracowaniu skupiono się na realizowanej przez sprzęgło funkcji zabezpieczenia układu napędowego przed przeciążeniem.



Rys. 2. Sprzęgło podatne RAPTOR-SK z zabezpieczającymi kołkami ścinanymi

3. DOBÓR KOŁKÓW ZABEZPIEZAJĄCYCH ZASTOSOWANYCH W SPRZĘGLE RAPTOR-SK

Projektując układ napędowy maszyny, konstruktor najczęściej dobiera sprzęgło z katalogów producentów, czasem musi ono być specjalnie zaprojektowane dla danej maszyny [5]. Sprzęgło dobiera się, obliczając moment obrotowy M_o z uwzględnieniem momentu nominalnego M_n , jaki przenoszony jest przez łączone wały oraz wartości przeciążenia określonego współczynnikiem k :

$$M_o = M_n \cdot k \quad (1)$$

gdzie:

- M_o – moment obrotowy [Nm],
- M_n – moment nominalny [Nm],
- k – współczynnik przeciążenia.

W sprzęgłach pełniących funkcję zabezpieczenia układu napędowego przed przeciążeniem dodatkowo należy wyznaczyć wartości obliczeniowego momentu granicznego M_{gro} powodującego ścięcie kołka (lub kołków w zależności od ich liczby). Moment graniczny, przy którym ma nastąpić rozłączenie członów sprzęgła, ustala producent sprzęgła z projektantem układu napędowego maszyny.

Znając wartości obliczeniowego momentu granicznego M_{gro} , do obliczenia średnicy kołka d_o stosuje się wzór:

$$d_o = 1,6 \sqrt{\frac{M_{gro}}{D_p n R_t}} \quad (2)$$

gdzie:

- d_o – średnica kołka [m],
- D_p – średnica podziałowa rozmieszczenia kołka (kołków) [m],
- n – liczba kołków,
- R_t – wytrzymałość na ścinanie dla materiału kołka [MPa].

Dla sprzęgła Raptor-SK o oznaczeniu/rozmiarze E80, dla którego średnica podziałowa rozmieszczenia kołków wynosi $D_p = 241$ mm, przeprowadzono obliczenia mające na celu dobór średnicy kołka ścinanego w zależności od wartości obliczeniowego momentu granicznego M_{gro} . Obliczenia przeprowadzono przy obliczeniowych momentach granicznych M_{gro} wynoszących 3800, 15 000 oraz 34 000 Nm dla kołków zabezpieczających wykonanych ze stali do ulepszenia cieplnego i hartowania po obróbce cieplnej o wytrzymałości na ścinanie $R_t = 800$ MPa. Przedmiotowe obliczenia zostały przeprowadzone dla sprzęgła z jednym kołkiem. W tabeli 1 przedstawiono wyniki obliczeń.

Tabela 1

Wyniki obliczeń kołków zabezpieczających

Wartość obliczeniowego momentu granicznego M_{gro} [Nm]	Średnica obliczeniowa kołka d_o [mm]
3800	5
15 000	10
34 000	15

Dla założonych wartości momentu granicznego M_{gro} i przyjętych danych wytrzymałościowych zastosowanej stali, obliczone średnice do kołków wynoszą odpowiednio: 5 mm, 10 mm oraz 15 mm.

