

OCENA OBCIĄŻENIA CIEPLNEGO ZIARNA DIAMENTOWEGO OBCIĄGACZA JEDNOZIARNISTEGO

Ryszard DĘBKOWSKI¹, Andrzej ROSIAK²

1. WPROWADZENIE

Topografia czynnej powierzchni ściernicy ma istotne znaczenie dla otrzymywanych wyników procesu szlifowania. Jej właściwości zależą od budowy ściernicy (ziarnistości, struktury), stopnia zużycia i w dużej mierze od warunków wykonywanego okresowo zabiegu obciążania. W celu osiągnięcia właściwych wyników planowanej operacji obciążania używa się obecnie różnego typu obciążaczy diamentowych. W każdym przypadku podczas wykonywania zabiegu obciążania występują czynniki wpływające na intensywność zużycia zastosowanych w obciążaczu kryształów diamentu. Powstające zużycie zmienia warunki przeprowadzania zabiegu, co nie pozostaje bez wpływu na powtarzalność osiągniętej topografii ściernicy a w konsekwencji procesu szlifowania.

2. ZUŻYCIE ZIAREN DIAMENTOWYCH

Podczas obciążania wierzchołki diamentów obciążacza przecinają bądź rozkruszają ziarna ściernicy i mostki spoiwa ściernicy. W wyniku występującego tarcia, podwyższonej temperatury i zmiennego obciążenia pojawia się na powierzchni diamentu zużycie, którego mechanizm tłumaczy się kilkoma zjawiskami: ścieraniem, adhezją, utlenianiem, grafityzacją, destrukcją powierzchni.

Mechanizm ścierania diamentów wg [1] jest procesem mikrorozłupywania, w którym poprzez wzrost naprężeń zostają zrywane wiązania atomowe i tworzą się mikrorysy. W procesie adhezji tworzą się wiązania atomowe pomiędzy stykającymi

¹ Politechnika Łódzka, Katedra Technologii Maszyn, 90-924 Łódź, ul. B.Stefanowskiego 1/15

² Politechnika Łódzka, Katedra Techniki Ciepłej i Chłodnictwa, 90-924 Łódź, ul. B.Stefanowskiego 1/15

się ze sobą materiałami. Na skutek ruchu względnego ciał może występować zrywanie wiązań innych niż na powierzchni kontaktu, przez co następuje ubytek materiału. Dyfuzja może występować jako samodzielny mechanizm zużycia lub jako część procesu adhezji. Proces ten jest aktywowaną termicznie zamianą miejsc pojedynczych atomów. Oprócz dostarczenia wystarczającej ilości energii warunkiem koniecznym wystąpienia tego zjawiska jest różnica potencjałów chemicznych lub elektrochemicznych pomiędzy stykającymi się ciałami. Dyfuzją tłumaczy się np. zużycie powierzchni diamentu w czasie szlifowania stali niskowęglowej, w której węgiel jest dobrze rozpuszczalny. Utlanie, na skutek małej odporności temperaturowej diamentu w atmosferze powietrza, może zachodzić w temperaturze ok. 700°C, a zwiększone ciśnienie w strefie obróbki może ten proces przyspieszyć. Diament jest postacią alotropową węgla metastabilną w naturalnych warunkach środowiska. Jednak dostarczenie energii może doprowadzić do jego przemiany w inną postać metastabilną, jaką jest grafit o nieporównywalnie niższej twardości. W atmosferze tlenu zjawisko to może zachodzić przy podgrzaniu czystego diamentu do temperatury ok. 700°C, a w atmosferze beztlenowej do ok. 1500°C. Destrukcja powierzchni wierzchołka diamentu w postaci wykruszeń lub pęknięć jest wynikiem działania zmiennego obciążenia termicznego lub mechanicznego (w tym uderzeniowego charakteru obciążenia).

