

Stanisław MIKUŁA
Politechnika Śląska, Gliwice

ZASTOSOWANIE TECHNOLOGII ŚRUTOWANIA W WYTWARZANIU ELEMENTÓW MASZYN GÓRNICZYCH

Streszczenie. W pracy omówione zostały problemy związane z zastosowaniem umacniania zgniotem powierzchniowym poprzez śrutowanie w technologii wytwarzania maszyn górniczych. Opisany został wpływ podstawowych parametrów na rozwój zniszczeń zmęczeniowych w elementach umacnianych zgniotem powierzchniowym metodą śrutowania oraz skuteczność różnych metod umacniania zgniotem wybranych elementów maszyn górniczych. Zaproponowane zostały nowe sposoby realizacji zabiegu śrutowania o zwiększonej efektywności.

THE APPLICATION OF SHOT PEEN FORMING TECHNOLOGY TO THE ELEMENTS OF THE MINING MACHINES

Summary. The paper deals with present problems of shot peening to the elements of mining machines. There are presented theoretical model of fatigue crack propagation in the shot peened details of machines. The test results of the effectiveness of the strengthen methods upon durability and fatigue life are discussed. New methods for elements of the mining machines strengthen has been proposed.

1. Wprowadzenie

Podczas eksploatacji układów napędowych maszyn górniczych podstawowe ich elementy podlegają niszczącym procesom związanymi z występowaniem zmiennych obciążeń elementów oraz procesami ciernymi i korozyjnymi. Procesy te powodują stałe obniżanie się własności użytkowych maszyn prowadząc w granicznych przypadkach do niespodziewanych awarii o dużych skutkach technicznych i ekonomicznych.

Obserwuje się ciągłe poszukiwania najbardziej efektywnych metod konstrukcyjnych i technologicznych mających na celu zapewnienie możliwie wysokiej trwałości

podstawowych elementów układów napędowych maszyn górniczych. Możliwości, jakie w tym względzie stwarzają typowe materiały konstrukcyjne i tradycyjne metody wytwarzania, zdają się być na wyczerpaniu. Pojawia się więc konieczność poszukiwań takich rozwiązań, które w dziedzinie budowy maszyn górniczych nie są powszechnie stosowane.

Pośród szeregu metod polepszenia własności użytkowych elementów maszyn na uwagę zasługują te, które cechują się szczególnie dużą efektywnością przy możliwych do zaakceptowania kosztach ich realizacji. Do metod tych należą między innymi zabiegi umacniania zgniotem powierzchniowym.

Umacnianie elementów maszynowych poprzez wykorzystanie zgniotu powierzchniowego, zwłaszcza elementów wykonywanych ze stali i staliwa, należy do szczególnie efektywnych w przypadku elementów narażonych na niszczenie zmęczeniowe przy obciążeniach zmiennych o dużej amplitudzie zmian i przy występowaniu intensywnych oddziaływań ciernych i cierno-korozyjnych.

Wzrost trwałości zmęczeniowej elementów stalowych po umacnianiu zgniotem powierzchniowym wynika głównie ze szczególnego oddziaływania uformowanych podczas zabiegu naprężeń własnych (pozostających), które niejako przeciwstawiając się naprężeniom wywoływanym podczas eksploatacji korzystnie zmieniają ostateczny rozkład naprężeń.

Obróbka zgniotem powierzchniowym wykorzystywana jest w produkcji pojazdów mechanicznych (wały korbowe silników spalinowych, koła zębate skrzyń biegów, sprężyny zaworowe, zawory, resory itp.).

Również w maszynach energetycznych (wirmiki turbin, wały pomp, cylindry hydrauliczne, łopatki maszyn wirnikowych) stosowane są różne zabiegi wykorzystujące korzystne efekty uzyskiwane po zastosowaniu umacniania zgniotem powierzchniowym.

W budowie maszyn górniczych stosuje się nagniatanie powierzchni roboczych cylindrów siłowników hydraulicznych oraz w szczególnych sytuacjach śrutowanie elementów ciągien łańcuchowych (najczęściej dotyczy to w zasadzie elementów złącznych).

