



Analiza rozkładu temperatury płytek skrawających podczas skrawania wykonanych z stali HSS i węgla spiekanego WC

W. Waliczek^a, M. Michalska^a, J. Hadyk^a, A. Śliwa^b

^a Studenci Politechniki Śląskiej, Wydział Mechaniczny Technologiczny
email: weronika.waliczek@gmail.com

^b Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczny Technologiczny Instytut Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych
email: agata.sliwa@polsl.pl

Streszczenie: W pracy dokonano analizy termicznej płytek skrawających wykonanej z stali HSS i węgla spiekanego WC o różnych składach chemicznych i własnościach. Symulację komputerową wykonano w programie ANSYS.

Abstract: The paper presents a thermal decomposition of temperature during machining cutting plates of high-speed steels HSS and tungsten carbide WC and the comparison of chemical composition and properties. Simulation was realized by ANSYS.

Słowa kluczowe: płytki skrawające, rozkład termiczny, ANSYS, HSS, WC

1. WPROWADZENIE

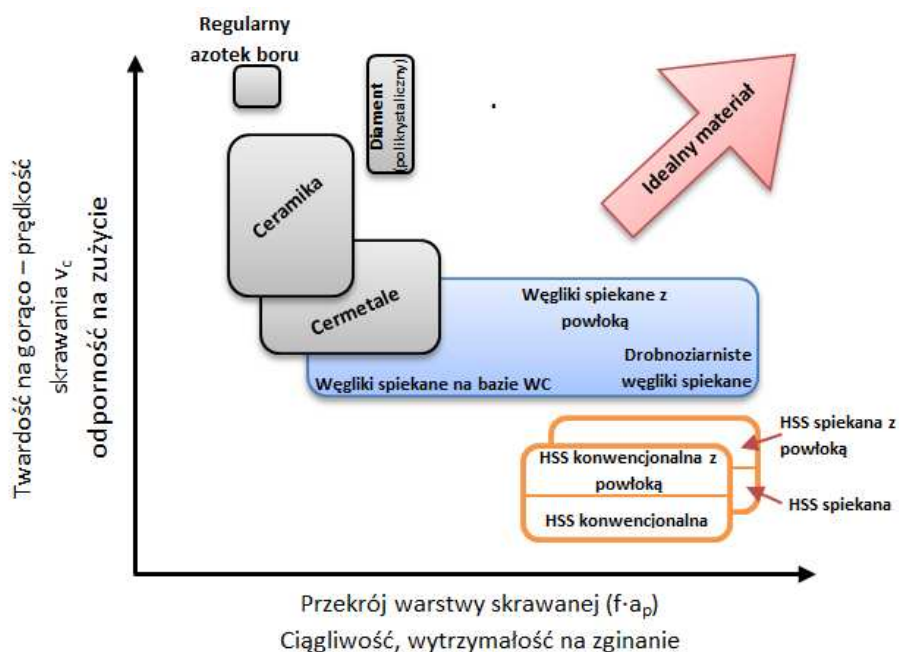
ANSYS jest wiodącym na świecie pakietem do obliczeń MES (metody elementów skończonych), umożliwiającym kompleksową symulację w każdej niemal dziedzinie nauki i przemysłu. MES jest to obecnie jedna z najszerzej stosowanych metod rozwiązywania różnych problemów inżynierskich, ze względu na jej uniwersalność oraz łatwość modelowania skomplikowanej geometrii. Metoda ta pozwala na wykonanie przez inżyniera projektanta i komputer określonego ciągu operacji, w trakcie poszukiwania rozwiązania, począwszy od sformułowania zadania, a skończywszy na graficznej interpretacji wyników obliczeń. Często przeprowadza się symulacje różnych przedmiotów narażonych na różne obciążenia krytyczne, w celu zbadania zachowania się danego narzędzia. Obliczenia wykonane za pomocą metody elementów skończonych pozwalają na określenie w dużym stopniu prawdopodobieństwa występowania tych samych wyników w badaniu rzeczywistym.

