

**Krzysztof KARWALA**

Politechnika Krakowska, Kraków

**Radim ZIMA**

Bonatrans Group a.s., Bohumin

## **KSZTAŁTOWANIE JAKOŚCI TECHNOLOGICZNEJ ELEMENTÓW ZESTAWÓW KOŁOWYCH ZA POMOCĄ KULOWANIA**

### **Słowa kluczowe**

Kulowanie, jakość technologiczna, zestaw kołowy.

### **Streszczenie**

W opracowaniu dokonano charakterystyki procesu kulowania jako metody obróbki powierzchniowej, zwiększającej jakość technologiczną zestawów kołowych pojazdów szynowych. Przedstawiono również wyniki badań autorów dotyczące kompleksowej charakterystyki warstwy wierzchniej stali P40 w wybranym wariantcie kulowania, a także zastosowania procesu kulowania do zwiększenia jakości technologicznej zestawów kołowych.

### **Wprowadzenie**

Zadania eksploatacyjne, jakie stawia się obecnie wytwarzanym pojazdom szynowym, są związane z koniecznością budowy szybkiego i efektywnego ekonomicznie taboru szynowego o wysokiej jakości. Na wysoką jakość taboru szynowego składają się: wymagana niezawodność i trwałość jego elementów i zespołów oraz poziom spełniania funkcji eksploatacyjnych. Jakość pojazdów szynowych jest kształtowana w procesie konstruowania poprzez dobór materiałów,

zewnętrznych kształtów oraz własności użytkowych, w procesie wytwarzania poprzez dobór odpowiednich technik wytwarzania oraz procesie eksploatacji poprzez dobór warunków i sposobów użytkowania. Ocena jakości elementów taboru szynowego jest możliwa po zakończonym procesie wytwarzania – jakością technologiczną oraz po wprowadzeniu go do eksploatacji – jakością użytkową. Jakość technologiczną elementu pojazdu szynowego określają [1]: własności materiału, dokładność wymiarowo-kształtowa oraz własności warstwy wierzchniej. Jakość użytkowa zależy od jakości technologicznej oraz warunków eksploatacji.

Aby sprostać wysokim wymaganiom jakościowym, należy budować nowoczesny tabor szynowy, działając w następujących kierunkach [2]: zmniejszenia masy, zwiększenia własności wytrzymałościowych elementów pojazdu, zwiększenia poziomu komfortu jazdy, zmniejszenia oddziaływań dynamicznych pojazd–tor.

Jednym z zespołów pojazdów szynowych, którego jakość decyduje o bezpieczeństwie ruchu kolejowego, jest zestaw kołowy.

Zwiększenie jakości technologicznej zestawu kołowego można osiągnąć m.in. poprzez zastosowanie odpowiednich obróbek powierzchniowo wzmacniających, ponieważ podwyższają one odporność na wiodące procesy zużycia technologicznej warstwy wierzchniej materiału. Mimo iż technologiczna warstwa wierzchnia materiału stanowi zaledwie kilka procent objętości całego elementu, to w sposób znaczący decyduje o najważniejszych własnościach użytkowych w jego późniejszej eksploatacji. Ze względu na złożony charakter obciążeń zewnętrznych i wewnętrznych zestawu kołowego, wiodącymi procesami zużycia są zużycie ściernie i zmęczeniowe [2]. Celowe jest więc podwyższanie własności użytkowych elementów pojazdów szynowych za pomocą wybranych obróbek powierzchniowo wzmacniających, które konstytuują warstwę wierzchnią o określonych własnościach [3]. Umocnienie powierzchni ma swoje uzasadnienie techniczne i ekonomiczne. Może ono nastąpić w wyniku procesów obróbki cieplnej w przekształceniach fazowych i wydzielinowych zachodzących w materiale lub zastosowania powierzchniowych obróbek plastycznych, które powodują zgniot powierzchniowy, a więc także umocnienie warstwy powierzchniowej wybranego elementu [4]. Spośród wielu metod dynamicznej obróbki plastycznej jedną z najprostszych jest kulowanie. Technologia kulowania polega na umocnieniu powierzchni w wyniku działania na nią strumienia śrutu, który uderzając w obrabianą powierzchnię powoduje powstanie odkształceń plastycznych i wytworzenie ściskających naprężeń własnych w warstwie wierzchniej obrabianego elementu.

