



<https://doi.org/10.32056/KOMAG/KOMEKO2021.8>

Dynamiczne nagniatanie powierzchni cylindrów hydraulicznych

Jarosław Mikula – Politechnika Śląska

Stanisław Mikula – Politechnika Śląska

Stanisław Szweda – Instytut Techniki Górniczej KOMAG

Marek Szygula – Instytut Techniki Górniczej KOMAG

Streszczenie: Opisano efekty użytkowe uzyskiwane w wyniku operacji nagniatania elementów siłownika hydraulicznego. Oprócz większej trwałości zmęczeniowej elementu, uzyskuje się również pożądane cechy tribologiczne współpracujących powierzchni roboczych cylindrów, korzystnie wpływające na trwałość węzłów uszczelniających, a tym samym na mniejsze zanieczyszczenie środowiska wyciekami cieczy roboczej z siłownika. Zaproponowany został sposób oceny wpływu procesu nagniatania na właściwości zmęczeniowe, wykorzystywany do optymalizacji parametrów procesu umacniania zgniotem. Przedstawiono koncepcję urządzenia służącego do realizacji procesu dynamicznego nagniatania powierzchni wewnętrznych cylindrów w warunkach przemysłowych. Efektywne chłodzenie i smarowanie obrabianej powierzchni, jak również wykorzystanie zjawiska uderzenia hydraulicznego do zwiększenia siły dynamicznego nagniatania, umożliwia uzyskanie, za pomocą omawianego urządzenia, szczególnie korzystnych cech użytkowych siłownika.

Słowa kluczowe: siłownik hydrauliczny, trwałość zmęczeniowa, dynamiczne nagniatanie, zgniot powierzchniowy

Dynamic burnishing of hydraulic cylinder walls

Abstract: The usable effects obtained from the burnishing operation of hydraulic cylinder components are described. In addition to the increased fatigue life of the element, desirable tribological characteristics of the interacting working surfaces of the cylinders are also obtained, favourably affecting the life of the sealing nodes, and thus less environmental pollution is caused by the working fluid escaping from the cylinder. A manner of evaluating the effect of the burnishing process on fatigue properties, used to optimize the parameters of the burnishing strengthening process, is proposed. A concept of a device, used to realize the process of dynamic burnishing of inner surfaces of cylinders in industrial conditions, is presented. Effective cooling and lubrication of the processed surface, as well as the use of the hydraulic impact phenomenon to increase the dynamic pressing force, make it possible to obtain, with the application of the discussed device, particularly advantageous characteristics of the actuator.

Keywords: hydraulic actuator, fatigue life, dynamic burnishing, surface crush.

1. Wprowadzenie

Cylindrom siłowników hydraulicznych stosowanych w górnictwie i budownictwie stawiane są szczególnie wysokie wymagania odnośnie do ich właściwości użytkowych. Siłowniki hydrauliczne wykorzystywane w układach hydrauliki siłowej, a zwłaszcza cylindry stojaków hydraulicznych sekcji obudowy zmechanizowanej, stosowanych w górnictwie węgla kamiennego i innych kopalni użytecznych, narażone są na obciążenie zmienne o szczególnie niekorzystnych parametrach [1]. Dotyczy to zwłaszcza siłowników hydraulicznych zainstalowanych w wyrobiskach zagrożonych występowaniem wstrząsów górotworu i tąpnięć. Cechy użytkowe siłowników stosowanych w układzie podpornościowym sekcji obudowy zmechanizowanej są przedmiotem licznych badań [2, 3, 4], gdyż niezawodność układu podpornościowego sekcji ma zasadniczy wpływ na bezpieczeństwo stanowiskowe i procesowe w górnictwie podziemnym. Wynikają stąd szczególnie wysokie wymagania odnośnie do wytrzymałości doraźnej, trwałości zmęczeniowej i sztywności cylindrów.



Cylindry siłowników muszą jednocześnie cechować się wysokimi właściwościami plastycznymi, gdyż ich ewentualne zniszczenie eksploatacyjne nie może mieć charakteru kruchego pęknięcia skutkującego natychmiastową utratą podporności i generującego dodatkowe obciążenie dynamiczne innych elementów układu podpornościowego. Wysokie wymagania dotyczą zwłaszcza odporności cylindrów hydraulicznych na zarodkowanie i rozwój pęknięć o charakterze zmęczeniowym.

Duże znaczenie, zwłaszcza dla szeroko rozumianej ochrony środowiska mają właściwości tribologiczne powierzchni siłownika hydraulicznego współpracujących z węzłami uszczelniającymi. Wewnętrzne powierzchnie cylindrów współpracujące z wysokociśnieniowymi uszczelnieniami narażone są na degradujące procesy tribologiczne i korozyjne, które powodują szkodliwe przecieki medium roboczego, jakim zasilane są siłowniki w górnictwie. Przecieki emulsji wodno-olejowej powodują zagrożenie ekologiczne w postaci skażenia wód podziemnych, które pompowane na powierzchnię zanieczyszczają wody powierzchniowe. Powstające przecieki w węzłach uszczelniających generują ponadto straty ekonomiczne związane z koniecznością uzupełniania cieczy roboczej w układzie hydraulicznym sekcji. Na szczelność węzłów uszczelniających, szczególnie badaną zgodnie z wymaganiami normy PN-EN 1804-2 [5], znaczący wpływ ma gładkość powierzchni wewnętrznej cylindra, uzyskiwana poprzez zabiegi dynamicznego nagniatania, dokładnego toczenia lub szlifowania. W odróżnieniu od metod dynamicznego nagniatania, stosowanych obecnie, urządzenie obróbcze opisane w niniejszej monografii, dzięki korzystnym cechom tribologicznym współpracujących powierzchni eliminuje występowanie respirabilnych frakcji pyłu metalicznego generowanych podczas dynamicznego nagniatania i zanieczyszczających drogi oddechowe.