Dzięki odpowiedniemu oprogramowaniu ANSYS można przeprowadzać symulację na różnych narzędziach skrawających. Narzędzia skrawające służą głównie do obróbki użytkowej polegającej na skrawaniu fragmentów obrabianego materiału zwanych naddatkami (wiórami). Kształt narzędzia skrawającego oraz to z jakiego materiału jest wykonany ma duży wpływ na jakość obrabianego przedmiotu, precyzyjność jego wymiarów oraz cechy użytkowe,

a także na wydajność procesu skrawania i ich koszt. Wymaga się szczególnych własności od materiałów przeznaczonych na ostrza skrawające, ze względu na trudne warunki pracy – wysoka temperatura oraz duże naciski jednostkowe. Podczas przesuwu powierzchni ostrza względem obrabianego materiału występują zjawiska sprzyjające zużyciu się płytki skrawającej, np. utlenienie, adhezja, dyfuzja, zmęczenie materiału itp. Powyższe czynniki sprawiają, że wiele wymaga się od materiałów skrawających, np. [1,2]:

- wysokiej twardości (niewątpliwie większej od materiału obrabianego);
- wysokich współczynników wytrzymałościowych na: rozciąganie, zginanie, skręcanie oraz ściskanie;
- dużej udarności;
- wysokiej odporności na zmęczenie cieplne i mechaniczne;
- dobrej przewodności cieplnej;
- małej rozszerzalności cieplnej;
- stabilności krawędzi skrawającej;
- zachowania własności skrawnych w wysokich temperaturach;
- dużej ciągliwości;
- relatywnie niskiej ceny w porównaniu do ich możliwości skrawnych.

Żaden ze znanych nam materiałów przeznaczonych na ostrza nie spełnia wszystkich wymagań jednocześnie, a niektóre z nich wzajemnie się wykluczają. W wielu przypadkach podstawowym kryterium doboru materiału jest minimalizacja zużycia, a w efekcie okres trwałości. Poniżej przedstawiono schemat stosowanych materiałów narzędziowych wraz z zestawieniem ich własności oraz zakresów zastosowań (rys. 1).



Rysunek 1. Zestawienie materiałów na narzędzia skrawające oraz ich własności [1]

Figure 1. The cutting tool materials and their properties [1]

Jednak zauważono, że najczęściej spotykanymi materiałami są węgliki spiekane, które wyparły dotychczas stosowane stale szybko tnące [1,2]. W artykule skupiono się dokładnie na

spiekanych stalach szybko tnących oraz kobaltowych węglkach spiekanych. W tabelicy 1 zestawiono orientacyjne własności fizyczne materiałów narzędziowych.

Tablica 1. Wybrane własności fizyczne stali szybko tnącej oraz węglików spiekanych [1]

Table 1. Selected physical properties of HSS and cemented carbides [1]

Własności	Stale szybko tnące	Węglik spiekane
Gęstość ρ , g/cm ³	7,9÷8,75	10,6÷15,1
Twardość	< 69 HRC	1700÷1290 HV30
Odporność na kruche pękanie K_{Ic} , MPa·m ^{1/2}	-	6,9÷12,7
Wytrzymałość na zginanie R_g , MPa	< 4000	1600÷2450
Wytrzymałość na ściskanie R_c , MPa	< 4000	4450÷5700
Udarność U , kJ/m ²	< 480	24,5÷58,8
Współczynnik sprężystości podłużnej E , GPa	210	500÷650
Odporność na temperaturę Θ_{max} , °C	< 680	800÷1000
Współczynnik przewodzenia ciepła λ , W/(m·K)	16,7÷25,1	17÷90
Współczynnik rozszerzalności liniowej α , 10 ⁻⁶ /K	9÷12	5÷7,9

2. STAL SZYBKOTNĄCA NA NARZĘDZIA SKRAWAJĄCE

Stal szybko tnąca jako materiał na narzędzia skrawające wykorzystuje kilkanaście gatunków konwencjonalnych. Znak stali szybko tnącej wg nowej obowiązującej normy (PN-EN ISO 4957:2004) składa się z liter HS i liczb rozdzielonych myślnikami, które oznaczają średnie stężenie procentowe, w danym porządku: W – Mo – V – Co (kobalt nie zawsze występuje), natomiast litera C sygnalizuje podwyższoną zawartość węgla. Ponieważ spiekane stale szybko tnące nie są produkowane na masową skalę założono symbol cechujący PM – skrót ten dopasowano zachodniej nazwy metalurgii proszków: niemieckiej – *Pulvermetallurgie* oraz angielskiej – *powder metallurgy*. Stale szybko tnące są charakteryzowane jako zawierające 3÷6 Cr, $\geq 0,6$ % C a także dwa spośród głównych dodatków stopowych o łącznym stężeniu nie mniejszym niż 7%. Wszystkie pierwiastki stopowe mają wpływ na wzrost odporności na ścieranie, twardości w podwyższonej temperaturze a także na odporność na zmiany kształtu. Zmniejszają szlifowalność. Prócz molibdenu, pozostałe pierwiastki, a zwłaszcza węgiel, zmniejszają również ciągliwość stali [1÷3].