2. Użytkowe skutki obróbki zgniotem powierzchniowym elementów maszyn

Obecnie znanych jest wiele metod wywoływania zgniotu powierzchniowego na zimno dostosowanych na ogół do określonych sytuacji, zwłaszcza jeśli chodzi o cechy geometryczne umacnianego elementu [1, 2]. Należą one do ogólnych metod obróbki nagniataniem.

W przypadku elementów o złożonym kształcie powierzchni obrabianej najbardziej rozpowszechnione jest umacnianie przez śrutowanie (kulowanie, ubijanie strumieniowe).

Śrutowanie polega na poddaniu obrabianej powierzchni działaniu intensywnego strumienia drobin w postaci kulek stalowych, stalowych, żeliwnych, a nawet szklanych przez określony czas.

W wyniku umacniania zgniotem powierzchniowym poprzez śrutowanie cała powierzchnia obrabiana pokryta zostaje dużą liczbą elementarnych odcisków od pojedynczych drobin (kulek) nachodzących na siebie w taki sposób, że można traktować warstwę wierzchnią obrobionego elementu jako jednorodnie plastycznie odkształconą na określoną głębokość [3].

W wyniku odkształcenia plastycznego w warstwie wierzchniej wywołane zostają naprężenia własne ściskające o zmiennym rozkładzie. Naprężenia te mają umiarkowaną wartość w warstwie przypowierzchniowej, rosną następnie do osiągnięcia wartości maksymalnych na określonej głębokości, następnie maleją aż do zaniku na głębokości, którą uważać można za głębokość umocnienia.

W rdzeniu elementu umacnianego powstają podczas zabiegu jednocześnie równoważące naprężenia rozciągające. Ich wartość jest jednak zdecydowanie mniejsza z uwagi na duży przekrój rdzenia i dlatego nie odgrywają one w praktyce większego znaczenia, zwłaszcza że występują już w strefach przekroju nośnego o na ogół zdecydowanie mniejszym wyężeniu materiału.

Ostateczny efekt zabiegu śrutowania zależy głównie od materiału, rozkładu naprężeń własnych ściskających i głębokości ich zalegania (głębokości umocnienia) [1,3,4].

Jak wykazały teoretyczne analizy i badania doświadczalne autora, skuteczność umacniania zgniotem powierzchniowym (mierzona przyrostem procentowym trwałości zmęczeniowej elementów stalowych po umocnieniu zgniotem) jest tym większa, im większą wartość mają uformowane średnie naprężenia własne ściskające w stosunku do roboczych naprężeń rozciągających, im większa jest głębokość umocnienia w stosunku do głębokości wad powierzchniowych elementu i im mniejsza jest wielkość krytyczna wady (krytyczna głębokość pęknięć) w stosunku do średniej głębokości wad powierzchniowych w strefie krytycznego przekroju rozpatrywanego elementu [4].

W rozwoju pęknięć zmęczeniowych w elementach maszyn umocnionych przez śrutowaniem można wyróżnić cztery etapy o silnie zróżnicowanej prędkości pęknięcia.

Etap I obejmuje okres inkubacji mikropęknięcia, etap II to rozwój pęknięcia o spowolnionej prędkości wskutek oddziaływania naprężeń własnych ściskających, etap III

dotyczy rozwoju pęknięcia do osiągnięcia rozmiarów krytycznych, etap IV – gwałtowny rozwój pęknięcia prowadzący do zniszczenia elementu.

Głębokość umocnienia zgniotem podczas śrutowania zależy w głównej mierze od siły uderzenia każdej z pojedynczych drobin i od stopnia pokrycia obrabianej powierzchni elementarnymi odciskami. Siła uderzenia pojedynczej drobin jest zależna od jej energii kinetycznej, a więc od jej masy i prędkości w chwili uderzenia w obrabianą powierzchnię.

