

Forming the surface layer properties during grinding

Kształtowanie właściwości warstwy wierzchniej podczas szlifowania

MARIUSZ DEJA
ALICJA STANISŁAWSKA
MAREK SZKODO
KAROLINA WSZELAK*

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2019.10.88>

The article describes the grinding of flat surfaces combined with changes in the properties of the surface layer, in particular through its hardening. Issues related to the grind-hardening technology are discussed. In addition, tests have been presented in which improved grinding properties of the workpiece through plastic deformation have been obtained after the grinding process.

KEYWORDS: grinding, hardening, surface, grind-hardening

W artykule scharakteryzowano szlifowanie powierzchni płaskich połączone ze zmianami właściwości warstwy wierzchniej, zwłaszcza poprzez jej zahartowanie. Omówiono problemy związane z tzw. technologią grind-hardening. Dodatkowo przedstawiono badania, w których po procesie szlifowania uzyskano lepsze właściwości elementu obrabianego wskutek odkształcenia plastycznego.

SŁOWA KLUCZOWE: szlifowanie, hartowanie, warstwa wierzchnia, szlifowanie z hartowaniem

Rosnące wymagania technologiczne i coraz bardziej skomplikowane kształty przedmiotów – takich jak koła zębate [1] czy łopatki turbin [2] – wymuszają stosowanie specjalnych maszyn i narzędzi, a także precyzyjny dobór parametrów szlifowania lub frezowania [3]. Ze względów ekonomicznych dąży się do jak najmniejszej liczby przejść ściernicy [4] z zachowaniem zadowalającej jakości powierzchni. Szlifowanie połączone z hartowaniem warstwy wierzchniej obrabianego przedmiotu, tzw. grind-hardening, pozwala nie tylko na zminimalizowanie kosztów, lecz także na skrócenie czasu obróbki, ponieważ eliminuje konieczność stosowania odrębnej operacji hartowania po procesie szlifowania. Innym rozwiązaniem technologicznym, pozbawionym wad szlifowania z hartowaniem, jest szlifowanie, po którym lepsze właściwości warstwy wierzchniej uzyskuje się dzięki odkształceniu plastycznemu bez zahartowania powierzchni [5].

Szlifowanie z hartowaniem warstwy wierzchniej

Szlifowanie z hartowaniem (tzw. grind-hardening) (rys. 1) jest hybrydowym procesem produkcyjnym, podczas którego obrabiana powierzchnia jest jednocześnie szlifowana i utwardzana. Proces hartowania w trakcie szlifowania wymaga przemiany strukturalnej materiału obrabianego przedmiotu, do której wykorzystuje się ciepło wytworzone w strefie szlifowania. W czasie szlifowania warstwa wierzchnia przedmiotu jest podgrzewana powyżej temperatury austenizacji, a następnie w wyniku hartowania na powierzchni zachodzi przemiana martenzytyczna. Zmiany

te są możliwe dzięki dobraniu odpowiednich parametrów obróbkowych, takich jak głębokość skrawania i posuw. Przez zastosowanie odpowiednio dużych wartości głębokości skrawania oraz posuwu w obrabianym przedmiocie może zajść martenzytyczna przemiana fazowa, która skutkuje zwiększeniem twardości warstwy wierzchniej [6].

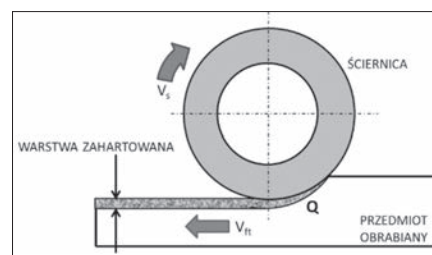


Fig. 1. Grind-hardening
Rys. 1. Szlifowanie z hartowaniem

Technologia szlifowania połączonego z hartowaniem została wprowadzona u schyłku XX w. przez Brinksmeiera i Brockhoffa [7]. We wstępnej fazie ten proces był badany w sposób eksperymentalny, aby potwierdzić jego wykonalność [8].