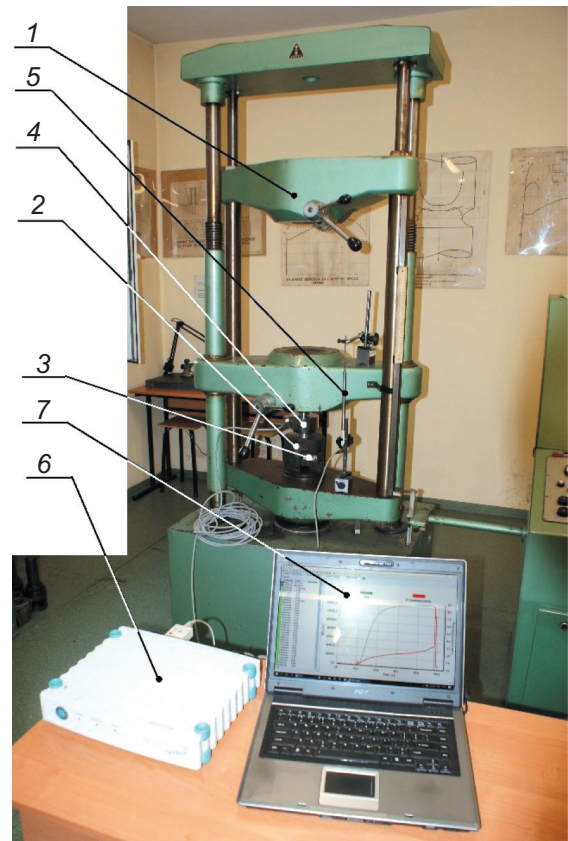
Po wykonaniu obliczeń wytrzymałościowych określających średnicę obliczeniową d_o przeprowadzono doświadczalną weryfikację uzyskanych wyników dla kołków o ww. średnicach.

4. BADANIA DOŚWIADCZALNE KOŁKÓW ZABEZPIEZAJĄCYCH ZASTOSOWANYCH W SPRZĘGLE RAPTOR-SK

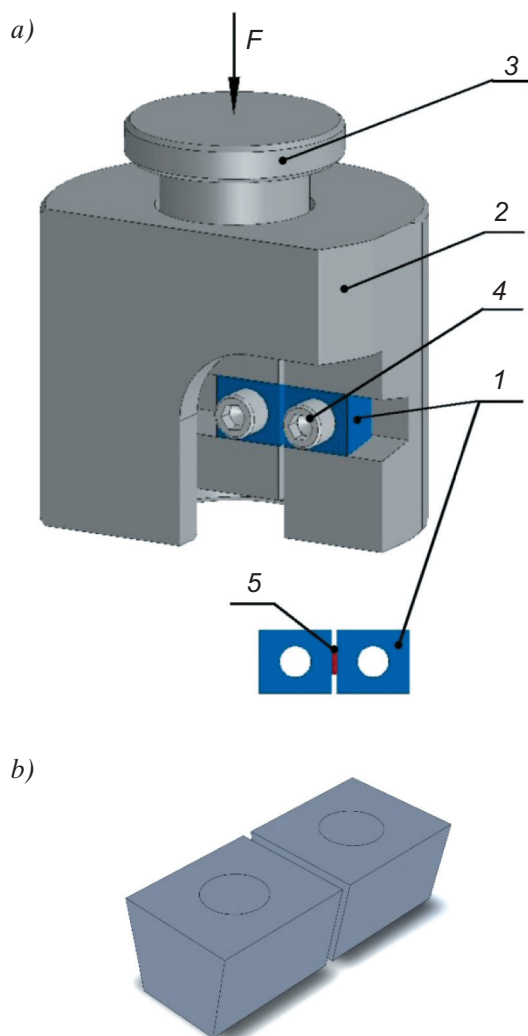
Zastosowanie „bezpieczników” – kołków ścinanych w sprzęgle ogranicza wartość przenoszonego momentu obrotowego do wartości bezpiecznej, po której przekroczeniu następuje ich ścięcie, a w konsekwencji rozłączenie napędu. W celu doświadczalnej weryfikacji przeprowadzonych obliczeń konstrukcyjnych wykonano badania wytrzymałości kołków na ścinanie na stanowisku badawczym (rys. 3).

Bazowym elementem stanowiska badawczego jest maszyna wytrzymałościowa (1), na której zamocowany został specjalizowany przyrząd ustalająco-ścinający (2) (rys. 4). W przyrządzie mocowany zabezpieczający kołek ścinany (3). Podczas badań za pomocą czujnika siły (4) mierzona była wartość siły F , którą wywiera maszyna wytrzymałościowa na przyrząd (2) (wartość graniczna tej siły odpowiada sile ścinającej F_t kołek) oraz za pomocą czujnika (5), wartość przemieszczenia roboczego l maszyny wytrzymałościowej. Sygnały pomiarowe przesyłane są do cyfrowego modułu pomiarowego A/C (6), który kondycjonuje, mierzy i archiwizuje oba sygnały pomiarowe z wizualizacją na ekranie komputera (7). Zadawane podczas badań obciążenie F miało charakter statyczny i zwiększane było ze stałą, ustaloną sprzętowo prędkością.