Rozmiary drobin mają bardziej złożony wpływ na skuteczność zabiegu, gdyż ze wzrostem wielkości (średniej średnicy) wzrasta ich masa, ale jednocześnie utrudnione, a często uniemożliwione jest dotarcie drobin w strefy ostrych karbów elementu (zwłaszcza powierzchniowych), ponadto wydatnie rośnie powierzchnia kontaktu drobin z obrabianą warstwą wierzchnią obrabianego elementu.

Również wpływ czasu śrutowania ma złożony charakter; na ogół obserwować można istnienie optymalnego czasu, po przekroczeniu którego efektywność zabiegu spada, niekiedy dość gwałtownie [4].

Wspomniane czynniki powodują, że optymalne parametry zabiegu śrutowania powinny być dobierane w zasadzie indywidualnie dla każdego przypadku na drodze doświadczeń.

Należy wspomnieć, że niekiedy wykonuje się również zabiegi umacniania strumieniem śrutu w cieczy. Obecność cieczy z jednej strony zwiększa nieco energię zderzenia drobin z obrabianą powierzchnią, zmniejsza niekorzystne zjawiska zużycia ściernego elementów urządzeń służących do obróbki (zwłaszcza dysz i wyrzutników drobiwa), ale jednocześnie osłabia efekt końcowy, gdyż umacniające drobiny muszą „przebić się” przez zwilżającą obrabiany przedmiot warstwę cieczy (najczęściej w postaci rzadkiego oleju).

Dużą skutecznością cechuje się nagniatanie obrabianych elementów połączone z jednoczesnym impulsowym przepływem prądu elektrycznego (nagniatanie elektromechaniczne), co daje dodatkowe możliwości konstituowania własności warstwy wierzchniej elementów maszyn [1].

Odporność na zmęczenie jest podstawową własnością użytkową, zmieniającą się korzystnie w wyniku obróbki zgniotem powierzchniowym. Orientacyjny wzrost granicy zmęczenia stali po obróbce tego rodzaju może być wstępnie oszacowany jako proporcjonalny do przyrostu twardości warstwy wierzchniej po zabiegu w stosunku do twardości wyjściowej [6].

W wyniku zabiegu obróbki zgniotem następuje przeniesienie strefy niebezpiecznej, w której mogą być inicjowane ogniska zmęczeniowe w warstwę podpowierzchniową; następuje więc korzystne oddzielenie ognisk zmęczeniowych od powierzchniowych

koncentratorów naprężeń i mikrokarbów chropowatości powierzchni. Funkcję powierzchniowych koncentratorów naprężeń spełniają wszelkiego rodzaju rysy, pęknięcia i przypowierzchniowe wtrącenia niemetaliczne.

Dodatkową zaletą zabiegu śrutowania powierzchni roboczej, np. zębów kół zębatach i czopów łożysk (tak toczone jak i ślizgowych), jest wzrost odporności na zużycie ściernie, gdyż zabieg ten podwyższa wydatnie twardość warstwy wierzchniej. W przypadku pracy powierzchni niesmarowanych zgniot powierzchniowy może jednak niekiedy prowadzić do wzrostu intensywności zużycia ściernego [1].

Obróbka zgniotem powierzchniowym kół zębatach i powierzchni czopów łożysk ślizgowych polepsza odporność na zatarcie między innymi z powodu zmiany potencjału elektrochemicznego odkształconej plastycznie warstwy wierzchniej i korzystniejszych warunków tarcia powierzchni śrutowanych.

Ukształtowany w wyniku śrutowania układ mikronierówności w postaci elementarnych kulistych odcisków korzystnie wpływa na proces smarowania zębów, czopów łożyskowych, elementów krzywkowych itp., tworząc cały układ mikrokieszeni smarnych ułatwiających tworzenie się filmu olejowego. Jak wykazano doświadczalnie, zmniejsza się wówczas współczynnik tarcia poślizgowego i rośnie sztywność kontaktowa, co stanowi bardzo korzystną sytuację w przypadku wysoko obciążonych węzłów tribologicznych maszyn górniczych.

Wymienione czynniki korzystnie wpływają również na odporność na zużycie frettingowe elementów połączeń wpustowych, wielowypustowych, sworzniowych i połączeń przy użyciu pierścieni rozporowych.