Możliwość ograniczenia wspomnianych procesów niszczących zapewnia wykorzystanie zgniotu powierzchniowego dla polepszenia właściwości trwałościowych cylindrów. Celem niniejszego rozdziału jest przedstawienie wpływu procesu nagniatania warstwy wierzchniej cylindra hydraulicznego na poprawę trwałości zmęczeniowej i jakości tribologicznej powierzchni roboczych cylindra, co skutkuje osiągnięciem korzystnych efektów użytkowych. Parametry zabiegu umacniania warstwy wierzchniej zgniotem można optymalizować korzystając z omówionego w niniejszej pracy, sposobu oceny wpływu nagniatania na właściwości zmęczeniowe.

Proces dynamicznego nagniatania powierzchni wewnętrznych cylindrów hydraulicznych można zrealizować w warunkach przemysłowych za pomocą urządzenia, którego koncepcję przedstawiono w niniejszym rozdziale. Za pomocą tego urządzenia można uzyskać szczególnie korzystne efekty nagniatania, dzięki efektywnemu chłodzeniu i smarowaniu obrabianej powierzchni oraz wykorzystaniu uderzenia hydraulicznego do zwiększenia siły nagniatania.

2. Efekty użytkowe umacniania zgniotem powierzchni elementów maszyn i urządzeń

Obróbka zgniotem powierzchniowym nazywana również nagniataniem polega na wywołaniu w warstwie o ograniczonej głębokości odkształceń plastycznych „na zimno” tzn. w temperaturze mniejszej od temperatury rekrytalizacji struktury materiału umacnianego metalowego elementu maszynowego. W wyniku zabiegu nagniatania w warstwie wierzchniej poddanej zgniotowi występuje duża anizotropia struktury materiału i jego cech mechanicznych oraz ma miejsce szereg istotnych zmian strukturalnych i własności fizyko-chemicznych wpływających na cechy użytkowe elementów. Jako zabieg technologiczny obróbka zgniotem powierzchniowym znana jest od dawna [6, 7]. Zakres wykorzystywania nagniatania w praktyce wytwarzania elementów maszynowych jest jednak niewielki, a w przypadku maszyn i urządzeń górniczych technologia ta stosowana jest marginalnie, mimo szeregu bardzo korzystnych efektów osiąganych niewielkim nakładem energii i robocizny.



W praktyce przemysłowej najczęściej stosowany jest zabieg w postaci śrutowania (inaczej kuleczkowania) polegający na działaniu strumienia kulek stalowych, żeliwnych lub szklanych padających na umacnianą powierzchnię z dużą prędkością [8]. Do miotania strumieni kulek wykorzystywane jest sprężone powietrze lub wirnikowe wyrzutniki mechaniczne [7, 8].

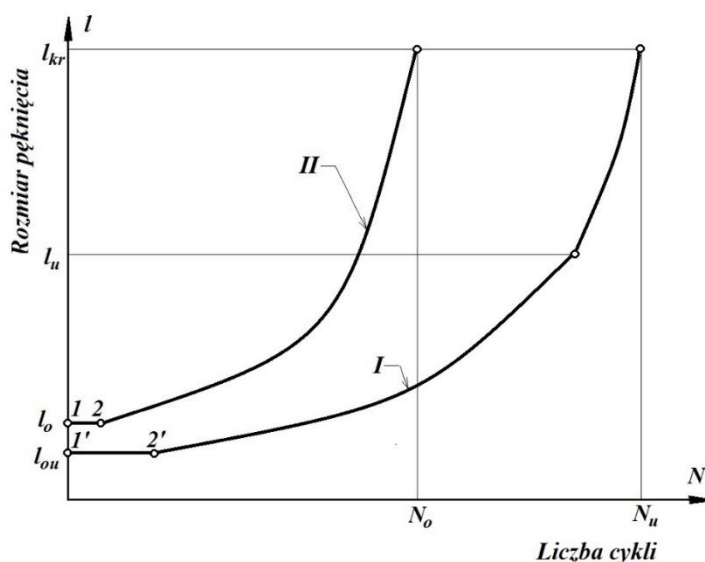
Warunkiem uzyskania pełnych efektów obróbki nagniataniem jest uzyskanie możliwie dużej głębokości zgniotu. Z tego względu śrutowanie jest niewystarczające dla potrzeb umacniania elementów wykonanych ze stali i staliwa poddanych uprzednio utwardzającej obróbce cieplnej lub cieplno-chemicznej. Nie umożliwia ono bowiem uzyskania dostatecznej energii elementów nagniatanych. W przypadku pneumatycznych sposobów miotania kulek, energię kinetyczną strumienia limituje fizycznie uzasadnione ograniczenie prędkości strumienia. Uzyskanie większej energii strumienia kulek poprzez zwiększenie masy kulki (a więc i średnicy) jest również niekorzystne, gdyż zwiększa się wtedy powierzchnia kontaktu z obrabianą powierzchnią. Ograniczeniu ulegają więc lokalne naciski stykowe niezbędne dla wywołania zgniotu na żadaną głębokość. Ponadto kulki o większej średnicy z większą trudnością docierają do stref karbów i defektów powierzchniowych. Zwiększenie prędkości strumienia za pomocą wyrzutników wirnikowych skutkuje gwałtownym zwiększeniem tempa zużycia wirników oraz zwiększoną tendencją do generowania drobnodispersyjnego pyłu metalicznego, co stwarza zagrożenie wybuchem pyłu oraz jest bardzo niekorzystne ze względów ekologicznych i zdrowotnych. Częściowa eliminacja wspomnianych zagrożeń poprzez podawanie umacniających kulek w strumieniu cieczy ma również swoje ograniczenia. Z jednej strony porcja cieczy bezpośrednio związana z padającą kulką powoduje pozorne zwiększenie masy kulki, ale z drugiej strony zwilżenie obrabianej powierzchni cieczą utrudnia wywołanie dostatecznie dużych nacisków stykowych, gdyż kulki „przebijając się” przez warstwę cieczy tracą część energii kinetycznej. Przy dużej prędkości odkształcania, warstwa cieczy silnie zmniejsza lokalne naciski stykowe. W opisanym przypadku elementów stalowych, zwłaszcza ze stali stopowych o zwiększonej twardości, dostatecznie dużą głębokość zgniotu powierzchniowego można uzyskać stosując naporowe sposoby nagniatania [9] oraz urządzenia o działaniu dynamicznym.