Każdy z wyżej wymienionych mechanizmów zużycia nie zachodzi w oderwaniu od pozostałych lecz się sumują lub pozostają w synergii. Według [2] zużycie diamentu w obciążaczach jest głównie rezultatem łącznego oddziaływania dwóch mechanizmów: termicznego zmęczenia i mikroskrawania podczas mechanicznego ścierania. W przypadku obciążania elektrokorundu lub monokorundu autorzy uznają, że powierzchnia diamentu nie podlega adhezyjnemu lub dyfuzyjnemu zużyciu. Mechanizm zużycia ściernego tłumaczy możliwością mikrorysowania powierzchni diamentu przez materiał ścierny zawarty w ściernicy w następstwie obniżenia twardości powierzchni diamentu wywołanej ogrzaniem jej do wysokiej temperatury. Ścierniwo tworzy na podatnej powierzchni diamentu rysy o kierunku równoległym do wektora prędkości. Drugi wymieniony mechanizm, wykruszanie wynikające z termicznego zmęczenia jest skutkiem zmiennej, wysokiej temperatury. Za jej przyczyną występują znaczące, cykliczne naprężenia termoelastyczne w kryształach, których wartość zbliża się do poziomu wytrzymałości diamentu.

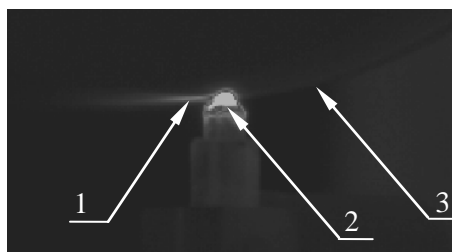
Z kolei wyniki badań przedstawione w [3] nie wykluczają adhezji, jako jednej z przyczyn zużycia diamentu. Badania przeprowadzone mikroanalizatorem rentgenowskim EDX wykazały występowanie na powierzchni czynnej przecika CVD, użytego do obciążania ściernicy elektrokorundowej w obecności cieczy chłodząco-smarującej, pierwiastków charakterystycznych dla składu materiałowego obciążanej ściernicy. Dalsze badania wykazały amorficzną strukturę przywartego materiału, co w kontekście występowania podczas obciążania wysokich chwilowych ciśnień i temperatur skłoniło autorów do wniosku, że nastąpiło stopienie składników ściernicy

a następnie ich amorficzne krzepnięcie na powierzchni diamentu.

Jak wykazują prowadzone badania, opisane wyżej zjawiska, będące przyczyną zużycia kryształu diamentu, zachodzą lub intensyfikują się w wyniku występowania wysokiej temperatury w strefie kontaktu pomiędzy trącymi się powierzchniami. Artykuł przedstawia wyniki badań obciążenia cieplnego ziarna diamentowego podczas realizacji zabiegu obciążania konwencjonalnych ściernic o spoiwie ceramicznym, których wyniki będą podstawą do utworzenia i weryfikacji modelu matematycznego tego procesu.

3. CIEPŁO W PROCESIE OBCIĄGANIA

W trakcie obciążania występują typowe mechanizmy rozpraszania ciepła powstałego podczas kontaktu ziarna diamentowego z powierzchnią ściernicy. Na rysunku 1 przedstawiono obraz termograficzny zarejestrowany podczas obciążania na sucho ściernicy obciążaczem jednoziarnistym. Jak można zauważyć, silnemu nagrzewaniu ulega ziarno diamentowe oraz lut utrzymujący kryształ (2) w oprawce oraz sam korpus oprawki. Część ciepła odprowadzana jest przez rozkruszone ziarna ściernic i cząstki spoiwa ściernicy, tworzące na obrazie smugę (1) o zróżnicowanej temperaturze, największej tuż obok miejsca styku diamentu ze ściernicą. Powierzchnia ściernicy przejmuje kolejną część ciepła, powodując niewielką zmianę jej temperatury widocznej na obrazie jako jaśniejsza smuga (3) na poddawanej obciążaniu powierzchni ściernicy. Kolejna porcja ciepła jest wypromieniowywana lub oddawana do otoczenia i unoszona przez cząsteczki gazu.



Rys. 1. Obraz termograficzny procesu obciążania ściernicy obciążaczem diamentowym jednoziarnistym

Wywiązujące się w czasie obciążania ciepło jest wynikiem procesów związanych z usuwaniem warstwy ściernicy wierzchołkiem ziarna diamentowego. Ściernica ceramiczna ma strukturę porowatą, jest kompozytem ziaren ściernych i spoiwa ukształtowanego w postaci mostków wiążących ziarna. W trakcie ataku krawędzi kryształu diamentu dochodzi do wykruszania i rozłupywania ziaren oraz spoiwa, tworzenia się pęknięć, powstawania deformacji plastycznych oraz tarcia stykających się powierzchni. Opory związane z usuwaniem materiału ściernicy pokonywane są

przez energię dostarczoną z układu napędowego, której część zamieniana jest na pracę użyteczną a część na ciepło.