W niniejszym opracowaniu przedstawiono charakterystykę procesu kulowania jako metody możliwej do podwyższenia jakości technologicznej elementów zestawów kołowych, jak również wyniki badań autora dotyczące warstwy wierzchniej próbek wykonanych ze stali P40, ukonstytuowanej w wybranym

wariancie procesu kulowania. Opisano również wyniki badań autorów [5, 6] dotyczące zastosowania procesu kulowania do zwiększenia nośności kół zestawów kołowych.

## 1. Charakterystyka procesu kulowania

Śrutowanie jest procesem obróbki, który pojawił się około 130 lat temu. Początkowo stosowano go do czyszczenia i usuwania zgorzelin z części maszyn. Obecnie jest stosowany do zwiększenia takich parametrów części maszyn jak: wytrzymałość zmęczeniowa, zużycie oraz pękanie korozyjne [7].

Kulowanie jest jedną z metod nagniatania dynamicznego, które jest stosowane do powierzchniowego umacniania części maszyn [8]. Polega ono na poddaniu powierzchni elementu działaniu strumienia śrutu wyrzucanego z prędkością od 40 do 90 m/s, w zależności od parametrów obróbki. W wyniku realizacji tej obróbki powierzchniowej uzyskujemy powstawanie odkształceń plastycznych i wytworzenie ściskających naprężeń własnych w warstwie wierzchniej obrabianego elementu. Zaletą kulowania jest możliwość zastosowania tego sposobu obróbki do powierzchni o złożonych kształtach. Do najważniejszych zalet tego procesu zaliczamy: przerywany dynamiczny kontakt elementu nagniatanego z powierzchnią obrabianą, zmienną wartość siły w czasie obróbki oraz niewielkie obciążenie elementów układu OPN, bardzo dobre odprowadzenie ciepła ze strefy obróbki. Do wad omawianej obróbki zaliczamy przede wszystkim małą dokładność wymiarowo-kształtową obrabianych elementów oraz stosunkowo niewielką głębokość utwardzenia warstwy wierzchniej.

Do kulowania stosowane są urządzenia typu mechanicznego oraz pneumatycznego. W ostatnich latach wprowadzono do praktyki produkcyjnej urządzenia do kulowania laserowego [9, 10]. W urządzeniach mechanicznych energia kinetyczna śrutu uzyskiwana jest za pomocą łopatek obracającego się wirnika, natomiast w urządzeniach pneumatycznych pod wpływem działania sprężonego powietrza. W procesie kulowania laserowego wykorzystuje się impulsy światła koherentnego w celu wywołania odkształceń plastycznych. Głębokość zalegania strefy umocnionej tą metodą wynosi ponad 1 mm, co nie jest możliwe do uzyskania przy zastosowaniu procesu kulowania w wersji tradycyjnej.

Wybór odpowiedniej metody kulowania uzależniony jest od wymiarów i kształtu elementów oraz ich programu produkcyjnego. W procesie kulowania wyróżniamy następujące parametry obróbki: rodzaj i granulację śrutu, intensywność śrutowania, pokrycie powierzchni. Warunki doboru parametrów śrutowania szeroko opisano w opracowaniach autorów [5, 10].

Kulowanie jako powierzchniowa obróbka umacniająca znalazła obecnie zastosowanie przy podwyższaniu jakości technologicznej części maszyn, obróbce stalowych części maszyn przed ich pokryciem metodą galwaniczną, przeznaczo-

nych do pracy przy obciążeniach zmiennych oraz przy przygotowaniu powierzchni pod natryskiwanie cieplne metalami i za pomocą tworzyw sztucznych.