Pod wpływem zgniotu zwiększa się silnie gęstość dyslokacji w warstwie umocnionej [10]. Z każdą dyslokacją jest związane pole naprężeń sieci krystalicznej metalu. Blokują one ruch pozostałym dyslokacjom i ograniczają możliwości inkubacji pęknięć zmęczeniowych [11]. Zgniot powoduje przemianę austenitu szczałkowego, pozostającego w strukturze stali po obróbce cieplnej, na składniki strukturalne właściwe dla stali po hartowaniu. Struktury powstałe z przemiany austenitu szczałkowego mają zwiększoną objętość właściwą [12, 13]. Prowadzi to, wraz z efektem rozdrobnienia struktury w wyniku zgniotu, do uformowania się stanu naprężeń własnych ściskających w warstwie zgniecionej i bezpośrednio pod nią. Strefa ściskających naprężeń własnych w głównej mierze przyczynia się do wydatnego wzrostu odporności na pęknięcie zmęczeniowe [14]. Jej dodatkowym atutem jest swoista neutralizacja nieuniknionych defektów powierzchniowych elementów maszyn. Takie defekty jak rysy obróbcze zostają zniwelowane, powierzchniowe wtrącenia niemetaliczne podlegają wykruszeniu, a wtrącenia podpowierzchniowe są poddane fragmentacji i spłaszczeniu. Dotyczy również to pęcherzy gazowych, podpowierzchniowych i sięgających powierzchni elementu umacnianego. W przypadku elementów obrotowych poddawanych obróbce skrawaniem, obróbka zgniotem powierzchniowym zwiększa odporność na zarodkowanie pęknięć zmęczeniowych, gdyż w wyniku zgniotu likwidowany jest obwodowy układ mikronierówności obróbczych. Ma to szczególne znaczenie dla elementów, które przenoszą zmienne obciążenie wzdłużne od rozciągania lub zginania.

Duży wzrost trwałości zmęczeniowej elementów powodują następujące czynniki uzyskiwane dzięki nagniataniu:

- zmniejszenie średnich rozmiarów defektów powierzchniowych (dotyczy to głównie ich głębokości),
- wydłużenie okresu inkubacji mikropęknięć zmęczeniowych wskutek wpływu naprężeń własnych ściskających od nagniatania,
- zmniejszenie prędkości rozwoju zaistniałych już pęknięć zmęczeniowych rozwijających się pod działaniem rozciągających naprężeń roboczych pomniejszonych o stałe naprężenia własne ściskające występujące w strefie, której głębokość jest większa od głębokości zgniotu powierzchniowego, średnio o ok. 20% [15].

Wymienione czynniki powodują, że w przypadku elementu umocnionego zgniotem, liczba cykli zmiennych naprężeń roboczych, niezbędna do wywołania pęknięcia o krytycznych rozmiarach powodujących pełne zniszczenie, jest znacznie większa od liczby cykli obciążenia powodującej zniszczenie elementu nie umocnionego zgniotem powierzchniowym. Schematycznie ilustruje to rysunek 1.



Rys. 1. Schematyczny przebieg rozwoju pęknięcia zmęczeniowego

- I* – przebieg rozwoju pęknięcia w elemencie umocnionym zgniotem,
- II* – przebieg rozwoju pęknięcia w elemencie nieumocnionym zgniotem,
- 1-2 – okres inkubacji pęknięcia w elemencie nieumocnionym,
- 1'-2' – okres inkubacji pęknięcia w elemencie poddanym umocnieniu zgniotem powierzchniowym na głębokość l_u ,
- l_o – średni rozmiar defektu powierzchniowego w elemencie nieumocnionym,
- l_{ou} – średni rozmiar (głębokość) defektu powierzchniowego po zabiegu umacniania zgniotem,
- l_u – głębokość zalegania naprężeń własnych ściskających wywołanych zabiegiem umacniania,
- l_{kr} – krytyczny rozmiar pęknięcia zmęczeniowego,
- N_o – trwałość zmęczeniowa elementów bez umocnienia,
- N_u – trwałość zmęczeniowa elementów po zabiegu umocnienia zgniotem powierzchniowym.

Trwałość zmęczeniową elementów z umocnieniem zgniotowym i bez takiego umocnienia można w przybliżeniu oszacować ilościowo, korzystając z tzw. prawa Parisa opisującego prędkość rozwoju pęknięć zmęczeniowych [11]. Z technicznie wystarczającą dokładnością można określić trwałość



zmęczeniową elementu korzystając z dogodniejszej formuły opracowanej przez Frosta – Dugdala. Ma ona postać równania różniczkowego sformułowanego przy założeniu ciągłości funkcji wzrostu pęknięć zmęczeniowych (ze swej natury funkcja ta jest funkcją dyskretną):

$$\frac{dl}{dN} = C \cdot l \cdot \sigma_a^m \quad (1)$$

gdzie:

- $\frac{dl}{dN}$ – przyrost wielkości (głębokości) pęknięcia zmęczeniowego odniesiony do przyrostu liczb cykli zmian naprężeń o amplitudzie σ_a ,
l – bieżąca wielkość (głębokość) pęknięcia zmęczeniowego,
C – stała zależna od proporcji kształtu pęknięcia zmęczeniowego,
m – wykładnik potęgowy; dla stali: $m = 3$ [11].