Do największych wad tych stali można zaliczyć skłonność do segregacji węglików, co powoduje nierównomierność własności w obrębie ostrzy. Segregację tę można niemal całkowicie usunąć, stosując metalurgię proszków. Pozwala to na zwiększenie zawartości składników węglidotwórczych, w spiekanych stalach liczbę węglików można zwiększyć do 40% objętości, gdzie w stalach szybko tnących otrzymywanych konwencjonalnymi sposobami – 30% (obj.). Rezultatem tego jest zwiększenie twardości stali do 67÷69 HRC, przy zachowaniu porównywalnej ciągliwości, a w konsekwencji zwiększenie odporności na ścieranie [1,2]. Poniżej w tabelicy przedstawiono przykłady gatunków spiekanych stali szybko tnących (tab. 2).

Własności użytkowe spiekanych stali szybko tnących są zdecydowanie lepsze niż stali tradycyjnych, co jest wynikiem przede wszystkim ich jednorodnej struktury. W stalach otrzymywanych metodami konwencjonalnymi węgliki rozkładają się pasmowo, co powoduje zmniejszenie ich ciągliwości nawet przy mniejszej ich twardości która po obróbce cieplnej (hartowanie + odpuszczanie) wynosi ok. 65 HRC. Dalej porównując te dwie stale można zauważyć, że stale wykonane metalurgią proszków są bardziej podatne na obróbkę cieplną

oraz zdecydowanie lepiej formują się na gorąco. By jednak poprawić własności stali szybko tnącej często nanosi się powłoki lub wykonuje obróbkę cieplno-chemiczną [2]. Dużą wadą jest wyższy koszt narzędzi ze spiekanej stali, ze względu na bardziej złożoną technologię wytwarzania w porównaniu do stali tradycyjnej [1].

Tablica 2. Średni skład chemiczny wybranych spiekanych stali szybko tnących [2]

Table 2. The mean of chemical composition of selected sintered high-speed steels [2]

Oznaczenie stali	Typ stali	Odpowiednik stali konwencjonalnej wg PN	Zawartość pierwiastka, % mas.							
			C	W	Mo	V	Cr	Co	O ₂	Fe
M35	PM 6-5-2-5	SK5M	0,9	6,4	5,0	1,9	4,1	4,8	< 1000	reszta
T42	PM 10-4-3-10	SK10V	1,4	9,7	4,0	2,4	4,0	10,6	ppm	

M – stal szybko tnąca molibdenowa; T – stal szybko tnąca wolframowa

Stal HS 6-5-2-5 można stosować na wysoko wydajne frezy, wiertła i gwintowniki, noże do toczenia i strugania wszystkich odmian, rozwiertaki, narzędzia do obróbki drewna, narzędzia o dużej wytrzymałości. HS 10-4-3-10 wykorzystuje się do produkcji noży tokarskich, bardzo obciążonych frezów, na narzędzia do obróbki zgrubnej i wykańczającej, narzędzia pracujące w automatach oraz narzędzia do obróbki drewna [1].

3. CHARAKTERYSTYKA WĘGLIKÓW SPIEKANYCH WC NA NARZĘDZIA SKRAWAJĄCE

Innym materiałem otrzymywanym za pomocą metalurgii proszków są węgliki spiekane, które stanowią główną grupę materiałów narzędziowych. Węgliki spiekane są przedstawicielami materiałów pośrednich pomiędzy dwoma grupami materiałów o skrajnych własnościach – są bardzo twarde i odporne na zużycie ale mniej niż ceramika czy supertwarde materiały, ponadto posiadają wyższą wytrzymałość na zginanie, jednakże nie tak dobre jak stale szybko tnące. Płytki wieloostrzowe wytwarzane są z różnych węglików metali (trudnotopliwych): węglika wolframu (najpopularniejszy), węglika tantalu, węglika tytanu oraz węglika niobu. Udział węglików w materiale wynosi ok. 65÷95%, resztę stanowi metal wiążący, którym głównie jest kobalt, choć można również zastosować molibden, nikiel i żelazo lub ich stopy z kobaltem. Kobalt jest dobrym wyborem ze względu na jego dobre własności: wysoką temperaturę topnienia – 1494°C, bardzo dobre przewodnictwo cieplne, dużą wytrzymałość na zginanie oraz dobrą zwilżalność z węglkami [1,3]. Norma ISO 513 rozróżnia gatunki węglików spiekanych w zależności od rodzaju obrabianego materiału oznaczonych literami i kolorami [4]:

- dla stali – P – kolor: niebieski;
- dla stali nierdzewnej – M – kolor: żółty;
- dla żeliwa – K – kolor: czerwony;
- dla stopów nieżelaznych – N – kolor: zielony;
- dla stopów żaroodpornych – S – kolor: pomarańczowy;
- dla materiałów hartowanych – H – kolor: szary.