W celu zamodelowania procesu „czystego” ścinania kołka oraz jego jednoznaczego ustalenia i mocowania na stanowisku zaprojektowano i wykonano specjalizowany, oryginalny przyrząd ustalająco-ścinający (rys. 4).



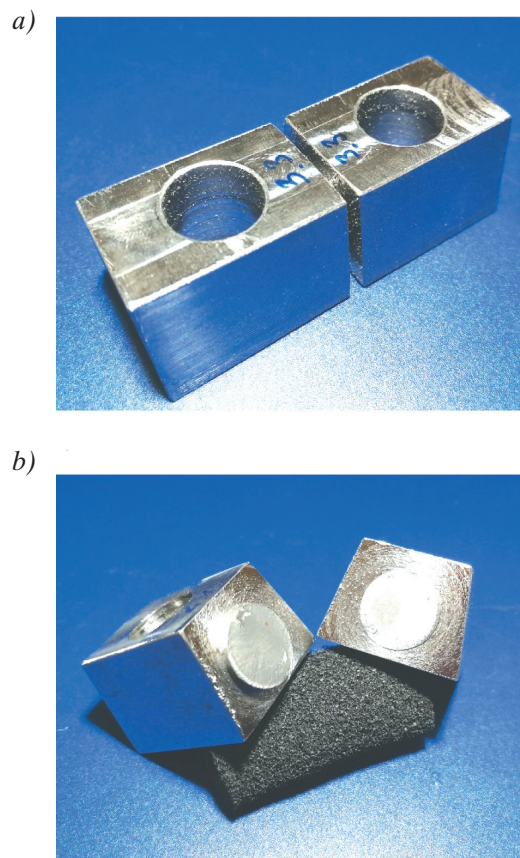
Rys. 3. Widok stanowiska badawczego do badania kołków zabezpieczających, gdzie: 1 – maszyna wytrzymałościowa, 2 – przyrząd ustalająco-ścinający, 3 – kołek zabezpieczający ścinany, 4 – czujnik siły, 5 – czujnik przemieszczenia, 6 – cyfrowy moduł pomiarowy A/C, 7 – komputer



Rys. 4. Przyrząd ustalająco-ścinający wykorzystany do ścinania kołków zabezpieczających: a) widok przyrządu; b) widok ścinanego kołka zabezpieczającego, gdzie: 1 – kołek ścinany, 2 – podstawa przyrządu (nieruchoma obudowa), 3 – tłok przesuwany, 4 – śruby mocujące, 5 – część ścinana kołka, F – siła obciążająca przyrząd

Przyrząd składa się z nieruchomej obudowy (podstawy) (2), do której śrubą (4), mocowany jest jedną stroną kołek (1) oraz przesuwanego tłoka (3), do którego mocuje się drugą stroną kołka. Podczas badań zwiększające się obciążenie F tłoka (3) do wartości granicznej F_p powoduje przesuw tłoka, a w konsekwencji ścienie badanego kołka. Przebieg zmian wartości siły F i przesunięcia l jest mierzony i rejestrowany za pomocą aparatury pomiarowej.

Badania przeprowadzono dla kołków wykonanych ze stali do ulepszenia cieplnego i hartowania (rys. 4), o średnicy d wynoszącej 5 mm, 10 mm oraz 15 mm. Kołki były hartowane na wskroś. Na rysunku 5a przedstawiono widok kołka zabezpieczającego przed wykonaniem badania, a na rysunku 5b – po jego ścieniu.