4. BADANIA MOCY I CIEPŁA OBCIĄGANIA

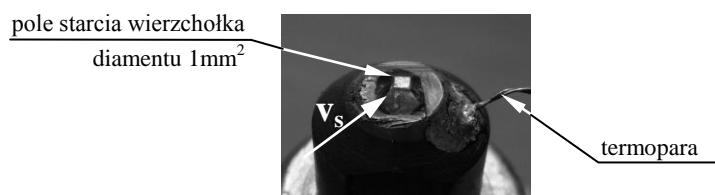
Badania doświadczalne, których celem było zebranie informacji o energii związanej z wykonywanym zabiegiem obciążania, przeprowadzono na szlifierce do płaszczyzn SPG 30x80. Pomiarom poddano dwa parametry charakteryzujące zapotrzebowanie i przemiany energii w trakcie obciążania: moc czynną napędu silnika ściernicy oraz temperaturę kryształu diamentu. Pomiary przeprowadzono podczas zabiegów obciążania, wykonywanych tym samym obciążaczem o znanym stopniu zużycia (rys. 2). Obciążanie wykonywano ze stałą wartością dosuwu a_d i trzema różnymi posuwami, opisywanymi wskaźnikiem pokrycia k_d . Obciążaniu poddano trzy ściernice o zróżnicowanej charakterystyce. W tabeli 1 zamieszczono zestawienie warunków obciążania. Każdy z wariantów powtarzano 2-krotnie.

Tabela 1. Warunki obciążania

Charakterystyka ściernicy	Wskaźnik pokrycia przy obciążaniu k_d	Dosuw obciążania a_d [mm]	Liczba przejeżdż
T1 38A 80J VBE	1,5 2,5 3,5	0,01	5
T1 38A 46J VBE			
T1 39C 60L KVK			

W badaniach wykorzystano trzy układy pomiarowe. Do oceny:

- mocy czynnej napędu silnika ściernicy zastosowano moduł WLM-3 i rejestrator Profibus firmy Nordmann,
- temperatury bocznej powierzchni ziarna diamentowego użyto kamerą termowizyjną VIGOCam50,
- temperatury lutu twardego w bezpośrednim sąsiedztwie ziarna diamentowego wykorzystano termoparę miedź-konstantan wlotowaną w otwór korpusu obciążacza (rys.2).

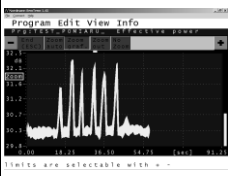
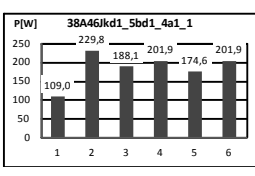
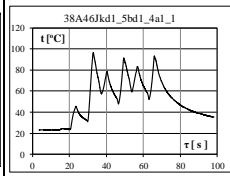
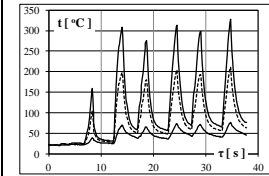


Rys. 2. Obciążacz stosowany w badaniach

Moduł WLM-3 wykonuje pomiar na podstawie oceny natężenia prądu (z użyciem czujników Halla umieszczonych na przewodach prądowych) oraz napięcia zasilania

silnika. Wielkość mocy wykorzystywanej bezpośrednio w procesie obciągania jest częścią wartości uzyskanej w wyniku pomiaru. W jej wyznaczeniu należy uwzględnić sprawność silnika i moc napędu wrzeczona ściernicy na biegu luzem. Zakres pomiarowy zastosowanej kamery termowizyjnej umożliwia prawidłową rejestrację obrazów obiektów, których temperatura nie przekracza 350⁰C. Sekwencje obrazów termograficznych wykonywano z częstotliwością 10Hz. Natomiast wzmacniacz pomiarowy i rejestrator siły termoelektrycznej termopary umożliwia pomiar temperatury do 200⁰C z częstotliwością 20Hz. W tabeli 2 przedstawiono przykłady wykresów opracowanych na podstawie danych otrzymanych z przedstawionych torów pomiarowych.