Własności węglików spiekanych zależą głównie składu fazowego i chemicznego, wielkości ziarn węglików i ich kształtu a także udziału objętościowego w strukturze. Poniżej w tablicy 3 przedstawiono skład chemiczny wybranych węglików spiekanych oraz wpływ ich składu chemicznego i wielkości ziarna na twardość.

Tablica 3. Skład chemiczny i własności fizyczne wybranych węglików spiekanych [1]
 Table 3. The chemical composition and physical properties of selected cemented carbides [1]

Gatunek	Grupa zastosowań wg ISO 513	Skład chemiczny, %			Wielkość ziarna, μm	Gęstość, g/cm^3	Twardość, HV30
		Suma zawartości					
		WC	TiC+TaC+NbC	Co			
H10S	K10÷K20	91	4,5	4,5	1÷2	15,0	1650
HF8	K10÷K25	92	-	8	< 1	14,60	1700
SM25	P15÷P40/ M25÷M35	69,5	21	9,5	1÷2	12,6	1550
S40S	P40÷P50	79	7	14	2÷3	13,0	1200

Ze względu na skład chemiczny węglików spiekanych można je podzielić na dwie grupy [2]:

- węgliki spiekane dwuskładnikowe WC+Co;
- węgliki spiekane wieloskładnikowe WC + TiC+TaC+NbC + Co.

Pomimo że w skład tej pierwszej grupy wchodzi tylko węgiel wolframu i kobalt, ma ona ważne miejsce w przemyśle.

Węgliki WC + Co można sklasyfikować ze względu na wielkość cząsteczek (niezależnie od zawartości Co) [2]:

- gruboziarniste: ϕ 3÷30 μm ;
- standardowe: ϕ 1,5÷3 μm ;
- drobnoziarniste: $\phi \leq 1,5$ μm ;
- ultradrobnoziarniste: $\phi \leq 0,5$ μm

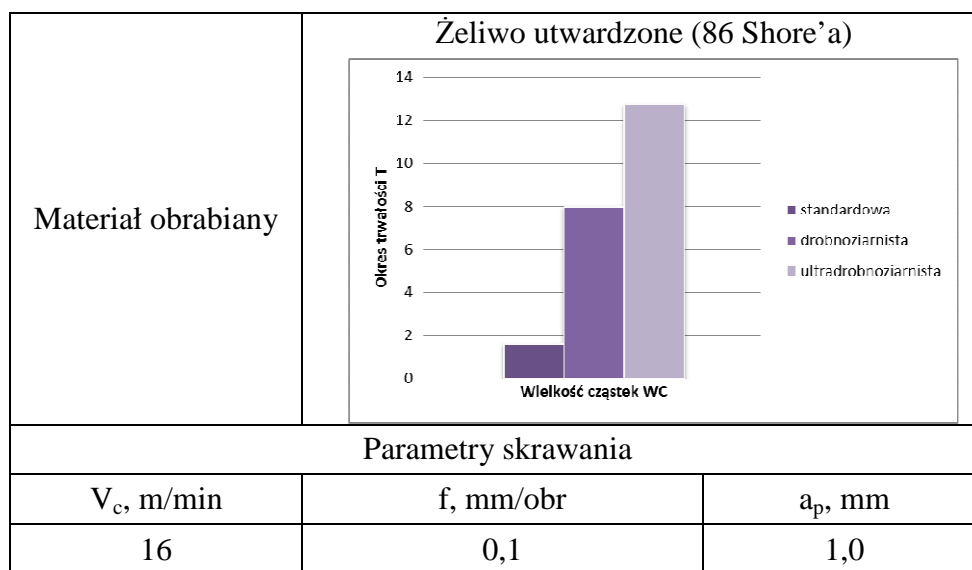
Naukowcy porównali ten sam materiał dwuskładnikowy tylko o różnej wielkości ziarna węgla wolframu (drobnoziarnistych i standardowych). Z badań wynika, że WC o średnicy < 1 μm , przy identycznej lub zbliżonej zawartości kobaltu, mają wyższą wytrzymałość na ściskanie, zginanie, wyższą wartość współczynnika intensywności naprężeń, a także większą twardość (porównaj tab. 4). Można wnioskować, że tego typu oddziaływanie jest wynikiem dużej jednorodności strukturalnej ultradrobnoziarnistych spiekanych węglików wolframu [2].