Rys. 5. Widok ścinanego kołka zabezpieczającego: a) przed wykonaniem badania; b) po ścieniu kołka

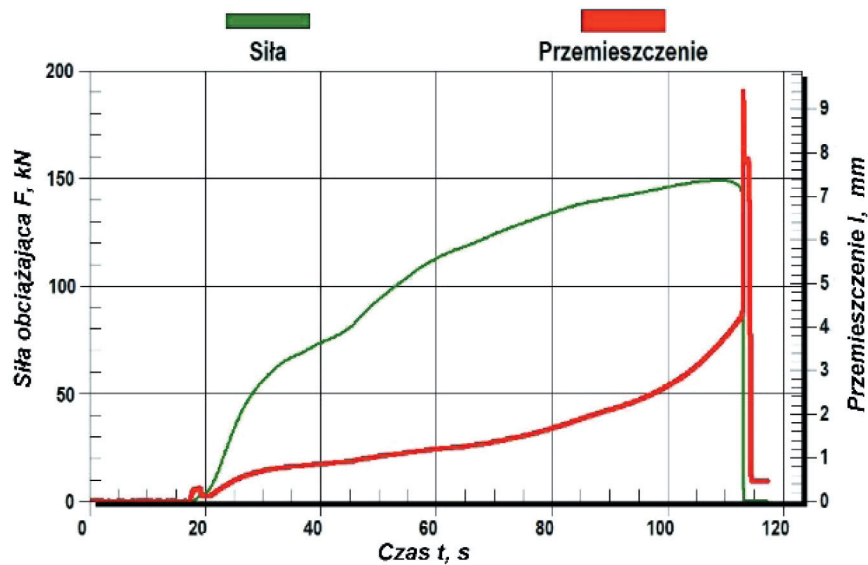
W tabeli 2 przedstawiono wartości siły ścinającej F_p , przy której kołek o określonej średnicy d ulegał ścieniu, oraz wartość odpowiadającego jej momentu granicznego M_{gr} dla sprzęgła E80. Na rysunku 6 przedstawiono przykładowy wynik rejestracji pomiaru kołka o oznaczeniu p7, za pomocą cyfrowego modułu pomiarowego.

Tabela 2

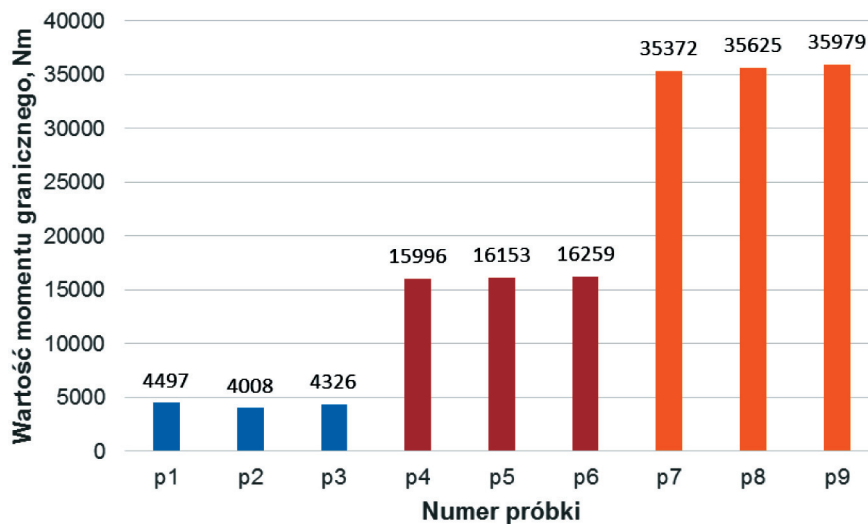
Zestawienie wyników z badań doświadczalnych ścinania kołków zabezpieczających

Oznaczenie kołka	Średnica d [mm]	Wartość średnia siły ścinającej F_t [N]	Wartość średnia momentu granicznego M_{gr} [Nm]
p1–p3	5	17 750	4277
p4–p6	10	66 954	16 136
p7–p9	15	147 962	35 659

Na rysunku 7 przedstawiono w postaci wykresu słupkowego wartości momentu granicznego M_{gr} uzyskane z przeliczenia siły ścinającej F_t kołek oraz średnicy podziałowej D_p (pewne uproszczenie).