Całkując zależność (1) można określić liczbę cykli zmian naprężeń N_o odpowiadającą przyrostowi pęknięcia od wielkości – l_o reprezentującej rozmiar (głębokość) defektu powierzchniowego, do wielkości l_{kr} odpowiadającej rozmiarowi pęknięcia, od którego rozwija się ono w sposób gwałtowny, prowadzący do pełnego zniszczenia elementu pod działaniem pojedynczych cykli zmian obciążenia:

$$N_o = \int_{l_o}^{l_{kr}} \frac{dl}{C \cdot l \cdot \sigma_a^m} \quad (2)$$

W przypadku, gdy wielkość naprężeń amplitudalnych jest stała, to:

$$N_o = \frac{1}{C \cdot \sigma_a^m} \int_{l_o}^{l_{kr}} \frac{dl}{l} = \frac{1}{C \cdot \sigma_a^m} \cdot \ln \frac{l_{kr}}{l_o} \quad (3)$$

Jeżeli pominąć stosunkowo krótki okres inkubacji pęknięcia zmęczeniowego, to N_o można traktować jako trwałość zmęczeniową elementu.

Przyjęcie stałości naprężeń amplitudalnych chociaż jest dużym uproszczeniem, jest uzasadnione w przypadku, gdy gabaryty rozpatrywanego przekroju nośnego elementu są duże w porównaniu z krytycznym rozmiarem pęknięcia – l_{kr} . W rzeczywistych warunkach na ogół, gdy zwiększa się bieżąca głębokość pęknięcia zmęczeniowego, to amplituda naprężeń zmiennych rośnie, nawet przy stałości obciążenia roboczego. Sukcesywnie zmniejsza się bowiem przekrój nośny oraz coraz silniejszy jest wpływ karbu wywołanego pęknięciem. Przyjęcie do rozważań stałości naprężeń amplitudalnych jest dodatkowo uzasadnione tym, że wspomniany sukcesywny przyrost naprężeń wraz z postępującym pękaniem zmęczeniowym, dotyczy w bardzo zbliżony sposób rozważanego elementu umocnionego zgniotem i takiego samego elementu maszynowego bez umocnienia. Określenie rzeczywistej zmienności σ_a jest bardzo utrudnione. Stąd też w rozważaniach porównawczych trwałości zmęczeniowej wspomniane uproszczenie jest uzasadnione.

W elemencie umocnionym przez nagniatanie powstała strefa naprężeń własnych ściskających o średniej wartości σ_w , sięgająca w głąb materiału na głębokość l_u . W związku z tym liczba cykli – N_u przy której pęknięcie zmęczeniowe rozwine się od wielkości – l_{ou} , poprzez głębokość umocnienia – l_u do rozmiaru krytycznego – l_{kr} będzie sumą dwóch całek:



$$N_u = \int_{l_{ou}}^{l_u} \frac{dl}{C \cdot l \cdot (\sigma_a - \sigma_w)^m} + \int_{l_u}^{l_{kr}} \frac{dl}{C \cdot l \cdot \sigma_a^m} \quad (4)$$

Czyli:

$$N_u = \frac{1}{C} \cdot \left(\frac{1}{(\sigma_a - \sigma_w)^m} \cdot \ln \frac{l_u}{l_{ou}} + \frac{1}{\sigma_a^m} \cdot \ln \frac{l_{kr}}{l_u} \right) \quad (5)$$

Przy czym:

$$|\sigma_w| < |\sigma_a|$$

Warunek ten jest spełniony w przypadku typowych metod nagniatania elementów pracujących przy dużej amplitudzie naprężeń od obciążeń roboczych. Głębokość umocnienia – l_u może być określona poprzez pomiar mikrotwardości na przekroju poprzecznym elementu [16], wartość naprężeń własnych można wyznaczyć metodą rentgenograficzną. Wielkość rozmiaru defektów powierzchniowych – l_o dla elementów nieumocnionych lub – l_{ou} dla umocnionych zgniotem, można wyznaczyć z wykorzystaniem pomiarów mikroskopowych. Obliczenie z zależności (5) liczby cykli N_u oraz z zależności (4) liczby cykli N_o wymaga wyznaczenia stałej C w toku pracochłonnych badań doświadczalnych. Wyznaczenie stałej C nie jest konieczne, jeśli operować ilorazem – η wymienionych liczb cykli:

$$\eta = \frac{N_u}{N_o} \quad (6)$$

Wartość wskaźnika – η może być traktowana jako miara skuteczności nagniatania z punktu widzenia poprawy właściwości zmęczeniowych elementów umocnionych poprzez nagniatanie. Wykorzystując zależność (4) i (5) po przekształceniu uzyskuje się:

$$\eta = \frac{\left(\frac{\sigma_a}{\sigma_a - \sigma_w} \right)^m \cdot \ln \left(\frac{l_u}{l_{ou}} \right) + \ln \left(\frac{l_{kr}}{l_u} \right)}{\ln \left(\frac{l_{kr}}{l_o} \right)} \quad (7)$$