Problematyka technologii grind-hardening

Technologia grind-hardening ma wiele zalet, lecz nie jest pozbawiona wad. Główną zaletą jest brak konieczności przeprowadzania dodatkowej operacji hartowania po szlifowaniu z utwardzeniem warstwy wierzchniej. Do wad należy zaliczyć obniżoną jakość powierzchni obrabianego przedmiotu, jak również niższą dokładność wymiarowo-kształtową, co często skutkuje koniecznością wykonania dodatkowego, drugiego szlifowania. Podczas drugiego szlifowania wykończeniowego utwardzona warstwa wierzchnia częściowo traci jednak swoje właściwości na skutek odpuszczenia martenzytu, powodującego zmniejszenie jego twardości. W obrabianym przedmiocie powstaje nowa granica międzyfazowa – pomiędzy ziarnami martenzytu i perlitu. To zjawisko może mieć niekorzystny wpływ na rozkład naprężeń własnych, co w przyszłości może skutkować obniżeniem trwałości eksploatacyjnej wyrobu. Kluczowym elementem tej technologii jest dobór odpowiednich parametrów wejściowych procesu, które zapewnią uzyskanie założonej grubości warstwy zahartowanej. Dostępna literatura przedstawia szereg zagadnień związanych z procesem szlifowania połączonego z hartowaniem. Salonitis i in. poruszyli m.in. tematykę analizy termicznej procesu [9], wpływu chłodziwa [10], znaczenia rodzaju ściernicy [11] czy siły szlifowania [12], a także symulacji powstawania naprężeń resztkowych [6].

* Dr hab. inż. Mariusz Deja, mariusz.deja@pg.edu.pl, <https://orcid.org/0000-0002-1874-9015> – Katedra Technologii Maszyn i Automatykacji Produkcji, Wydział Mechaniczny Politechniki Gdańskiej, Gdańsk, Polska
Mgr inż. Alicja Stanisławska, alicja.stanislawski@pg.edu.pl, <https://orcid.org/0000-0003-0646-4706> – Katedra Technologii Maszyn i Automatykacji Produkcji, Wydział Mechaniczny Politechniki Gdańskiej, Gdańsk, Polska
Dr hab. inż. Marek Szkodo, marek.szukodo@pg.edu.pl, <https://orcid.org/0000-0002-4210-0718> – Katedra Inżynierii Materiałowej i Spajania, Wydział Mechaniczny Politechniki Gdańskiej, Gdańsk, Polska
Mgr inż. Karolina Wszelak, karolina.wszelak@pg.edu.pl, <https://orcid.org/0000-0001-5463-025X> – Katedra Technologii Maszyn i Automatykacji Produkcji, Wydział Mechaniczny Politechniki Gdańskiej, Gdańsk, Polska

Głębokość zahartowanej warstwy wierzchniej

Kluczowym problemem w szlifowaniu połączonym z hartowaniem jest dobór parametrów technologicznych procesu, które zapewniłyby uzyskanie pożądanej głębokości zahartowanej warstwy wierzchniej – HPD (*hardness penetration depth*). Część badań jest skoncentrowana na sprawdzeniu maksymalnej wydajności procesu, w którym stosuje się różne ściernice bądź kombinacje parametrów wejściowych [8, 11, 13–15]. Dane przytaczane w literaturze wskazują, że podczas zwiększania głębokości skrawania – przy zachowaniu stałej prędkości posuwu – rośnie HPD, natomiast w przypadku niezmiennej głębokości szlifowania głębokość zahartowanej warstwy wierzchniej zwiększa się na skutek zmniejszania prędkości posuwu [16, 17].