Większość metod obróbki zgniotem powierzchniowych zmniejsza średnią wysokość mikronierówności, polepsza się więc końcowa gładkość powierzchni. Układ mikronierówności staje się ponadto bezkierunkowy, co w wielu przypadkach jest korzystne.

Zabieg umacniania zgniotem powierzchniowym kół zębatach może być wykonany po pewnym okresie eksploatacji (najkorzystniej po dotarciu), a nawet wtedy, gdy pojawiły się początki niszczenia pittingowego. Zabieg może być powtarzany ponadto, np. po ściernym zużyciu się umocnionej warstwy materiału.

Dodatkowym korzystnym efektem umacniania zgniotem powierzchniowym przez śrutowanie jest polepszenie odporności korozyjnej w warunkach umiarkowanych oddziaływań korozyjnych.

Szczególnie istotne znaczenie ma to w przypadku elementów pracujących w warunkach oddziaływań korozyjnych zasolonych wód złożowych oraz w obecności gazów postrzałowych [4].

W przypadku kół zębatach o większych modułach wykonywane mogą być zabiegi nagniatania naporowego powierzchni roboczej zębów z wykorzystaniem specjalnych naporowych głowic nagniatających. [1]. Głowica taka współpracuje z obrabianym kołem jak zębnik z dociskiem i jednoczesnym oscylującym przesuwem wzdłuż linii zębów wywołując poprzez nacisk szeregu kulistych występów efekt nagniatania warstwy wierzchniej powierzchni roboczej zębów.

Uzyskana po takim zabiegu reliefowa faktura powierzchni roboczej zęba posiada korzystne własności eksploatacyjne, podobnie jak to ma miejsce w przypadku śrutowania.

Szereg metod umacniania zgniotem powierzchniowym pozwala na pełną lub częściową eliminację niektórych wad poprzednich zabiegów technologicznych, takich jak nadmierna chropowatość powierzchni, niewłaściwa kierunkowość mikronierówności, częściowe odwęglenie warstwy przypowierzchniowej w procesach obróbki cieplnej i cieplno-chemicznej, tzw. przypalenia szlifierskie itp.

Wszystkie metody obróbki zgniotem powierzchniowym elementów maszyn stanowią bardzo dobre przygotowanie powierzchni do nakładania wszelkiego rodzaju pokryć ochronnych [7].

3. Nowe koncepcje zwiększenia skuteczności obróbki zgniotem powierzchniowym elementów maszyn, zwłaszcza kół zębatach

Poszukując sposobów podniesienia skuteczności zabiegów umacniania zgniotem należy mieć na uwadze istnienie szeregu fizycznych ograniczeń wynikających z mechanizmu umacniania zgniotem oraz warunków pracy elementów urządzeń obróbczych.

Prowadzone są próby wykorzystania wielostopniowego śrutowania jako sposobu na polepszenie skuteczności zabiegu. Wielostopniowe umacnianie polega na wykonywaniu zabiegów w kilku etapach przy różnych parametrach, np. przy różnych rozmiarach śrutu [5]. Jest to uzasadnione przy elementach o złożonym kształcie, złożonej strukturze i ostrych krawędziach.

Drobiwo o mniejszych rozmiarach umożliwia lepszy stopień dotarcia w strefy ostrych koncentratorów naprężeń, natomiast większe rozmiary drobin dają silniejszy efekt umocnienia.

Wielostopniowe śrutowanie pozwala na wydatny wzrost efektywności umacniania np. łańcuchów górniczych [5].

W przypadku umacniania zębów kół zębatych, zwłaszcza większych modułów, wykorzystana może być obwiedniowa głowica do dynamicznego nagniatania powierzchni ewolwentowego zarysu zębów.

Głowica taka ma postać wirującej z dużą prędkością obrotową podwójnej tarczy stożkowej o kącie stożka odpowiadającym nominalnemu kątowi przyporu. Posiada ona na stożkowych pobocznicach stożków szereg kulek, np. z węglików spiekanych, które osadzone są luźno w taki sposób, że kulki po uderzeniu w obrabianą powierzchnię mają możliwość przemieszczenia się w głąb tarczy na pewną głębokość.