Tablica 4. Porównanie własności wybranych węglików spiekanych o strukturze drobnoziarnistej oraz konwencjonalnych [2]

Table 4. Comparison of selected properties of cemented carbide of fine-grained structure and the conventional [2]

Własności	Rozmiar kryształów WC			
	< 1 μm		1÷3 μm	
Gatunek węglików spiekanych	WC-6,0 Co	WC-13,6Co	WC-6,0Co	WC-12Co
Gęstość g/cm^3	14,9	13,9	14,9	14,2
Twardość HV30	1780	1500	1580	1290
Wytrzymałość na ściskanie, MPa	6000	5700	5400	4500
Wytrzymałość na zginanie, MPa	3000	3400	2000	2450
Moduł Younga, GPa	640	530	630	580
Współczynnik intensywności naprężeń K_{IC} , $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$	10,8	11,2	9,6	12,7
Współczynnik Poissona	0,21	0,21	0,22	0,22
Współczynnik przewodzenia ciepła, $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	6,2	6,9	5,5	5,9

Dwuskładnikowe węgliki spiekane WC + Co, przy niskim stężeniu kobaltu, cechują się dużą odpornością na ścieranie, ale równocześnie są wrażliwe na uderzenia. Dodatkowo brzegi płytek – miejsca skrawające – wykruszają się wskutek zmęczenia. Jest to powodem dodania węgliku tytanu, zwłaszcza dla obróbki skrawaniem stali z dużymi prędkościami (rys. 2). TiC w porównaniu z WC wykazuje znacznie mniejszą skłonność do zgrzewania się z materiałem obrabianym oraz większą odpornością na ścieranie w podwyższonej temperaturze. Powoduje również podwyższenie twardości i tym samym zmniejszenie wytrzymałości, zwłaszcza na ściskanie. Dodatki węgliku tantalum i niewielkiej ilości węgliku niobu polepszają wytrzymałość na zginanie oraz twardość. W dodatku redukują one skłonność do erozji ostrza powstałej na skutek przywierania wiórów [2].



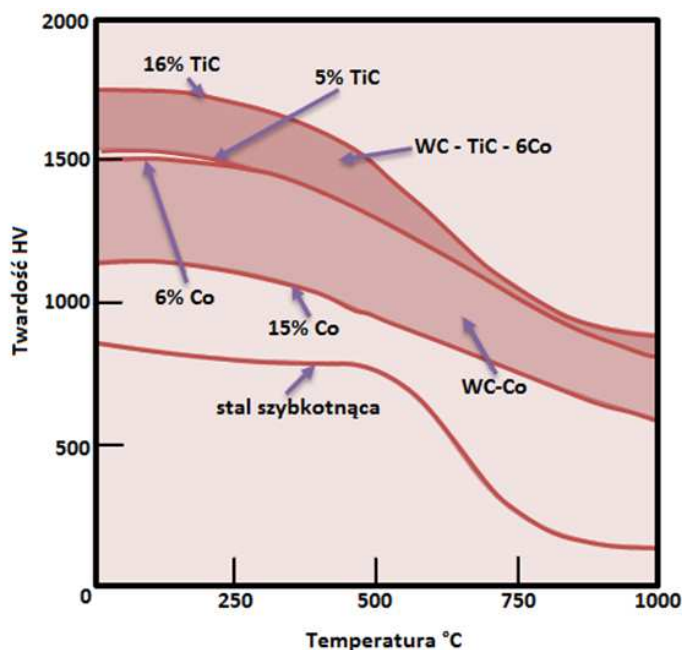
Rysunek 2. Porównanie okresów trwałości narzędzi z węglików spiekanych WC z 6% Co o różnej wielkości ziarna węgliku wolframu przy skrawaniu ciągłym żeliwa utwardzonego [2]
 Figure 2. Comparison of tool life of WC carbide with 6% Co with different grain size of tungsten carbide for continuous cutting a cast iron hardened [2]

Na węgliki spiekane można również nakładać różnego rodzaju powłoki ochronne – najpowszechniejszymi są pokrycia azotku tytanu, węglikoazotku tytanu, węgliku tytanu oraz tlenku glinu [4]. Obecnie stosuje się pokrycia wielowarstwowe, ze względu na zróżnicowane własności owych powłok. W porównaniu ze stalą HSS węgliki spiekane cechują się wyższą odpornością na oddziaływanie wysokich temperatur skrawania i ścieranie oraz twardością, niestety mają mniejszą ciągliwość, odporność na zmęczenie cieplne a także niższą wytrzymałość na zginanie i rozciąganie [2] (rys. 3).