Po uzyskaniu żądanej warstwy zahartowanej pojawia się kolejny problem związany z koniecznością ponownego szlifowania w celu uzyskania wymaganej dokładności wymiarowo-kształtowej. Podczas tego procesu wysoka temperatura może doprowadzić do zmiękczenia materiału przedmiotu, a także do powstania niekorzystnych naprężeń rozciągających lub pęknięć. W tej sytuacji zaproponowano modele numeryczne oraz analityczne pozwalające na predykcję temperatury powierzchni podczas procesu i jej następstw [18–20]. Wyniki przedstawione w artykule Alonso i in. [21] pokazują zależność pomiędzy właściwą energią szlifowania a głębokością HPD. Ta korelacja jest właściwa do przewidywania rezultatów zarówno szlifowania hartującego, jak i kolejnego – wykończeniowego. Jest ona niezależna od pozostałych parametrów obróbkowych, tj. od głębokości skrawania, prędkości posuwu i prędkości obrotowej ściernicy.

Na rys. 2 zaprezentowano przykładowe zależności pomiędzy HPD a właściwą powierzchniową energią szlifowania, uzyskane w badaniach Alonso i in. [21]. Te zależności są w przybliżeniu liniowe, a dodatkowo możliwe jest oszacowanie nachylenia krzywych na podstawie składu chemicznego analizowanego materiału.

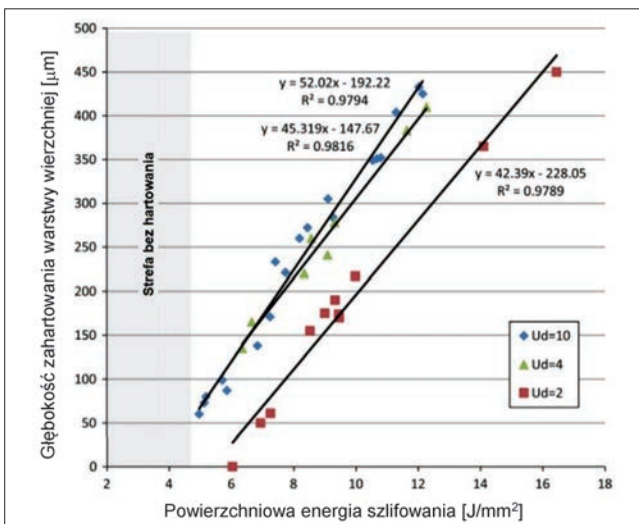


Fig. 2. Influence of surface grinding energy on the depth of hardening of the surface layer for AISI 1045 steel [21]

Rys. 2. Wpływ powierzchniowej energii szlifowania na głębokość zahartowania warstwy wierzchniej dla stali AISI 1045 [21]

Naprężenia szczątkowe

Naprężenia szczątkowe w warstwie wierzchniej obrabianego przedmiotu są spowodowane rozproszeniem ciepła w strefie szlifowania, ciśnieniem pomiędzy ściernicą a przedmiotem obrabianym oraz przemianą fazową

materiału [22]. Stan równowagi tych trzech elementów decyduje o tym, czy wywołane naprężenia będą rozciągające, czy ściskające.

W artykule [23] wskazano, że ciśnienie wywołane naciskiem ściernicy na obrabiany przedmiot generuje ściskające naprężenia szczątkowe. Deformacja termiczna powoduje zaś rozciągające naprężenia resztkowe. Salonić w artykule [6] przedstawił modelowanie MES rozkładów naprężeń szczątkowych powstających podczas szlifowania z hartowaniem oraz wyniki eksperymentalne. W przypadku szlifowania bez użycia chłodziwa naprężenia rozciągające są obecne w całej warstwie poddanej obróbce cieplnej, natomiast w przypadku szlifowania hartującego z użyciem chłodziwa naprężenia resztkowe są ściskające i maksymalnie obejmują obszar do $\frac{1}{4}$ utwardzonej warstwy.