Rys. 6. Przykładowy wynik pomiaru wielkości mierzonych dla kołka o oznaczeniu p7



Rys. 7. Wartości momentu granicznego dla badanych kołków, gdzie: p1–p3 kołki o średnicy 5 mm, p4–p6 kołki o średnicy 10 mm, p7–p9 kołki o średnicy 15 mm

Dla kołków o średnicy 5 mm największa wartość momentu obrotowego $M_{gr\max}$, przy której nastąpiło rozłączenie sprzęgła, wynosiła 4497 Nm. Z kolei najmniejsza wartość momentu $M_{gr\min}$ wynosiła 4008 Nm. Wobec powyższego współczynnik γ_5 , określający dokładność ograniczenia obciążenia dla rozważanego sprzęgła oblicza się ze wzoru [1].

$$\gamma_5 = \frac{M_{gr\max}}{M_{gr\min}} = \frac{4497}{4008} = 1,12 \quad (3)$$

Podobnie wyznaczono wartość współczynnika γ_5 dla pozostałych średnic kołków zabezpieczających. Obliczone wartości współczynnika γ_5 przedstawiono w tabeli 3.

Tabela 3
Wartości współczynnika γ_5 określającego dokładność ograniczenia momentu obciążenia sprzęgła

Średnica kołka d [mm]	5	10	15
Wartość współczynnika γ_5	1,12	1,02	1,02

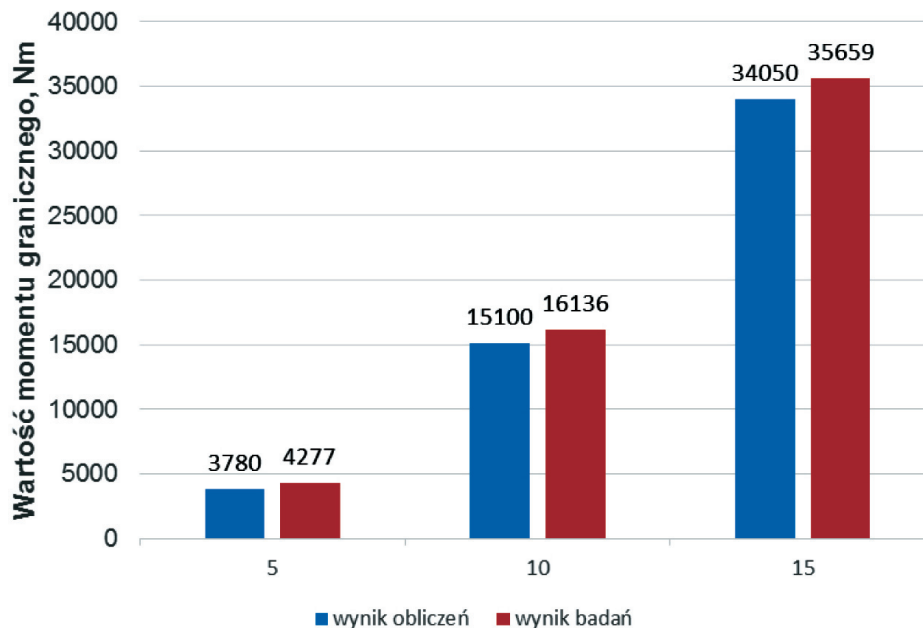
Dla sprzęgieł ze ścinanymi kołkami według [1] wartość współczynnika dokładności wyłączenia sprzęgła powinna zawierać się w granicach od 1,1–1,4. Wobec powyższego na podstawie wyników badań można stwierdzić, że wszystkie kołki zabezpieczające zostały wykonane prawidłowo zarówno pod względem

obróbki mechanicznej, jak i obróbki cieplnej, a kołki o średnicy 10 mm i 15 mm spełniają z nadstatkiem kryterium według [1].

Na rysunku 8 przedstawiono porównanie obliczonych wartości momentu granicznego M_{gro} z uśrednionymi wartościami momentu granicznego M_{gr} (według tab. 2) uzyskanymi z badań.