4. PRZYGOTOWANIE MODELU GEOMETRYCZNEGO I WYKONANIE SYMULACJI KOMPUTEROWEJ

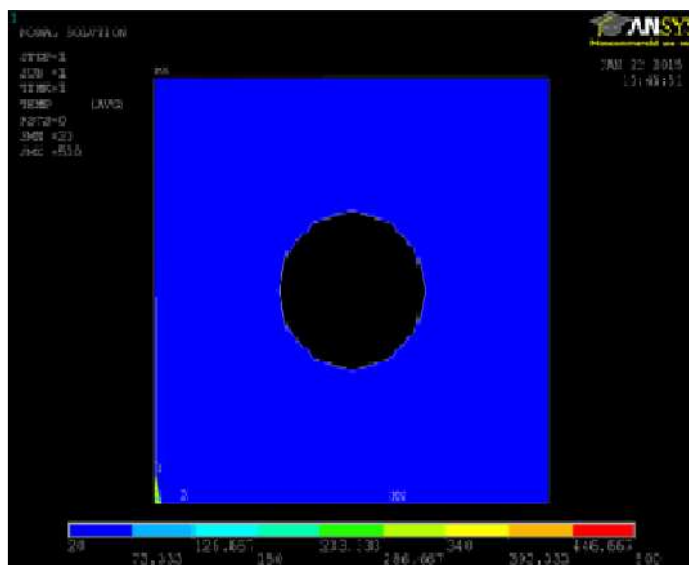
Podczas pracy płytki skrawającej w warunkach skrawania, krawędź robocza płytki jest narażona na duże tarcie z materiałem obrabianym, w wyniku czego tarcie ma wpływ na podnoszenie temperatury nawet do 500°C. W niniejszej pracy analizie przy użyciu programu ANSYS z zastosowaniem modelowania metodą elementów skończonych poddano płytkę

skrawającą o znormalizowanych kształtach. Celem analizy było otrzymanie oraz porównanie rozkładu temperaturowego płytki skrawającej wykonanej z stali HSS oraz węgliku WC poprzez analizę termiczną podczas pracy płytki poddanej obróbce skrawaniem. W tym celu zamodelowano typowy kształt płytki skrawającej o geometrii 16 x 16 x 6 mm z otworem uchwytem w środku o średnicy $\varnothing=6$ mm – kształt przedstawiono na rysunku 4.



Rysunek 3. Wpływ temperatury na twardość węglików spiekanych WC-Co i WC-TiC-Co oraz stali szybko tnącej [3]

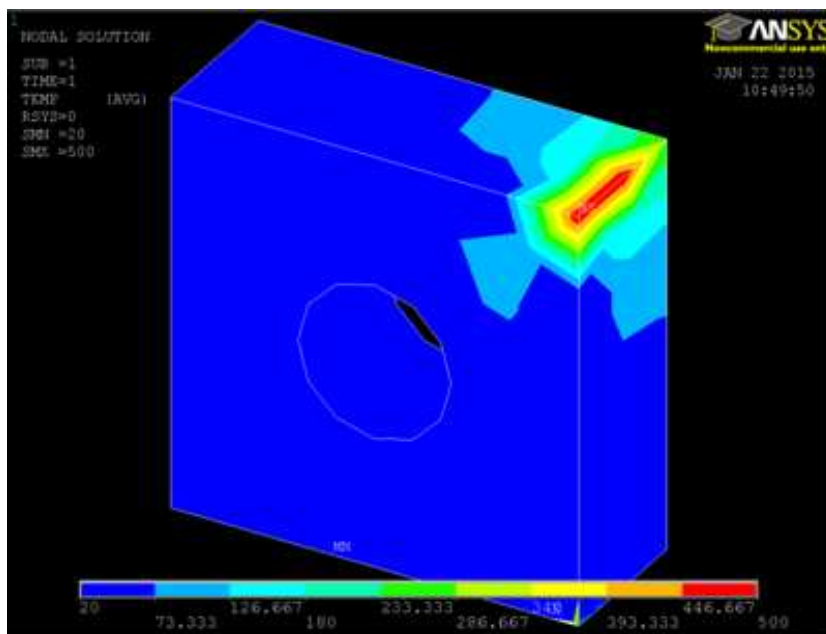
Figure 3. Effect of temperature on the hardness of cemented carbides WC-Co and WC-TiC-Co and HSS steel [3]