Szlifowanie z utwardzeniem warstwy wierzchniej poprzez odkształcenie plastyczne

W artykule [5] przedstawiono wyniki badań wpływu głębokości współbieżnego szlifowania powierzchni płaskich na chropowatość i nanotwardość warstwy wierzchniej stali C45 o strukturze ferrytyczno-perlitycznej i średniej wielkości ziarna $20 \mu\text{m}$. Dla wszystkich zastosowanych wartości głębokości szlifowania $a_e = 0,002; 0,008; 0,014$ i $0,020$ mm uzyskano znaczny wzrost twardości warstwy wierzchniej obrabianego przedmiotu mimo braku zahartowania. Szlifowanie przeprowadzono na szlifierce CNC do płaszczyzn SPG 25×60 z poziomą osią wrzeciona. Do obróbki zastosowano ściernicę firmy Norton z ziarnami z elektrokorundu szlachetnego o charakterystyce technicznej 38A60LVS i wymiarach $(D \times T \times H)$ $250 \times 25 \times 76,2$ mm. Każdy test był poprzedzony kondycjonowaniem ściernicy za pomocą jednoziarnistego obciążacza diamentowego. Współbieżne szlifowanie wgłębne realizowano z użyciem chłodziwa przy stałej prędkości obwodowej ściernicy $v_s = 25$ m/s i stałej prędkości posuwu $v_{ft} = 1$ m/min.

Badania metalograficzne warstwy wierzchniej przedmiotu szlifowanego z głębokością $a_e = 20 \mu\text{m}$, wykonane pod elektronowym mikroskopem skaningowym JEOL JSM-7800 F, uwiaryściły dodatkową warstwę zmienionego materiału z wyraźną granicą rozdziału od ziaren ferryty i perlitu (rys. 3). Warstwa dobrze przylegała do ferrytyczno-perlitycznego podłoża, przy czym w niektórych miejscach była wyraźnie popękana. Jak wykazały badania składu chemicznego z wykorzystaniem spektroskopii energii promieniowania rentgenowskiego EDS (rys. 4), ta warstwa była zbudowana z atomów tlenu (ok. 30% mas.) i atomów żelaza (ok. 70% mas.). Analizując wykres równowagi fazowej Fe-O (rys. 5), można postawić tezę, że na powierzchni stali po szlifowaniu z głębokością $a_e = 20 \mu\text{m}$ występuje warstewka tlenku Fe_2O_3 .

Jak wykazano w pracy [24], hematyt zaczyna krystalizować w temperaturze 420°C . Biorąc pod uwagę fakt, że podczas szlifowania szybkość nagrzewania warstwy przypowierzchniowej obrabianego materiału jest duża, temperatura początku krystalizacji hematytu musiała być znacznie wyższa niż 420°C . Dodatkowo utworzona warstwa hematytu miała grubość ok. $3\text{--}4 \mu\text{m}$, co też wymagało znacznie wyższej temperatury niż temperatura początkowa krystalizacji tlenku. Jednocześnie temperatura nagrzania warstwy przypowierzchniowej szlifowanego materiału nie spowodowała przemiany perlitu w austenit, więc nie przekraczała 728°C , a uwzględniając to, że szybkie nagrzewanie stali przesuwa początek przemiany perlitycznej w kierunku wyższej temperatury, nie była wyższa niż 900°C .

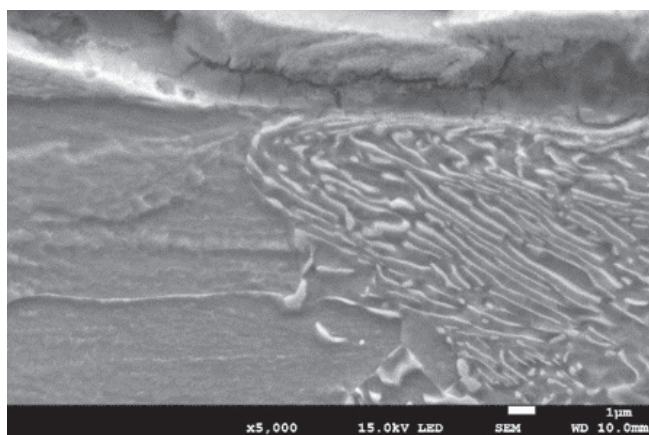


Fig. 3. The microstructure of the surface layer of C45 steel after grinding with a depth of 20 μm . Visible oxidized surface layer approx. 3–4 μm thick with numerous cracks, under which plastically deformed grain of perlite and ferrite can be seen