Wielkość krytycznego pęknięcia zmęczeniowego – l_{kr} , występującą we wzorze (7), można określić znając krytyczną wartość intensywności naprężeń – K_{Ic} określaną metodami mechaniki pękania i traktowaną jako jedna z właściwości mechanicznych charakteryzujących dany materiał w określonym stanie strukturalnym. [8]:

$$l_{kr} = \frac{K_{Ic}^2}{\sigma_a} \quad (8)$$

Z zależności (7) wynika, że wzrost trwałości zmęczeniowej uzyskanej w wyniku nagniatania będzie większy, gdy:

- bezwzględna wartość naprężeń własnych ściskających – σ_w będzie większa przy tej samej amplitudzie naprężeń roboczych – σ_a ,
- większa będzie głębokość umocnienia – l_u , na której ukonstruowane zostały naprężenia własne ściskające – σ_w ,
- materiał zastosowany na element umacniany zgniotem będzie cechował się dużą krytyczną wartością współczynnika intensywności naprężeń – K_{Ic} , zapewniającą dużą wartość krytycznej wielkości pęknięcia zmęczeniowego – l_{kr} ,



- d) możliwie najmniejsze będą rozmiary defektów materiałowych, zwłaszcza powierzchniowych takich jak: rysy obróbcze, wtrącenia niemetaliczne, pęcherze gazowe i inne.

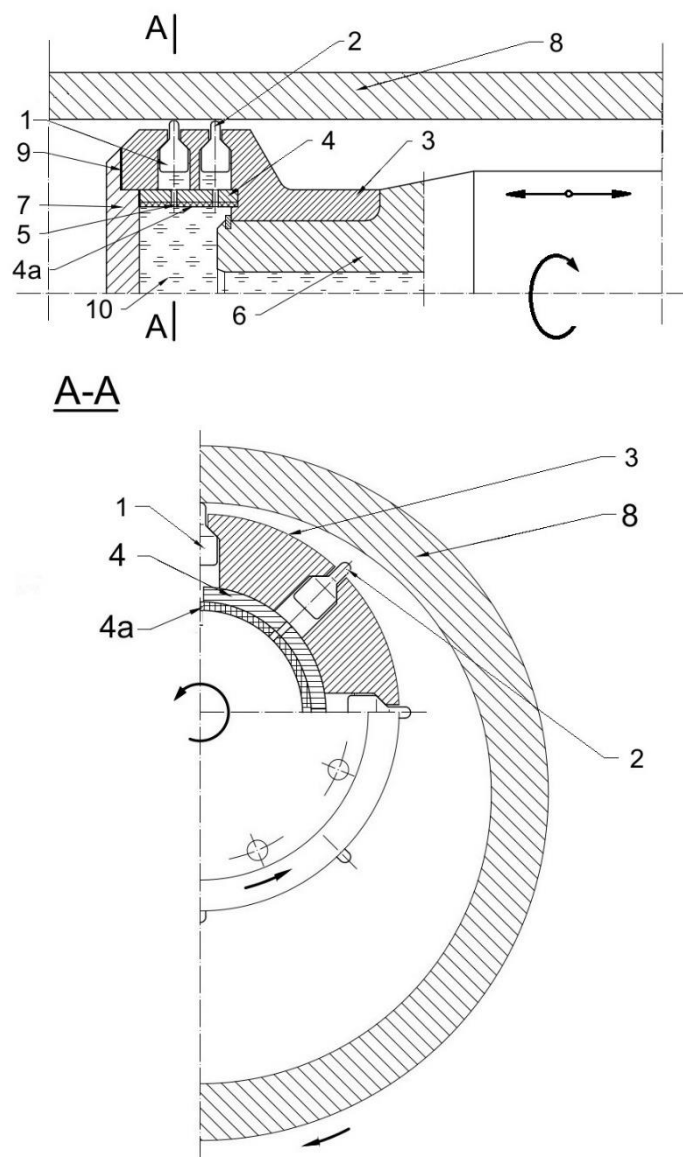
Wymagania a) i b) oraz częściowo d) w największym stopniu mogą być spełnione przy zastosowaniu dynamicznych metod nagniatania.

Oprócz głównego efektu użytkowego, jakim jest poprawa właściwości zmęczeniowych, nagniatanie umożliwia uzyskanie też innych efektów, korzystnych w warunkach różnych zastosowań. Dla elementów pracujących w warunkach tarcia, istotne jest zmniejszenie współczynnika tarcia poślizgowego w warunkach tarcia technicznie suchego nawet o 50% [17]. Dla elementów smarowanych korzystne jest uzyskiwanie w wyniku nagniatania, zwłaszcza dynamicznego, swoistego reliefu powierzchni w postaci kulistych lub elipsoidalnych płytkich zagłębień nachodzących na siebie, a spełniających funkcję kieszeni smarnych, zwiększających przyczepność smarów. Zwiększenie twardości warstwy wierzchniej elementów, uzyskiwane w wyniku obróbki zgniotem powierzchniowym, służy polepszeniu odporności na zużycie ściernie tak w warunkach smarowania jak i przy tarcu suchym [9]. Nagniatanie warstwy wierzchniej elementów, w przypadku których jako obróbkę wykańczającą zastosowano szlifowanie, powoduje wykruszanie ziaren ściernych, które często zostają przez ściernice zainkludowane w obrabianej warstwie. Usunięcie tych szkodliwych zanieczyszczeń powierzchni dodatkowo zwiększa walory tribologiczne warstwy wierzchniej elementów nagniatanych. Nagniatanie może być też wykorzystane dla przygotowania powierzchni do nałożenia różnego rodzaju pokryć ochronnych, w tym antykorozyjnych i przeciwciernych.