## **2. Rola warstwy wierzchniej w kształtowaniu jakości technologicznej elementów zestawów kołowych pojazdów szynowych**

Spełnienie złożonych wymagań stawianych elementom zestawów kołowych jest możliwe przy zapewnieniu wysokiej jakości technologicznej ich wykonania. Jakość jest determinowana m.in. ich wytrzymałością zmęczeniową i odpornością na zużycie ścierne. Wymienione własności użytkowe w szerokim zakresie mogą być kształtowane metodami technologicznymi przy określonej konstrukcji i warunkach eksploatacji. Ostateczne ukształtowanie jakości technologicznej wyrobu odbywa się w końcowej fazie procesu technologicznego, poprzez nadanie jego warstwie wierzchniej określonych własności, za pomocą obróbki powierzchniowej. Całokształt działań inżynierskich w tym zakresie, obejmujących projektowanie, realizację i kontrolę procesów technologicznych wchodzi w zakres wyodrębnionej dziedziny wiedzy – inżynierii powierzchni [11].

Przez technologiczną warstwę wierzchnią należy rozumieć warstwę wierzchnią świadomie i celowo ukształtowaną wybranymi procesami technologicznymi w celu uzyskania żądanych własności użytkowych [12]. Charakteryzują ją dwie grupy czynników: czynniki fizyczne związane ze stanem materiału warstwy wierzchniej, czynniki geometryczne związane z powierzchnią (rys. 1) [13].

Ukształtowana technologiczna warstwa wierzchnia ma zawsze budowę i właściwości zależne od rodzaju materiału rdzenia, a także od rodzaju i parametrów stosowanych obróbek powierzchniowych.

Technologiczna warstwa wierzchnia części maszyn nie ma budowy jednolitej, lecz składa się z odrębnych stref o zróżnicowanej strukturze i własnościach, może ona przybrać grubość od kilku angstromów do kilku milimetrów [11]. Zestawienie niezbędnych cech stereometrycznych i fizycznych umożliwiających jednoznaczną ocenę stanu tej warstwy nazywa się charakterystyką kompleksową warstwy wierzchniej [1, 14].

Należy jednak zaznaczyć, że poza nielicznymi wyjątkami, w przedmiotowej literaturze brak jest kompletnych danych do sporządzenia kompleksowych charakterystyk technologicznych warstw wierzchnich dla poszczególnych rodzajów obróbki powierzchniowej, być może jest to związane z wysokimi kosztami badań niszczących, za pomocą których uzyskuje się wyniki badań ich fizycznych własności. Ponadto wymieniona charakterystyka nie obejmuje cech użytkowych takich jak: ścieralność, ścierność, zmęczeniowość, korozyjność i obciążalność. Powyższe właściwości uzyskuje się przez odpowiedni dobór materiałów i procesów technologicznych na podstawie fenomenologicznych związków między parametrami procesu technologicznego a uzyskanym stanem warstwy wierzchniej.



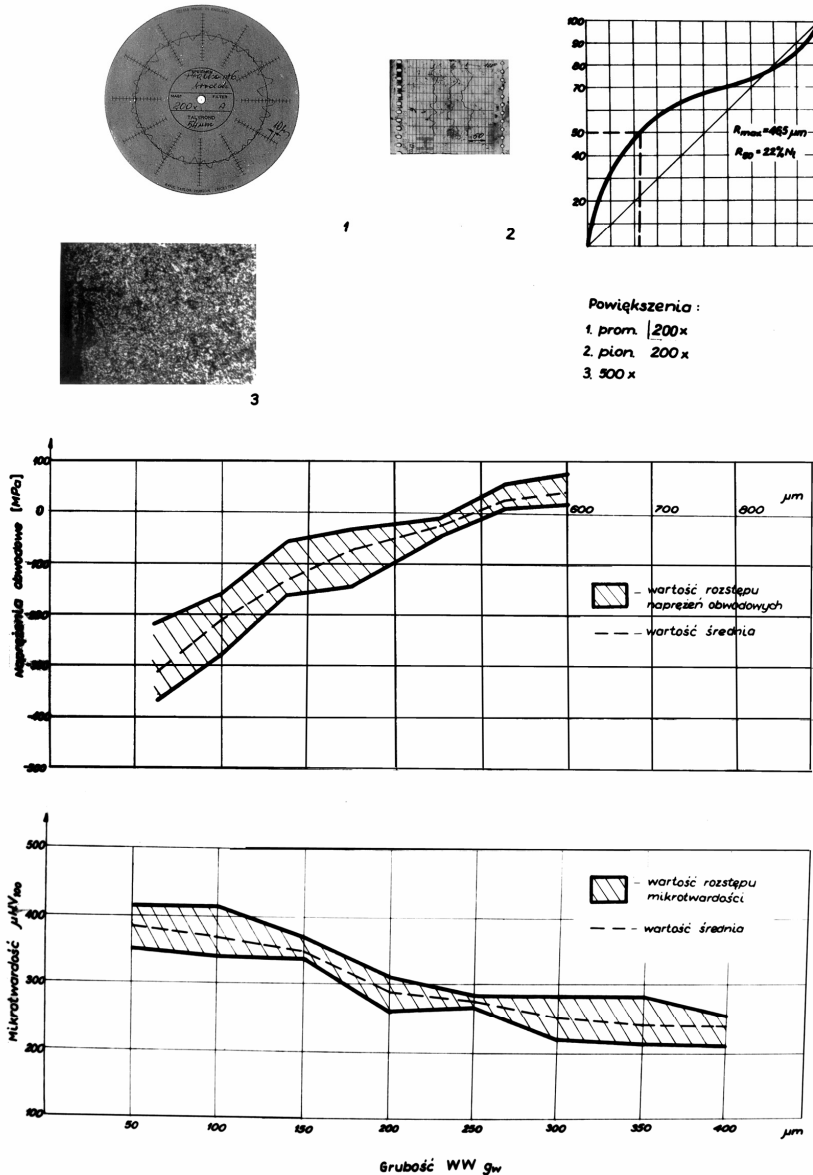
Rys. 1. Czynniki charakteryzujące technologiczną warstwę wierzchnią [13]