Po wyjściu kulek z kontaktu z obrabianą flanką zęba siły odśrodkowe odrzucają kulki na wyjściową pozycję zewnętrzną. Zastosowanie sprężyn utrzymujących kulki w pozycji zewnętrznej umożliwia powiększenie siły uderzenia w obrabianą powierzchnię o napięcie sprężyn. Dodatkowo rośnie wtedy czynna masa obrabiająca kulki o część masy sprężyny.

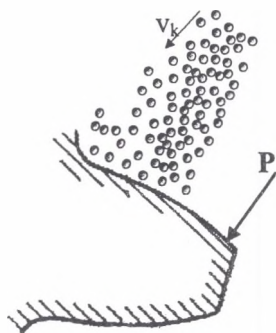
Użycie kulek z węglików spiekanych nie tylko służy wzrostowi twardości kulek i minimalizacji ich zużycia, ale korzystnie kształtuje warunki umacniania wskutek dużej gęstości węglików, i większemu zróżnicowaniu ich potencjału elektrochemicznego, w stosunku do typowych materiałów stosowanych do wytwarzania kół zębatych.

Podczas obróbki opisaną głowicą zapewniony musi być obwiedniowy ruch koła względem tarcz głowicy, tak jak to ma miejsce w obwiedniowych szlifierkach do szlifowania uzębień. Możliwe jest zaadaptowanie szlifierki do kół zębatych dla potrzeb umacniania nagniataniem dynamicznym według opisanego sposobu.

Wydatne polepszenie skuteczności umacniania zgniotem powierzchniowym można uzyskać wykonując zabieg w stanie wstępnego napięcia elementu umacnianego w taki sposób, że wywołane zostają wstępne naprężenia rozciągające w strefie wykonywanego zabiegu. Opisany sposób został doświadczalnie sprawdzony w przypadku łańcuchów górniczych, co pozwoliło znacznie zwiększyć efektywność zabiegu śrutowania [4]. Wspomniany sposób jest też z powodzeniem realizowany dla resorów samochodowych.

W przypadku kół zębatych zabieg tego rodzaju może być wykonywany w taki sposób, że obrabiany śrutowaniem ząb poddawany jest obciążeniu uprzednio odpowiednio dobraną siłą P przyłożoną na głowie zęba w taki sposób, aby u podstawy zęba (a więc w strefie

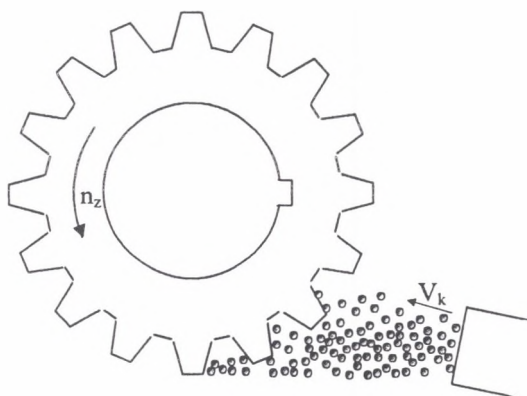
o największym zmęczeniowym zagrożeniu) wywołane zostały wstępne naprężenia rozciągające. Schematycznie zabieg ilustruje rys. 1.



Rys. 1. Schemat proponowanego sposobu śrutowania zębów kół zębatach
Fig. 1. Draft of the device for shot peening of the toothing gears

Po wykonaniu śrutowania powierzchni zęba w stanie wstępnego napięcia i zwolnieniu siły napinającej formowane są naprężenia własne o większej wartości, co zwiększa efektywność zabiegu. Sposób ten nadaje się zwłaszcza dla kół o większych modułach.

Energię uderzenia drobin przy śrutowaniu elementów maszynowych o formie „uzębionej” można zwiększyć nadając obrabianemu elementowi wsteczny ruch obrotowy, to jest ruch w kierunku przeciwnym do kierunku strumienia drobin, co pokazano schematycznie na rys.2.