Istotnym warunkiem pełnej skuteczności zabiegów obróbki zgniotem jest zapewnienie efektywnego chłodzenia, aby nie dopuścić do niekorzystnych procesów rekrytalizacji struktury materiału umacnianych elementów i relaksacji naprężeń własnych wywołanych zabiegami. Należy mieć również na uwadze, że nadmierny stopień zgniotu może powodować pogorszenie efektów obróbki w postaci łuszczenia się warstwy o nadmiernym zgniocie i pogorszenie gładkości. Stąd też optymalne parametry zabiegu nagniatania należy ustalić w toku prób dla danego rodzaju materiału elementów umacnianych i dla danego sposobu obróbki zgniotem.

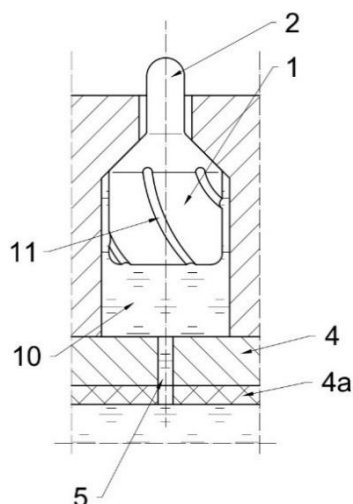
3. Urządzenie do dynamicznego nagniatania powierzchni wewnętrznej cylindrów układów hydraulicznych

Dla spełnienia częściowo sprzecznych wymagań odnośnie do dużej sztywności, plastycznej charakterystyki odkształceń, odporności na obciążenie zmienne i wysokiej jakości tribologicznej powierzchni wewnętrznej cylindrów siłowników hydraulicznych stosowanych, między innymi w układzie podpornościowym sekcji obudowy zmechanizowanej, pomocne może być urządzenie do dynamicznego nagniatania, którego koncepcję, chronioną patentem [18] opracowano w Politechnice Śląskiej i ITG KOMAG. Celem zwiększenia efektywności nagniatania urządzenie wykorzystuje dynamiczne oddziaływanie mechaniczne połączone z efektem uderzenia hydraulicznego [18]. Rysunek 2 ilustruje przekrój wzdłużny i poprzeczny zasadniczego zespołu urządzenia w wariantcie ze zdwojonym szeregiem bijaków umacniających, natomiast na rysunku 3 przedstawiono szczegół bijaka umacniającego ze spiralnymi rowkami.



Rys. 2. Głowica do dynamicznego nagniatania cylindrów hydraulicznych

1 – bijak, 2 – końcówka nagniatająca, 3 – oprawa, 4 – pierścień, 4a – pierścień regulacyjny, 5 – otwór, 6 – wał napędowy, 7 – pokrywa, 8 – obrabiany cylinder, 9 – uszczelka, 10 – ciecz chłodząco-smarująca



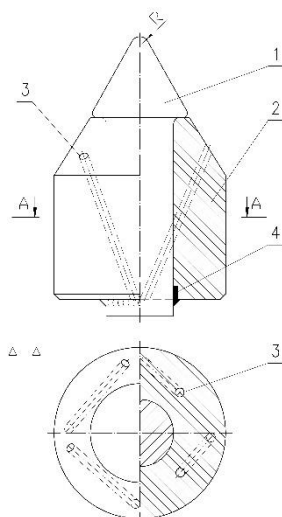
Rys. 3. Szczegół wariantu bijaka do dynamicznego nagniatania

1 – trzon bijaka, 2 – końcówka nagniatająca, 4 – pierścień z dyszami dławiącymi, 5 – dysza, 4a – pierścień regulacyjny, 11 – spiralne rowki dla obrotów bijaka, 10 – ciecz chłodząco-smarująca [18]

Opracowując projekt koncepcyjny urządzenia przedstawionego na rysunku 2 założono, że średnica obiegu bijaków stanowi $25 \div 35$ % średnicy wewnętrznej obrabianego cylindra. Promień części roboczej bijaka powinien mieścić się w przedziale $2 \div 3$ mm. Założono, że końcówki robocze bijaków będą uderzały o obrabianą powierzchnię cylindra z prędkością $60 \div 100$ m/s.

Ciecz chłodząco-smarująca 10 o ciśnieniu $200 \div 400$ kPa wypełnia przestrzeń wewnętrzną urządzenia. Pełni ona funkcję sprężyny hydraulicznej, której sztywność zależy od luzów osadzenia bijaków w oprawie i oporu hydraulicznego dysz wykonanych w pierścieniu 4. Opór ten jest regulowany poprzez obrót pierścienia regulacyjnego 4a. Po wyjściu ze strefy uderzenia bijaki wskutek działania siły odśrodkowej i ciśnienia podawanej cieczy wracają w położenie wyjściowe. Jednocześnie ciecz w przestrzeniach pod bijakami uzupełniana jest przez dysze w pierścieniu 4.

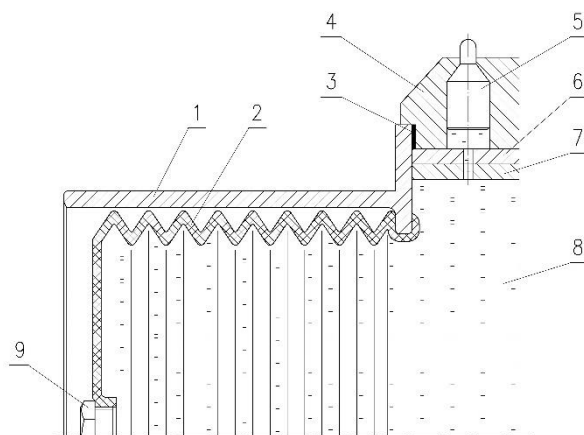
Impulsowy wypływ cieczy powoduje, dzięki spiralnym rowkom 11 na poboczniczy bijaków, powstanie reakcyjnego momentu obrotowego, dzięki któremu bijaki obracają się sukcesywnie względem osi (rys. 3). Służy to zapewnieniu równomierności zużywania się kulistych powierzchni roboczych bijaków. W toku nagniatania następuje stały obrót obrabianego cylindra 8 wokół osi i wzajemny ruch posuwisty urządzenia nagniatającego względem obrabianego cylindra. Bijaki umacniające należy wykonać ze stali o dużej twardości lub z węglików spiekanych. Rysunek 4 ilustruje alternatywną postać bijaków w wersji zespolonej.