W badaniach autora [15] dokonano pomiaru wybranych parametrów fizykalnych i stereometrycznych warstwy wierzchniej kulowanych próbek ze stali P40. Badania warstwy wierzchniej przeprowadzono, przyjmując zasadę definiowania wartości czynników charakteryzujących stan warstwy wierzchniej w funkcji jej grubości. Przyjęta metodyka pozwala na określenie stanu warstwy wierzchniej na podstawie pojęcia charakterystyki kompleksowej, bez uwzględniania zależności przyczynowych wymienionej charakterystyki od warunków śrutowania. Próbkę kulowano pneumatycznie, stosując wybrany wariant technologiczny kulowania. Zastosowane parametry kulowania przedstawiono w tab. 1.

Tabela 1. Parametry technologiczne kulowania

Obróbka cieplna wyjściowa	Ulepszanie cieplne
Czas [min]	0,5
Ciśnienie zasilania [atm]	6,0
Rodzaj śrutu	cięty z drutu stalowego
Skład mieszanki śrutu	100% $\Phi$ 0,6
Średnica dyszy [mm]	8,0
Odległość dysz od próbki [mm]	250
Typ płytki kontrolnej Almena	A
Strzałka ugięcia płytki Almena [mm]	0,36

Wyniki badań wybranych parametrów warstwy wierzchniej zestawiono w postaci charakterystyki kompleksowej warstwy wierzchniej (rys. 2).



### Charakterystyka kompleksowa warstwy wierzchniej stali 40 po śrutowaniu

Rys. 2. Charakterystyka kompleksowa technologicznej warstwy wierzchniej kulowanych próbek ze stali P40 [15]

Analiza wyników badań wykazała, że obróbka powierzchniowo wzmacniająca kulowaniem pozwala na uzyskanie korzystnych, ze względu na wybrane własności użytkowe, parametrów stereometrycznych warstwy wierzchniej. Powierzchnia elementów poddanych kulowaniu zmienia strukturę z anizotropowej na punktową, która nosi ślady obróbki kulowaniem. Struktura punktowa warstwy wierzchniej zwiększa jej odporność na procesy zmęczenia, zwiększając promienie mikrokarbów powierzchni, pozostających po wcześniejszych obróbkach. Wyniki badań fizykalnych wskazują na korzystny rozkład naprężeń własnych z minimalnym gradientem naprężeń pomiędzy naprężeniami ściskającymi a rozciągającymi. Świadczy to o łagodnym przejściu własności mechanicznych pomiędzy warstwą wierzchnią a rdzeniem materiału. Zmiana geometrii powierzchni oraz korzystne rozkłady parametrów fizykalnych w funkcji grubości warstwy wierzchniej wskazują na pozytywny wpływ kulowania na zwiększenie odporności warstwy wierzchniej na procesy zmęczeniowe.