Tabela 2. Przykład wyników pomiarów uzyskanych podczas badań obciągania ściernicy

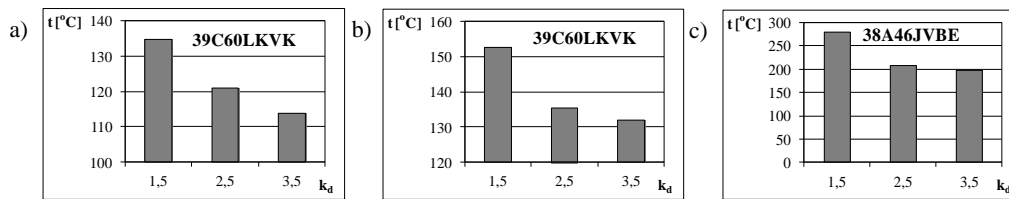
Wykres mocy czynnej pobieranej przez silnik napędu ściernicy	Wartość średnia maksymalnej mocy czynnej podczas przejść obciągających	Temperatura w strefie pomiaru termoparą	Temperatura (max, min, średnia) kamerą termowizyjną														
	 <table border="1"> <caption>Data for Average Maximum Active Power</caption> <thead> <tr> <th>Przejście</th> <th>Moc [W]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>109,0</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>229,8</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>188,1</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>201,9</td> </tr> <tr> <td>5</td> <td>174,6</td> </tr> <tr> <td>6</td> <td>201,9</td> </tr> </tbody> </table>	Przejście	Moc [W]	1	109,0	2	229,8	3	188,1	4	201,9	5	174,6	6	201,9		
Przejście	Moc [W]																
1	109,0																
2	229,8																
3	188,1																
4	201,9																
5	174,6																
6	201,9																

5. OCENA WYNIKÓW POMIARÓW

Na podstawie wykonanych badań i uzyskanych wyników pomiarów przeprowadzono analizę obciążenia cieplnego diamentu obciągacza w trzech aspektach:

- wpływu zmiany posuwu obciągacza na temperaturę diamentu,
- wpływu zmiany charakterystyki ściernicy na temperaturę diamentu,
- dynamiki zmian temperatury diamentu w czasie obróbki.

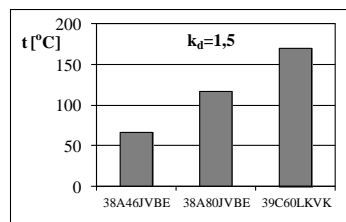
Na rysunku 3 przedstawiono wykonane dla dwóch rodzajów obciąganych ściernic wykresy zależności temperatury w miejscu pomiaru od posuwu obciągania, reprezentowanego przez wskaźnik pokrycia przy obciąganiu. Ich interpretacja jest jednoznaczna. Mniejszy posuw obciągania generuje mniejszą ilość ciepła w trakcie kontaktu ziarna diamentu z powierzchnią ściernicy. Szczególnie przebieg wykresów wykonanych na podstawie termogramów wskazuje, że nie jest to zależność proporcjonalna – zwiększanie wskaźnika k_d w coraz mniejszym stopniu sprzyja ograniczeniu temperatury diamentu. Nieco mniej jednoznaczne w tym względzie jest zachowanie temperatury mierzonej od strony korpusu obciągacza. Ma to swoje uzasadnienie w akumulacji i rozpraszaniu ciepła: wydłużający się czas przesuwu pozwala na odbiór przez korpus obciągacza większej ilości ciepła, którego, jak wskazują pomiary wykonane najbliżej źródła, jest prawie tyle samo.



Rys. 3. Wpływ posuwu obciążacza na temperaturę kryształu diamentu

- średnia maksymalna określona na podstawie pomiaru termoparą
- średnia minimalna określona na podstawie pomiaru termowizyjnego
- średnia maksymalna określona na podstawie pomiaru termowizyjnego