Rys. 3. Mikrostruktura warstwy wierzchniej stali C45 po szlifowaniu z głębokością 20 μm . Widoczna utleniona warstwa wierzchnia o grubości ok. 3–4 μm z licznymi pęknięciami, pod którą widać odkształcone plastycznie ziarno perlitu i ferrytu

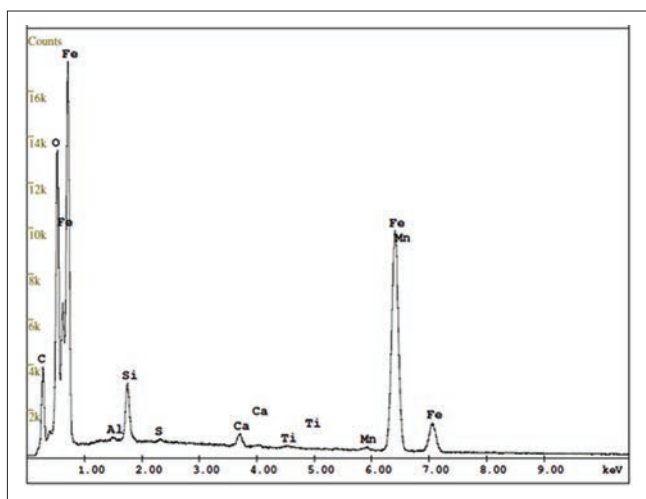


Fig. 4. EDS spectrum for the top layer after treatment of C45 steel with a grinding depth of 20 μm

Rys. 4. Widmo EDS dla warstwy wierzchniej po obróbce stali C45 z głębokością szlifowania 20 μm

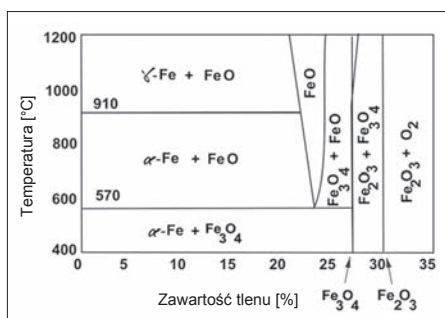


Fig. 5. Iron-oxygen balance system (oxygen content in percent by mass)
Rys. 5. Układ równowagi żelazo-tlen (zawartość tlenu podano w procentach masy)

Podsumowanie

Na podstawie analizy literatury i badań własnych można stwierdzić, że przeprowadzenie procesu szlifowania z odpowiednimi parametrami pozwala na kształtowanie właściwości warstwy wierzchniej w wyniku jej zahartowania lub odkształcenia plastycznego ziaren materiału. Utwardzenie wywołane odkształceniem plastycznym nie wymaga szlifowania wykończeniowego. Dodatkowo w ten sposób można uzyskać warstwy tlenków, które charakteryzują się wysoką twardością, a ponadto mają właściwości antykorozyjne. Taki stan warstwy wierzchniej eliminuje

niekorzystne zjawiska pojawiające się podczas szlifowania hartującego, a jednocześnie decyduje o korzystnych właściwościach eksploatacyjnych obrabianego przedmiotu.

Autorzy składają podziękowania dr. inż. Michałowi Bartmańskiemu za wykonanie pomiarów nanotwardości oraz dr. inż. Grzegorzowi Gajowcowi za pomoc w wykonaniu zdjęć na mikroskopie skaningowym.