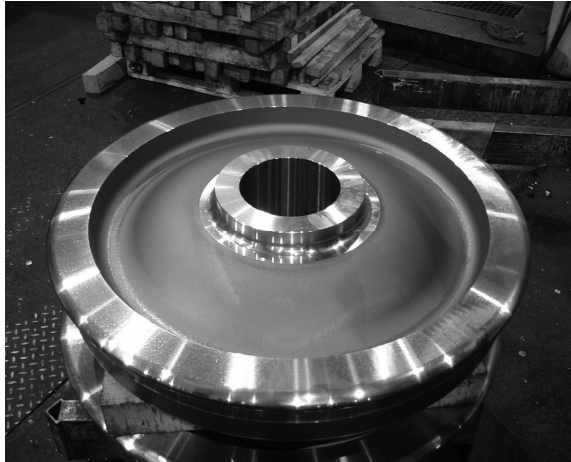
### **3. Zastosowanie procesu kulowania w procesie podwyższania jakości technologicznej elementów zestawu kołowego**

Kulowanie jako obróbka powierzchniowo wzmacniająca była i jest obecnie stosowana w zakładach produkujących zestawy kołowe [16, 17]. Była ona stosowana w technologii kół zestawów kołowych odlewanych i walcowanych, których powierzchnie nie były mechanicznie obrabiane. Operacja ta eliminowała negatywny wpływ mikrokarbów i nierówności oraz innych potencjalnych inicjatorów pęknięć zmęczeniowych na powierzchni tarczy koła oraz powodowała wprowadzenie ściskających naprężeń własnych do technologicznej warstwy wierzchniej tarczy koła. Wymienione pożądane zmiany w wybranych parametrach technologicznej warstwy wierzchniej tarczy koła wpływały na podwyższenie ich jakości technologicznej.

Obecnie technologia kulowania jest stosowana także dla nowych konstrukcji kół zestawów kołowych przeznaczonych do pracy w trudnych warunkach klimatycznych oraz dla kół zestawów pociągów nowych generacji rozwijających wysokie prędkości. Kulowane są również koła na specjalne zamówienia klientów, które mają przenieść większe wartości sił pionowych oraz poziomych, określone w kartach UIC 510-5 lub EN 13979.

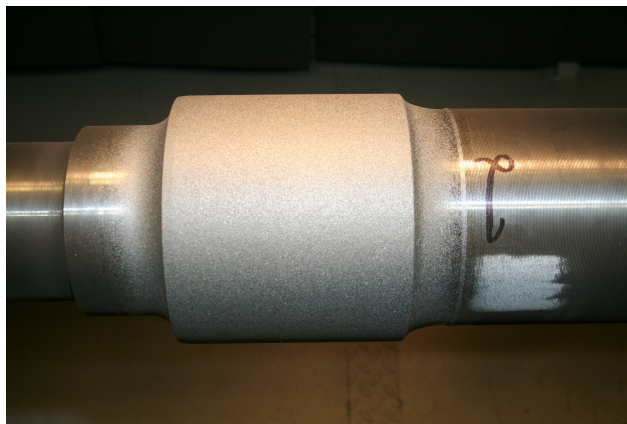
Jak wynika z publikacji autorów [16, 17] kulowanie jest z powodzeniem stosowane w zakładach wytwórczych zestawów kołowych BONATRANS a.s. w Bohuminie. Przykład koła po procesie kulowania na rys. 3.

Kulowanie stosowane jest również w procesie wytwarzania osi dla ukonstytuowania odpowiednich parametrów technologicznej warstwy wierzchniej czoła spoczynkowego podpięcia osi do procesu nanoszenia powłoki molibdenowej. Proces kulowania powoduje, iż nanoszona metodą metalizacji natryskowej



Rys. 3. Przykład koła zestawu kołowego po procesie kulowania

powłoka molibdenowa posiada większą przyczepność do podłoża, przez co zwiększa się trwałość połączenia wciskowego. Proces przygotowania powierzchni podpięcia do nałożenia powłoki molibdenowej powinien być poprzedzony dokładnym odtłuszczeniem. Kulowanie jest przeprowadzane metodą pneumatyczną w specjalnej kabinie, gdzie oś obraca się z określoną prędkością, tak aby parametry kulowania osiągnęły wymagane wartości. Po zakończonym procesie kulowania powierzchnia podpięcia jest czyszczona za pomocą specjalnych szczotek, po czym następuje nanoszenie warstwy molibdenu. Przykład kulowanego podpięcia osi przedstawiono na rys 4.