Jak można zauważyć, wartości przeliczonego momentu granicznego M_{gr} uzyskane na podstawie badań doświadczalnych (ścięcia kołków) są większe od war-

tości momentu granicznego M_{gro} uzyskanych z obliczeń. Dla kołków o średnicy 5 mm różnica wyniosła około 12%, dla kołków o średnicy 10 mm 7%, natomiast dla kołków 15 mm – 5%. Różnica w wartościach momentu granicznego pomiędzy wynikami uzyskanymi z obliczeń a wynikami z badań doświadczalnych może wynikać np. z przyjętej do obliczeń wartości naprężenia dopuszczalnego na ścinanie k_t oraz współczynnika proporcjonalności k_o w obliczeniach wytrzymałościowych.



Rys. 8. Porównanie wartości obliczonego momentu granicznego z wartością średnią dla badanych próbek

5. PODSUMOWANIE

Najprostszym zabezpieczeniem elementów układu napędowego przed przeciążeniem są sprzęgła bezpieczeństwa z łącznikami ulegającymi zniszczeniu. W przypadku sprzęgła Raptor-SK łączniki mają kształt cylindrycznego kołka z dwoma powierzchniami montażowymi.

Wykonane w pracy obliczenia średnic kołków ścinanych dla określonych wartości momentów granicznych oraz przeprowadzone badania doświadczalne dla ich trzech średnic wykazały, że:

- występuje różnica w wartości momentu granicznego M_{gr} pomiędzy wartościami obliczonymi (M_{gro}) a uzyskanymi z badań (M_{gr}) (rys. 8),
- większe wartości momentu granicznego M_{gr} występują dla wyników uzyskanych z badań doświadczalnych (rys. 8),

- na podstawie badań doświadczalnych dla każdej ze średnic kołków uzyskano zbliżone wartości momentu granicznego M_{gr} (rys. 7); wskaźnik określający dokładność ograniczenia obciążenia γ_5 wyniósł maksymalnie 1,12 dla badanej średnicy 5 mm (tab. 3).

Z dokonanej w pracy analizy można stwierdzić, że dla obliczonych średnic kołków ścinanych po przeprowadzeniu badań doświadczalnych uzyskano większe wartości momentu granicznego, niż założono w obliczeniach teoretycznych. Różnica jest tym większa, im mniejsza jest średnica kołka zabezpieczającego. Ostatecznie spowoduje to, że zadziałanie zabezpieczenia sprzęgła wystąpi przy większej wartości momentu granicznego niż spodziewany, wynikający z obliczeń.

Podsumowując całość analiz przeprowadzonych w pracy, można stwierdzić, że szczególnie w przypadku zastosowania tych sprzęgieł (z kołkami zabezpieczającymi) w maszynach mających duże znaczenie

eksploatacyjne należy rozważyć dobór średnicy kołków zabezpieczających oparty nie tylko na obliczeniach teoretycznych, a również przeprowadzić badania sprawdzające.

Literatura

- [1] Dietrich M. (red.): *Podstawy konstrukcji maszyn*, t. 3, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1999.
- [2] <https://voith.com/corp-en/torque-limiting-couplings.html> [20.05.2018].
- [3] www.fena.pl [20.05.2018].
- [4] <https://www.baldor.com/brands/baldordodge/products/couplings-clutches-brakes/elastomeric-couplings/raptor> [20.05.2018].
- [5] Skoć A., Spalek J., Markusik S.: *Podstawy konstrukcji maszyn*, t. 2, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 2008.

dr hab. inż. KRZYSZTOF FILIPOWICZ
dr inż. MARIUSZ KUCZAJ
Katedra Mechanizacji i Robotyzacji Górnictwa
Wydział Górnictwa i Geologii
Politechnika Śląska
ul. Akademicka 2a, 44-100 Gliwice
{krzysztof.filipowicz, mariusz.kuczaj}@polsl.pl

mgr inż. PAWEŁ GRUSZKA
Fabryka Elementów Napędowych FENA Sp. z o.o.
ul. E. Imieli 47, 41-605 Świętochłowice
dz.techniczny@fena.pl