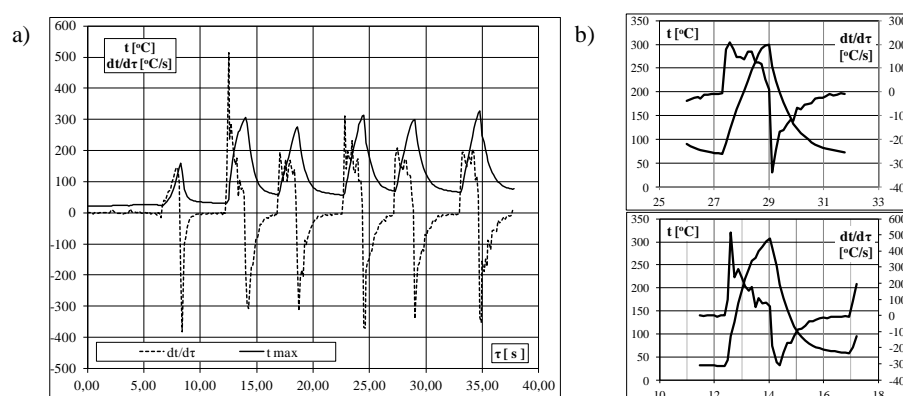
Wpływ zmiany właściwości ściernicy na ilość generowanego ciepła w czasie obciążania prezentuje wykres na rysunku 4. Stosując jednakowe nastawy zabiegu obciążania ściernic różniących się tylko ziarnistością, największej ilości wytworzonego ciepła należy spodziewać przy usuwaniu warstwy zbudowanej z drobnego ścierniwa. Mechanizm obciążania w dużej mierze polega na wykruszaniu spoiwa lub ziaren ze spoiwa. Zwiększenie gęstości mostków spoiwa w ściernicach drobnoziarnistych utrudnia proces obciążania, podwyższa generowane siły i zapotrzebowanie na energię. Z kolei zmiana rodzaju materiału ściernego z elektrokorundu, którego twardość (2000HK) i odporność na kruche pękanie ($K_{IC}=2,7 \text{ MPa m}^{0,5}$) jest niższa od zielonego węgliku krzemu (3000HK, $K_{IC}=3,1 \text{ MPa m}^{0,5}$), podwyższa ilość generowanego ciepła i temperaturę.



Rys. 4. Średnia minimalna temperatura kryształu diamentu podczas obciążania ściernic o różnej charakterystyce – pomiar termowizyjny

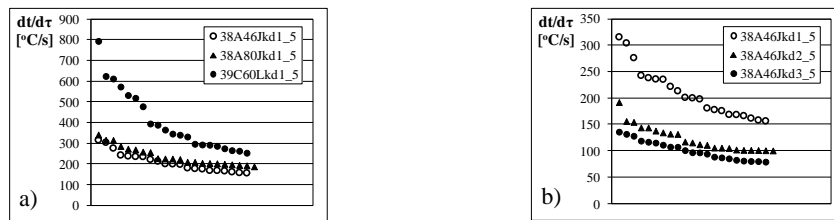
Dynamikę procesów cieplnych zachodzących na ziarnie diamentowym obciążacza charakteryzuje grupa wykresów na rysunku 5. Wykres a) prezentuje typowy przebieg zmiany temperatury diamentu obserwowany w czasie zabiegu obciążania oraz chwilową prędkość wzrostu temperatury. Wykres b) przybliża sposób zachodzących zmian temperatury. Krzywa narastania, a szczególnie linia pochodnej, wskazuje na szybki początkowy i późniejszy powolniejszy wzrost temperatury, tym wolniejszy im dłużej trwa styk ziarna z powierzchnią ściernicy. Po zakończeniu styku ziarna z czynną powierzchnią ściernicy następuje gwałtowne chłodzenie, z prędkościami większymi w stosunku do nagrzewania. W trakcie narastania widoczne są istotne

zmiany chwilowej prędkości przyrostu temperatury, znacznie większe od występujących podczas chłodzenia. Jest to odpowiedzią na zmienne obciążenie wynikające z niejednorodności struktury i chropowatości ściernicy. Należy się spodziewać, że zjawisko nierównych chwilowych prędkości zmian temperatury ma znacznie wyższą częstotliwość, niewidoczną tutaj z uwagi na ograniczenia toru pomiarowego oraz miejsce pomiaru (boczna powierzchnia ziarna). Miejsce to, pomimo bardzo wysokiego współczynnika przewodzenia ciepła jakim cechuje się diament, ma pewną bezwładność w stosunku do dynamiki zjawisk występujących w punkcie bezpośredniego styku.