Rys. 4. Widok podpięcia osi po procesie kulowania przed nałożeniem powłoki molibdenowej



Dla przeprowadzenia porównania jakości użytkowej kół obrabianych metodami wiórowymi oraz obróbką skrawaniem i śrutowaniem przeprowadzono badania trwałości wytrzymałości zmęczeniowej kół rzeczywistej wielkości za pomocą rotacyjnego stanowiska zmęczeniowego w ośrodku badawczo-rozwojowym kolei niemieckich w Minden [16, 17].

Badania wytrzymałości zmęczeniowej kół do wagonów pasażerskich o średnicy 920 mm wykazały, że oprócz jakości materiału ważną rolę odgrywa jakość technologiczna powierzchni tarczy koła. Wyniki przeprowadzonych badań wskazują na wzrost o 20% amplitudy maksymalnych naprężeń w kołach w których powierzchnie tarczy poddano obróbce skrawaniem w stosunku do kół walcowanych. Zastosowanie obróbki powierzchniowo wzmacniającej kulowaniem pozwala na wzrost nośności o 50% w stosunku do koła po obróbce skrawaniem. Wywołanie naprężeń wstępnych w warstwie powierzchniowej materiału w znacznym stopniu przyczynia się do podniesienia dopuszczalnych wielkości obciążeń. Wyniki testów zmęczeniowych dają gwarancję wysokich współczynników bezpieczeństwa dla eksploatowanych kół.

## Podsumowanie

Kulowanie jako powierzchniowa obróbka umacniająca znalazła obecnie szerokie zastosowanie przy podwyższaniu jakości technologicznej elementów maszyn. Proces kulowania polega na umocnieniu powierzchni, poprzez oddziaływanie strumienia śrutu, który uderzając w obrabianą powierzchnię konstytuuje pożądane własności stereometryczne i fizykalne technologicznej warstwy wierzchniej. Do oceny jakości technologicznej kulowanych elementów może służyć charakterystyka kompleksowa warstwy wierzchniej, w której zestawiono wyniki badań parametrów stereometrycznych i fizykalnych po procesie kulowania. Jak wynika z wymienionych badań powierzchnia elementu poddana kulowaniu zaokrąglonym śrutem zmieniła strukturę z anizotropowej, która jest skutkiem obróbek wykańczających, na punktową, która stanowi ślady obróbki kulowaniem. Struktura punktowa warstwy wierzchniej zwiększa jej odporność na procesy zmęczeniowe poprzez zwiększenie promieni mikrokarbów powierzchni pozostających po wcześniejszych obróbkach. Wyniki badań fizykalnych wskazują na korzystny rozkład naprężeń własnych z minimalnym gradientem naprężeń pomiędzy naprężeniami ściskającymi a rozciągającymi. Świadczy to o łagodnym przejściu własności mechanicznych pomiędzy warstwą wierzchnią a rdzeniem materiału. Zmiana geometrii powierzchni oraz korzystne rozkłady parametrów fizykalnych w funkcji grubości warstwy wierzchniej wskazują na pozytywny wpływ kulowania na zwiększenie odporności warstwy wierzchniej na procesy zmęczeniowe. Kulowanie jako obróbka powierzchniowo wzmacniająca ze względu na swój uniwersalny charakter jest stosowana również w zakładach produkujących zestawy kołowe [16, 17]. Zastosowanie kulowania do ob-

róbki kół zestawów kołowych wpływa na podwyższenie jakości technologicznej kół, co powoduje wzrost ich maksymalnych dopuszczalnych obciążeń. Wywołanie naprężeń wstępnych w warstwie powierzchniowej materiału w znacznym stopniu przyczynia się do podniesienia ich nośności, co stanowi gwarancję wysokich współczynników bezpieczeństwa dla eksploatowanych kół.