LITERATURA

- [1] Haifeng C., Jinyuan T., Weihua Z., Changshun C. "The equal theoretical surface roughness grinding method for gear generating grinding". *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 90 (2017): 3137–3146.
- [2] Wilk W., Tota J. "Modern technology of the turbine blades removal machining". *8th International Conference Advanced Manufacturing Operation*. Kranevo, 2008.
- [3] Chodnicki M., Kaliński K.J., Galewski M.A. "Vibration surveillance during milling of flexible details with a use of the active optimal control". *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*. 32, 1–2 (2013).
- [4] Nadolny K. "Klasyfikacja procesów szlifowania jednoprzęsciowego". *Mechanik*. 5–6 (2008): 450–455.
- [5] Deja M., Stanisławska A., Szkodo M., Wszelak K. "Influence of parameters of deep grinding on nanohardness and surface roughness of C45 steel". *Mechanik*. 11 (2018): 1026–1028, <https://doi.org/10.17814/mechanik.2018.11.183>.
- [6] Salonitis K. "On surface grind hardening induced residual stresses". *Procedia CIRP*. 13 (2014): 264–269.
- [7] Brinksmeier E., Brockhoff T. "Utilization of grinding heat as a new heat treatment process". *CIRP Annals*. 45, 1 (1996): 283–286, [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)63064-9](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)63064-9).
- [8] Brockhoff T., Brinksmeier E. "Grind-hardening: A comprehensive view". *CIRP Annals*. 48, 1 (1999): 255–260. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)63178-3](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)63178-3).
- [9] Salonitis K., Chryssolouris G. "Thermal analysis of grind-hardening process". *International Journal of Manufacturing Technology and Management*. 12 (2007): 72–92.
- [10] Salonitis K., Chryssolouris G. "Cooling application in grind-hardening operations". *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 33 (2007): 285–297.
- [11] Salonitis K., Chronros T., Chryssolouris G. "Grinding wheel effect on grind-hardening process". *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 38 (2008): 48–58.
- [12] Salonitis K., Stavropoulos P., Kolios A. "External grind-hardening forces modelling and experimentation". *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 70 (2014): 523–530.
- [13] Venkatachalapathy V.S.K., Rajmohan B. "Experimental studies on the grindhardening effect in cylindrical grinding". *Materials and Manufacturing Processes*. 18, 2 (2003): 245–259.
- [14] Judong L., Wei Y., Songwei H., Zhilong X. "Experimental study on grindinghardening of 1060 steel". *Energy Procedia*. 16 (2012): 103–108.
- [15] Chryssolouris G., Tsirbas K., Salonitis K. "An analytical, numerical, and experimental approach to grind hardening". *Journal of Manufacturing Processes*. 7, 1 (2005): 1–9.
- [16] Hyatt G.A., Mori M., Föckerer T., Záh M.F., Niemeyer N., Duscha M. "Integration of heat treatment into the process chain of a mill turn center by enabling external cylindrical grind-hardening". *Production Engineering*. 7, 6 (2013): 571–584.
- [17] Wilke T. "Energieumsetzung und Gefügebeeinflussung beim Schleifhärten". PhD Thesis. University of Bremen, 2008.
- [18] Doman D., Warkentin A., Bauer R. "Finite element modelling approaches in grinding". *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 49, 2 (2009): 109–116.
- [19] Jin T., Rowe W.B., McCormack D. "Temperatures in deep grinding of finite workpieces". *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 42 (2002): 53–59.
- [20] Anderson D., Warkentin A., Bauer R. "Experimental validation of numerical thermal models for dry grinding". *Journal of Materials Processing Technology*. 204, 1–3 (2008): 269–278.
- [21] Alonso U., Ortega N., Sanchez J.A., Pombo I., Izquierdo B., Plaza S. "Hardness control of grind-hardening and finishing grinding by means of area-based specific energy". *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. 88 (2015): 24–33.
- [22] Mahdi M., Zhang L. "Applied mechanics in grinding. Part 7: Residual stresses induced by the full coupling of mechanical deformation, thermal deformation and phase transformation". *International Journal of Machine Tools and Manufacturing*. 39 (1999): 1285–1298.
- [23] Mahdi M., Zhang L.C. "Applied mechanics in grinding-V. Thermal residual stresses". *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. 37 (1997): 619–633.
- [24] Fischer W.R., Schwertmann U. "The formation of hematite from amorphous iron (III)hydroxide". *Clays and Clay Minerals*. 23 (1975): 33–37.