Rys. 4. Wariant bijaka zespolonego

- 1 – część robocza z węglików spiekanych, 2 – osłona bijaka z brązu ołowiuowego, 3 – otwory wchrowate,
4 – połączenia lutownicze lutem twardym

Część robocza bijaka zespolonego – 1 wykonana jest z węglików spiekanych, a osłona bijaka 2 z brązu ołowiuowego zapewniającego korzystne warunki współpracy bijaków z oprawą wykonaną ze stali (poz. 3, rys. 2). Obracanie się bijaków wokół osi dla tego zespolonego wariantu zapewniają otwory 3, wykonane wchrowato względem osi bijaków. Dzięki budowie zespolonej zwiększa się średnia gęstość materiału bijaków, co sprawia, że siła uderzenia bijaka w trakcie obróbki nagniataniem dynamicznym jest większa, poprawiając skuteczność obróbki. Dzięki chłodzącemu działaniu cieczy odbierane jest ciepło, na które zamienia się praca odkształcania plastycznego materiału obrabianego cylindra. Działanie smarujące służy polepszeniu jakości powierzchni obrabianej oraz zmniejsza zużycie elementów układu. Zasilania urządzenia cieczą chłodząco-smarującą poprzez drążony wał, kłopotliwe w praktycznym stosowaniu, można zastąpić stosując, na przykład, elastyczny pojemnik przedstawiony na rysunku 5.



Rys. 5. Alternatywny sposób zasilania głowicy dynamicznego nagniatania cieczą chłodząco-smarującą

- 1 – tuleja ochronna, 2 – harmonijkowy zasobnik cieczy, 3 – uszczelnienie, 4 – oprawa bijaków, 5 – bijak, 6 – pierścień z dyszami dławiącymi, 7 – pierścień regulujący dławienie dysz, 8 – emulsja wodno-olejowa, 9 – korek do napełniania zasobnika cieczy



Pojemnik 2 jest okresowo napełniany cieczą po odkręceniu korka 9 [19]. Podczas pracy urządzenia, wypływ cieczy ze strefy pod bijakami sprawia, że ciecz z pojemnika jest sukcesywnie wyciągana, a zasobnik pod wpływem ciśnienia atmosferycznego składa się w harmonijkę. Tuleja 1 zabezpiecza pojemnik przed utratą stateczności w czasie wirowania. Ponadto masowy moment bezwładności pojemnika z cieczą i tulei 1 stabilizuje pracę całego układu nagniatającego.

Impulsowy wypływ cieczy ze strefy pod bijakami w trakcie pracy urządzenia sprawia, że w wyniku nagniatania dynamicznego wspomaganego efektem uderzenia hydraulicznego uzyskuje się zwiększoną głębokość zgniotu powierzchniowego i wzrost wartości średniej naprężeń własnych ściskających powstających w umacnianej warstwie. Powoduje to znaczny przyrost trwałości zmęczeniowej umacnianych cylindrów. Parametry zabiegu nagniatania mogą być regulowane w bardzo szerokich granicach. Opracowując koncepcję urządzenia przyjęto, że posuw wzdłużny głowicy przypadający na jeden obrót cylindra, wynosi $1 \div 2$ mm. Optymalne parametry pracy urządzenia do nagniatania, takie jak: prędkość obrotowa głowicy nagniatającej i obrabianego cylindra, prędkość posuwu wzdłużnego oraz stopień dosunięcia głowicy do obrabianej powierzchni, krotność przejść obróbczych, należy dobrać na podstawie prób w zależności od średnicy wewnętrznej cylindra, rodzaju i twardości materiału jak też oczekiwanego końcowego efektu obróbki zgniotem. Wstępnie parametry zabiegu należy tak dobrać, aby cała obrabiana powierzchnia cylindra została pokryta zachodzącymi na siebie elipsoidalnymi mikro odciskami o zadawalającej wysokości mikrochropowatości i stopniu pokrycia.

Zabieg dynamicznego nagniatania może być stosowany, zarówno w produkcji nowych cylindrów, jak też w procesie regeneracji cylindrów, dla przywrócenia pełnej zdatności użytkowej po określonym stopniu zużycia eksploatacyjnego. Realizacja zabiegu może się odbywać z wykorzystaniem odpowiedniej tokarki po jej adaptacji. Zabieg wykonywany może być przy poziomym usytuowaniu osi cylindra, jak również w układzie pionowym po adaptacji np. frezarki pionowej lub dużej wiertarki słupowej.

4. Podsumowanie

Polepszenie wielu cech użytkowych cylindrów siłowników hydraulicznych, zwłaszcza stosowanych w układzie podpornościowym sekcji obudowy zmechanizowanej można uzyskać wykorzystując zabieg nagniatania, przy dużej jego intensywności. W szczególności uzyskuje się znaczną poprawę odporności na procesy zmęczeniowe i niszczące wpływy tribologiczne występujące w trakcie użytkowania siłowników hydraulicznych. Tym samym zabieg nagniatania powierzchni cylindra przyczynia się do większego bezpieczeństwa użytkowania siłowników. Nie bez znaczenia jest również większa trwałość węzłów uszczelniających zapobiegająca zanieczyszczeniu środowiska przez wyciek emulsji wodno-olejowej.