Zastosowanie procesu kulowania do przygotowania powierzchni czopu spoczynkowego podpięcia osi do nanoszenia powłoki molibdenowej zwiększa przyczepność powłoki do podłoża oraz wytrzymałość zmęczeniową połączenia wciskowego poprzez eliminację zużycia typu fretting.

### Bibliografia

1. Kaczmarek J.: Podstawy obróbki wiórowej, ściernej i erozyjnej, WNT, Warszawa 1970.
2. Sitarz M., Składkowski A., Chrużik K.: Metody numeryczne w projektowaniu kół kolejowych zestawów kołowych. Wydawnictwa Politechniki Śląskiej, Gliwice 2003.
3. Broś J., Lędzińska A.: Stan warstwy wierzchniej oraz jej wpływ na własności zmęczenia osi zestawów kołowych. Praca Techniczna Mechanika, Rzeszowskie Towarzystwo Naukowe, Wydawnictwo Nauk Technicznych, Rok II, seria III, Nr 216, Rzeszów 1974.
4. Nakonieczny A.: Właściwości eksploatacyjne części maszyn po powierzchniowej obróbce plastycznej. Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Czasopismo Techniczne, z. 6-M/2001.
5. Karwala K.: Zastosowanie kulowania w technologii zestawów kołowych pojazdów szynowych. Wydawnictwa Politechniki Krakowskiej, Czasopismo Techniczne, z. 10-M/2003.
6. Zima R., Boncek R., Pavco J.: New wheel design for passenger and freight cars. 12<sup>th</sup> International Wheels Congress Qingdao China 1998.
7. Katsuji T.: Papers on shot peening published in the world for the last Thirteen years. The 7<sup>th</sup> International Conference on Shot Peening. Instytut Mechaniki Precyzyjnej, Warszawa 1999.
8. Norma BN-80/1062-01. Kulowanie. Wytyczne obróbki.
9. Nachman G.: Shot peening – past, present and future. The 7<sup>th</sup> International Conference on Shot Peening. Instytut Mechaniki Precyzyjnej, Warszawa 1999.
10. Nakonieczny A.: Dynamiczna powierzchniowa obróbka plastyczna – kulowanie, Instytut Mechaniki Precyzyjnej, Warszawa 2002.
11. Burakowski T., Wierchoń T.: Inżynieria powierzchni metali. WNT, Warszawa 1995.
12. Kaczmarek J., Hanzel-Powierża Z.: Aktualny stan i perspektywy diagnostyki technologicznej warstwy wierzchniej, IMJON-79, Warszawa.

13. Młynarczyk A., Jakubowski J.: Obróbka powierzchniowa i powłoki ochronne. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 1998.
14. Karwala K., Polański Z.: Badania warstwy wierzchniej w procesie dokładnego wykrawania. Wydawnictwa Politechniki Krakowskiej. Czasopismo Techniczne, z. 4-M/1975.
15. Karwala K.: Badania warstwy wierzchniej śrutowanych próbek ze stali P40. Wydawnictwa Politechniki Krakowskiej. Czasopismo Techniczne Z. 4M/1996.
16. Karwala K.: Technologiczne metody podwyższania trwałości wybranych elementów zestawów kołowych pojazdów szynowych. Wydawnictwa Politechniki Krakowskiej, Czasopismo Techniczne, z. 10-M/2003.
17. Karwala K., Zima R.: Zastosowanie obróbki powierzchniowej kulowaniem do zwiększenia nośności kół kolejowych zestawów kołowych. XVII Konferencja Naukowa Pojazdy Szynowe, Kazimierz Dolny 2006.

Recenzent:  
**Marek S. SITARZ**

### **Shaping of the production technology quality of wheel set elements with the use of shot peening**

#### **Key words**

Shot peening, production technology, wheel set.

#### **Summary**

The work is a description of the shot peening process as a method of surface treatment that improves quality of rail vehicle wheel sets. The results of the author's investigation concerning a complex description of P40 steel in a selected variant of shot peening are presented. The investigation is a result of the author's dealing with an application of the shot peening process to improve the quality of wheel sets.