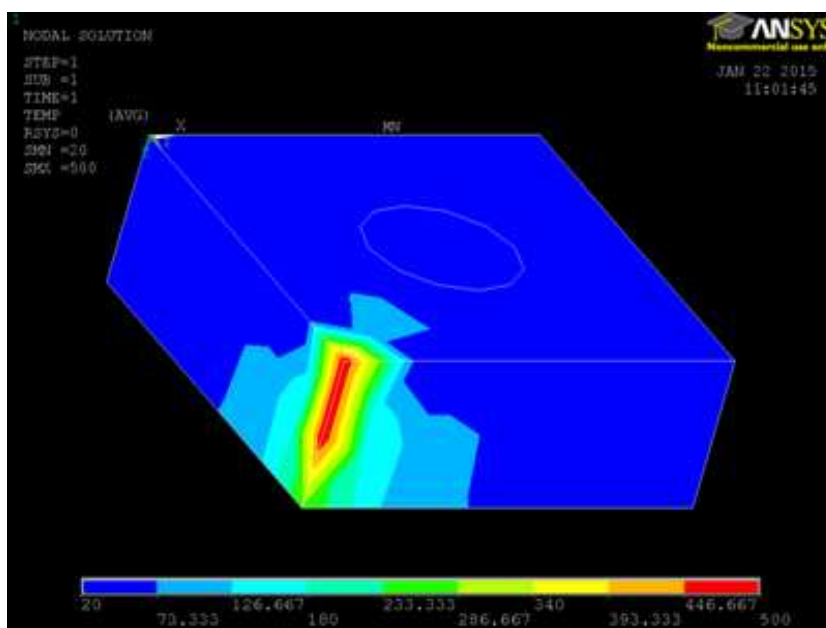
Rysunek 4. Kształt zamodelowanej płytki skrawającej

Figure 4. The shape of modeled indexable inserts

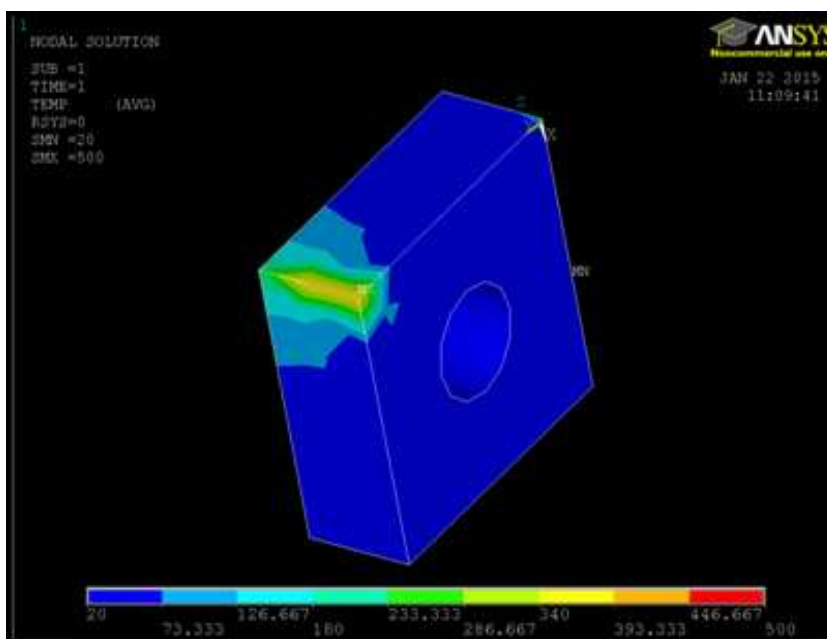
W badaniu głównym czynnikiem wpływającym na rozkład termiczny temperatury jest współczynnik przewodności cieplnej. Dla stali HSS przyjęto współczynnik przewodzenia ciepła $\lambda=20$ W/(m·K), a dla węgla spiekane WC $\lambda=62$ W/(m·K). Dla obu materiałów zadano punktową temperaturę pracy $T=500^{\circ}\text{C}$ w części roboczej płytki skrawającej. Wyniki analizy przedstawiają rysunki 5÷8.