Rys. 5. Przebieg i dynamika zmian temperatury ziarna diamentowego podczas obciążania

Zróznicowanie dynamiki zmian temperatury na ziarnie diamentowym w zależności od rodzaju obciążanej ściernicy oraz zastosowanego posuwu przedstawiają wykresy na rys. 6. Poszczególne punkty wykresów reprezentują najwyższe z obliczonych wartości szybkości wzrostu temperatury. Wykresy a) i b) pokazują iż najistotniejszym czynnikiem wysokiej wartości wyznaczonego parametru jest rodzaj kompozytu ściernicy. Obciążanie ściernic o różnej wielkości ziarna generuje w momencie zetknięcia się ściernicy z obciążaczem podobne chwilowe prędkości zmian temperatury. Natomiast w dalszym kontakcie wartości te się różnicują i z uwagi na większą jednorodność materiału ściernicy drobnoziarnistej, a przez to bardziej jednostajny dopływ ciepła, pozostają w tym przypadku na wyższym i bardziej stabilnym poziomie. Następnym stosowaniem różnych posuwów podczas obciążania ściernicy o tej samej charakterystyce jest rozgrzewanie się diamentu z innymi prędkościami chwilowymi, tym większymi im przemieszczanie się wierzchołka diamentu względem powierzchni ściernicy jest szybsze.



Rys. 6. Zależność szybkości i przyspieszenia wzrostu temperatury od warunków obciążania

6. PODSUMOWANIE

Przedstawione wyniki badań reakcji termicznej diamentu na wywiązujące się w czasie obciążania ciepło wskazały, jakie czynniki i w jakim stopniu wpływają na poziom oraz dynamikę zmian jego nagrzewania. Najistotniejsze znaczenie w tej kwestii ma rodzaj materiału kompozytu ściernicy poddanej obciążaniu. Ważki wpływ wywiera także ziarnistość materiału ściernego zastosowanego w ściernicy: im jest ona mniejsza tym ilość wywiązanej energii jest większa (zakładając, że pozostałe parametry charakterystyki ściernicy są takie same). Przyjmując założenie, że jest to wynikiem rozwinięcia powierzchni spoiwa należy spodziewać się, że właściwości stosowanego lepiszcza także kreują warunki cieplne procesu obciążania. Należy wziąć tutaj pod uwagę zarówno wytrzymałość mechaniczną, jak i termiczną, której niedostateczna wartość może prowadzić do jego topienia się.

Jak wykazują wyniki wcześniejszych prac [4, 5] metody analityczne nie dają jednoznacznych, potwierdzonych eksperymentalnie wyników obliczeń temperatury generowanej na powierzchni czynnej wierzchołka diamentu obciążacza. Drugim więc ważnym aspektem wyników przeprowadzonych obecnie badań jest pozyskanie wstępnych informacji niezbędnych do walidacji modelu matematycznego warunków przepływu ciepła w obciążaczu, tworzonych z wykorzystaniem metody elementów skończonych. Jego opracowywanie przyczyni się do lepszego poznania zjawisk towarzyszących procesowi obciążania ściernicy i umożliwi wiarygodną symulację temperatur, na które narażone jest ziarno diamentu obciążacza, a szczególnie jego wierzchołek.

LITERATURA

- [1] SEN P.K., *Wheel Dressing and Natural Diamond*. Industrial Diamond Review, 51 (1991) s.32–38.
- [2] TKHAGAPSOEV K. i inni, *On Wear of Diamond in Dressing Abrasive Wheels*. Sverkhтвердые Материалы, 2/1987, 30–35.
- [3] LINKE B., KLOCKE F., *Temperatures and Wear Mechanisms in Dressing of Vitrified Bonded Grinding Wheels*. International Journal of Machine Tools &Manufacture, 50 (2010), 552–558.
- [4] DEBKOWSKI R., *Ocena temperatury pracy wierzchołków ziaren diamentowych stojącego obciążacza wieloziarnistego*. W: Podstawy i technika obróbki ściernej, A.Gołąbczak, B.Kruszyński (red.), Łódź, Politechnika Łódzka, 2010, 43–52.
- [5] SHEIKO M., *On Calculation of Instantaneous Temperature on a Diamond Grit in Dressing Tool during Its Operation*. Journal of Superhard Materials, 2007, Vol. 29, No. 5, 301–306.