Rys. 2. Schemat śrutowania kół zębatach z obrotowym ruchem wstępnym koła
Fig. 2. Draft of the device for shot peening of the gear (with rotation)

Prędkość zderzeń jest w tym przypadku sumą prędkości strumienia i prędkości obwodowej koła. W wyniku tego silnie wzrasta energia procesu i intensywność umacniania zgniotem.

Opisany sposób pozwala zachować dużą intensywność umacniania przy zmniejszonej prędkości strumienia drobin oraz ewentualnie zwiększonej prędkości ruchu obrotowego obrabianego elementu. Uzyskuje się w ten sposób zmniejszenie zużycia ściernego elementów śrutownicy i zmniejszenie energochłonności zabiegu.

Dodatkowym efektem opisanego sposobu zwiększenia efektywności jest korzystne oddziaływanie siły odśrodkowej działającej na zęby i częściowo wywołującej wstępne naprężenia rozciągające u podstawy obrabianych zębów kół zębatych.

Opisany sposób obróbki może być stosowany również dla kół łańcuchowych, kół gniazdowych, wałków wielowypustowych, otwartych wirników pomp i wentylatorów oraz innych elementów o podobnej konstrukcji.

Wszystkie zabiegi umacniania zgniotem mają tę dodatkową zaletę, że mogą być wykonywane tak na etapie wytwarzania, jak i po pewnym okresie eksploatacji umożliwiając efektywną regenerację elementów maszyn. Znane są przypadki uzyskiwania lepszych własności użytkowych elementów regenerowanych opisanymi sposobami w stosunku nawet do elementów nowych.

4. Wioski i uwagi końcowe

1. Umacnianie zgniotem powierzchniowym stanowi bardzo efektywny sposób polepszenia własności użytkowych elementów maszyn, szczególnie układów napędowych i elementów łańcuchowych układów ciągnowych pracujących w warunkach intensywnych oddziaływań eksploatacyjnych, zwłaszcza przy dużej zmienności obciążeń i oddziaływaniach cierno-korozyjnych.
2. Zabiegi umacniania zgniotem mogą być realizowane nie tylko na etapie wytwarzania, ale można je powtarzać nawet po pewnym okresie eksploatacji w celu pełnego lub częściowego przywrócenia utraconych własności użytkowych.
3. Elementy umacniane zgniotem powierzchniowym cechują się wieloma korzystnymi z punktu widzenia eksploatacyjnego własnościami użytkowymi, co pozwala podwyższyć trwałość i niezawodność eksploatacyjną maszyn górniczych.
4. Opisane w referacie możliwości podwyższenia skuteczności umacniania zgniotem powierzchniowym powinny skłonić producentów i użytkowników maszyn do

praktycznego ich wykorzystania w celu osiągnięcia istotnych efektów technicznych i ekonomicznych.

LITERATURA

1. Przybylski W., 1987: Technologia obróbki nagniataniem. WNT, Warszawa.
2. Nakoneczny A., Lamprecht E., 1990: Prace z zakresu śrutowania (kulowania, ubijania strumieniowego) części maszyn wykonane i wdrożone przez IMP w przemyśle. Materiały II Konferencji nt. Technologia obróbki przez nagniatanie, Bydgoszcz.
3. Jezierski J., 1977: Metody obliczania głębokości warstwy umocnionej po dogniataniu powierzchniowym. Przegląd Mechaniczny, nr 4 i 5.
4. Mikuła S., 1978: Trwałość zmęczeniowa cięgien łańcuchowych górniczych maszyn urabiających i transportowych. Prace Badawcze CMG KOMAG, Gliwice.
5. Mikuła S., 2002: Wielostopniowe umacnianie zgniotem powierzchniowym elementów maszyn górniczych. Materiały X Konferencji nt. Trwałość elementów i węzłów konstrukcyjnych maszyn górniczych, Gliwice – Ustroń.
6. Stodolnik B., 1984: Durability of rolling bearings after burnishing. Zagadnienia Eksploatacji Maszyn, Kwartalnik PAN, z. 4.
7. Tkaczyk S.(red.), 1997: Powłoki ochronne. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Karol Reich