Wskaźnik η oraz wytyczne szczegółowo sformułowane w rozdziale 2 umożliwiają optymalny dobór parametrów warstwy wierzchniej cylindra hydraulicznego, wzmocnionej przez nagniatanie ze względu na kryteria uzyskania zwiększonej trwałości zmęczeniowej.

Urządzenie do przemysłowej realizacji dynamicznego nagniatania powierzchni wewnętrznej cylindra siłownika hydraulicznego, którego koncepcję zaprezentowano w niniejszym rozdziale, dzięki wykorzystaniu zjawiska uderzenia hydraulicznego, umożliwia uzyskanie większej głębokości zgniotu powierzchniowego i powstanie w umacnianej warstwie strefy naprężeń własnych ściskających o znacznie korzystniejszych parametrach. Szczegółowe badania dotyczące optymalnego doboru parametrów pracy omawianego urządzenia, uzyskiwanej głębokości zgniotu powierzchniowego oraz wpływu operacji nagniatania powierzchni wewnętrznej cylindra na właściwości użytkowe siłownika



hydraulicznego zostaną przeprowadzone po wykonaniu prototypu urządzenia. Ich wyniki będą przedmiotem odrębnego opracowania.

Jakkolwiek problem znaczenia dynamicznego nagniatania powierzchni elementów maszyn przedstawiono w niniejszej pracy na przykładzie siłowników hydraulicznych sekcji obudowy zmechanizowanej, to możliwości korzystnego zastosowania tego zabiegu znacznie wykraczają poza górnictwo węgla kamiennego. Wymagania dotyczące zwiększonej trwałości zmęczeniowej oraz korzystnych cech tribologicznych powierzchni cylindra współpracującej z węzłami uszczelniającymi są formułowane również w odniesieniu do siłowników hydraulicznych użytkowanych w innych gałęziach gospodarki. Praktyczne zastosowanie przedstawionych wytycznych i wariantowych urządzeń do dynamicznego nagniatania powierzchni wewnętrznej cylindrów może więc przynieść wiele istotnych efektów technicznych i ekonomicznych oraz posłużyć wzrostowi bezpieczeństwa użytkowania siłowników hydraulicznych.

Literatura

1. Lech T.: Pressure pulsations in power hydraulics systems. *Min. Mach.* 2020. 4 s. 34-42
2. Szurgacz D., Więcek P., Brodny J.: Badania nieszczelności wewnętrznej stojaka zmechanizowanej obudowy ścianowej. *Bezp. Pr. Ochr. Śr. Gór.* 2020. 8 s. 2-7
3. Turczyński K., Gerlich J., Czubaszek J., Nowaczewski D.: Stand tests of a powered roof support after a long time of operation. Case study. *Min. Mach.* 2020. 3 s. 22-33
4. Madejczyk W.: Badania stanowiskowe sekcji obudowy zmechanizowanej oraz jej elementów. Gliwice: Instytut Techniki Górniczej KOMAG, 2019
5. PN-EN 1804-1:2012+A1 Maszyny dla górnictwa podziemnego. Wymagania bezpieczeństwa dla obudowy zmechanizowanej. Część 2: Stojaki i pozostałe siłowniki.
6. Kolman R.: Mechaniczne wzmocnienie powierzchni części maszyn. Warszawa: WNT 1965.
7. Szulc S., Stefko A.: Obróbka powierzchni części maszyn. Warszawa: WNT, 1976.
8. Łunarski J.: Nowe technologie nagniatania i ich zastosowanie w przemyśle elektromaszynowym. Rzeszów: Wydawnictwo ODK – SIMP, 1986.
9. Przybylski W.: Technologia obróbki nagniataniem. Warszawa: WNT 1987.
10. Czechowski F., Kalisz J.: Wybrane aspekty nagniatania, *Mechanik*, nr 5÷6, 2015.
11. Kocańda S.: Zmęczeniowe niszczenie metali. Warszawa: WNT 1972.
12. Dobrzański L. A.: Podstawy kształtowania struktury i własności materiałów metalowych. Gliwice: Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, 2007.
13. Bogdanowicz Z., Nasiłowska B.: Wpływ kulowania na trwałość zmęczeniową stali austenitycznej 1.4593 spawanej metodą TIG, XXVII Sympozjum PKM Zakopane, 22 – 26 września 2015.
14. Kamiński S., Kowalski M., Łagoda T., Owsiański R.: Wpływ naprężeń własnych na trwałość zmęczeniową stali poddanych obróbce kulowania rozproszonego śrutem twardym, XXVII Sympozjum PKM Zakopane, 22 – 26 września 2015.
15. Neimitz A.: Mechanika pękania. Warszawa: PWN 1998.
16. Diel G. D.: Opriedielenije napriazienij w płasticeskoj obłasti po razpriedieleniju twierdosti. Moskwa: Maszynostrojenije, 1971.



17. Grzesik W.: Nagniatanie utwardzonych elementów maszyn. *Stal, Metale & Nowe Technologie*. 2019. 3÷4.
18. Szweđa S., Mikuła S., Mikuła J.: Urządzenie do nagniatania powierzchni wewnętrznych cylindrów siłowników hydraulicznych, zwłaszcza w górniczej obudowie zmechanizowanej. Patent. Polska, nr 233272. Opubl. 03.06.2019.
19. Peczkis G., Mikuła J., Mikuła S.: Tarcza hydrauliczna do dynamicznego nagniatania elementów maszyn z regulacją intensywności zgniotu powierzchniowego. Zgłoszenie patent. Polska, nr P.437079. zgł.19.02.2021.