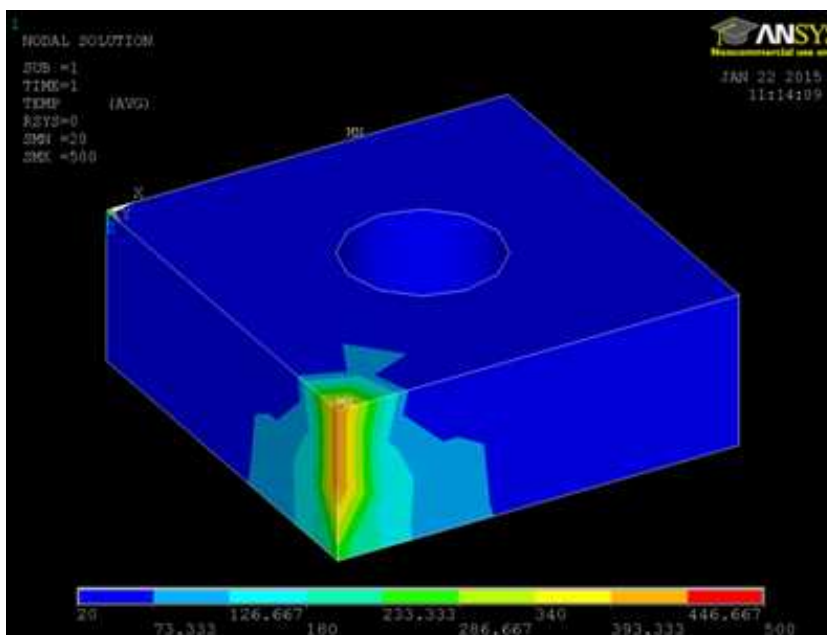
Rysunek 5. Rozkład temperaturowy płytki skrawającej wykonanej z stali HSS
Figure 5. The temperature distribution of indexable insert made of HSS



Rysunek 6. Rozkład temperaturowy płytki skrawającej wykonanej z stali HSS
Figure 6. The temperature distribution of indexable insert made of HSS



Rysunek 7. Rozkład temperaturowy płytki skrawającej wykonanej z węgliku WC
Figure 7. The temperature distribution of indexable insert made of WC carbide



Rysunek 8. Rozkład temperaturowy płytki skrawającej wykonanej z węgliku WC
Figure 8. The temperature distribution of indexable insert made of WC carbide

5. WNIOSKI

Za pomocą programu ANSYS możliwe było przeprowadzenie analizy termicznej płytek skrawających wykonanych z HSS i WC. Wyniki analizy przedstawiono w formie graficznej wykazującej rozkład temperatury w płytce skrawającej poddanej obróbce skrawania.

Temperatura maksymalna podczas skrawania wynosić może 500°C, dlatego ważnym czynnikiem jest możliwość rozkładu temperatury (przewodności cieplnej) po powierzchni płytki skrawającej, unikając zbyt długich i lokalnych koncentracji temperatury. Parametrem przewodności cieplnej jest współczynnik przewodności cieplnej, który mówi o zdolności materiału do przewodzenia ciepła oraz jej przepływu, charakterystyczny dla każdego materiału inżynierskiego.

W przeprowadzonej analizie płytki skrawające wykonane z stali HSS charakteryzują się mniejszym współczynnikiem przewodności ciepła, co sprawia że temperatura rozkłada się po mniejszej powierzchni, a także krawędź tarcia z materiałem obrabianym narzędzia posiada większą koncentrację temperatury. Temperatura dochodząca do 500°C dla niektórych stali HSS jest temperaturą odpuszczalną dla danego fragmentu próbki oraz nie ma wpływu na zmianę jej struktury. Z kolei węgiel wolframu WC stosowany na płytki skrawające jest zdecydowanie lepszym materiałem, ze względu na większy współczynnik rozszerzalności cieplnej, co poprawia rozkład temperatury w większej części płytki skrawającej oraz zmniejsza jej koncentrację przy krawędzi roboczej.

Zmniejszenie współczynnika tarcia, który jest odpowiedzialny za podwyższenie temperatury w stosowanych materiałach na narzędzia skrawające wpływa korzystnie na własności materiału a przede wszystkim na zwiększenie żywotności narzędzi skrawających.

LITERATURA

1. P. Cichosz, Narzędzia skrawające, WNT, Warszawa, 2006.
2. M. Wysięcki, Nowoczesne materiały narzędziowe stosowane w obróbce skrawaniem, WNT, Warszawa, 1997.
3. L.A. Dobrzański, Podstawy nauki o materiałach i metaloznawstwo. Materiały inżynierskie z podstawami projektowania materiałowego, WNT, Gliwice-Warszawa, 2002.
4. Katalog firmy BAILDONIT, Płytki wielostrzowe i narzędzia składane do toczenia i frezowania, Sandvic Polska Sp. z o.o., Warszawa, 2013.