

**Tadeusz BURAKOWSKI**

Instytut Mechaniki Precyzyjnej, Warszawa  
Politechnika Koszalińska, Koszalin

## **SYNERGIZM TECHNOLOGII WYTWARZANIA A TRWAŁOŚĆ EKSPLOATACYJNA NARZĘDZIOWYCH SYTEMÓW AREOLOGICZNYCH**

### **Słowa kluczowe**

Areologia – inżynieria powierzchni, synergizm, współczynnik synergizmu, kompozycja technologii, wartościowanie synergizmu technologii.

### **Streszczenie**

Podano informacje o kompozycji technologii wytwarzania i o wartościowaniu kompozycji tych technologii – przez autorskie wprowadzenie pojęcia współczynnika oddziaływania i jako pochodnego – współczynnika synergizmu. Omówiono efekt kompozycji technologii – synergizm żądanych właściwości oraz podano zestawienie liczbowe współczynnika synergizmu trwałości eksploatacyjnej narzędzi jako funkcję technologii wytwarzania dla systemu areologicznego bezpowłokowego (rdzeniowego) oraz powłokowego. Zasygnalizowano dalsze możliwości wykorzystania pojęcia współczynnika synergizmu.

### **1. Kompozycja technologii wytwarzania**

Każdy wyrób – część maszyny, narzędzia, urządzenia – wytwarzany jest w wyniku kolejno po sobie następujących technologii wytwarzania (lub operacji

technologicznych wytwarzania). W rezultacie każdej następnej operacji technologicznej wytwarzania następuje zmiana lub zniszczenie właściwości poprzednich na rzecz właściwości nowych – lepszych dla ostatecznych właściwości wyrobu, bardziej ukierunkowanych na odporność na przyszłe narażenia eksploatacyjne.

Po każdym etapie wytwarzania – materiału, półwyrobu, wyrobu – produkt uzyskuje inne (jakościowo lub ilościowo) właściwości, zależne oczywiście od materiału oraz od technologii wytwarzania. Również kolejność operacji nie jest obojętna dla uzyskania najlepszych właściwości użytkowych.

Już etap projektowania materiału półwyrobu powinien uwzględnić przyszłe zastosowania eksploatacyjne wyrobu. To zastosowanie powinno być uwzględniane przez wszystkie kolejne operacje wytwarzania wyrobu. Przy tym spośród szerokiej gamy technologii wytwarzania powinny być dobierane technologie najbardziej właściwe dla przyszłego zastosowania. *Świadome łączenie technologii wytwarzania, dobieranie rodzaju i kolejności ich stosowania w procesie technologicznym wytwarzania – to komponowanie technologii wytwarzania.* Stanowi ono oczywiście kombinację technologii wytwarzania, ale kombinację świadomą, najlepiej popartą doświadczeniem i badaniami [1].

## 2. Wartościowanie kompozycji technologii wytwarzania

Jak poznać, czy określona kombinacja technologii jest kompozycją, i czy dobrą, a może najlepszą?

Do tego celu można, jako jedną z metod wartościowania wielkości, wykorzystać pojęcie współczynnika oddziaływania, ale odniesionego do technologii, a ściślej do wyników uzyskiwanych w rezultacie stosowania określonej technologii, zdefiniowanego [1–7] jako:

$$k_o = \frac{a}{a_1},$$

wyrażającego krotność zmiany właściwości  $a$  (np. twardości) w wyniku działania dwóch (lub więcej) czynników (np. dwóch technologii: toczenia i hartowania), odniesiona do tejże właściwości, ale wywołanej działaniem jednego czynnika  $a_1$  (np. operacji toczenia).

Współczynnik oddziaływania  $k_o$  wartościowo może być większy od jedności, równy jedności lub mniejszy od jedności [1, 3], czyli  $1 \leq k_o \leq 1$ .

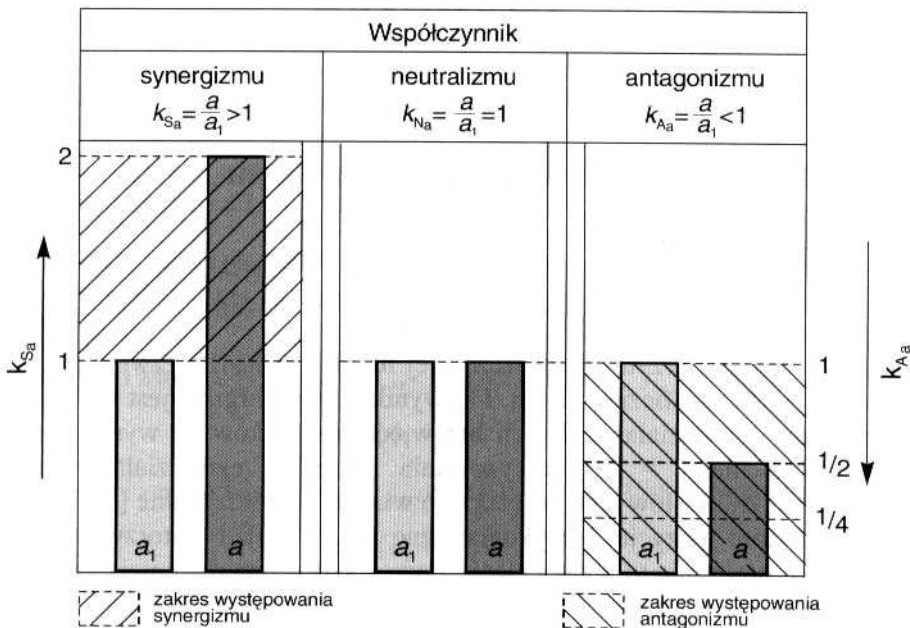
W ogólnym przypadku oddziaływania czynników rozpatrywanego układu (tu: technologii) może zwiększyć łączny efekt ich oddziaływania (synergizm), nie wpływać na ten efekt (neutralizm) lub zmniejsza łączny efekt (neutralizm). Zatem (rys. 1):

- dla  $k_o > 1$  występuje zawsze współdziałanie czynników: synergizm; współczynnik oddziaływania można nazwać zatem współczynnikiem syner-

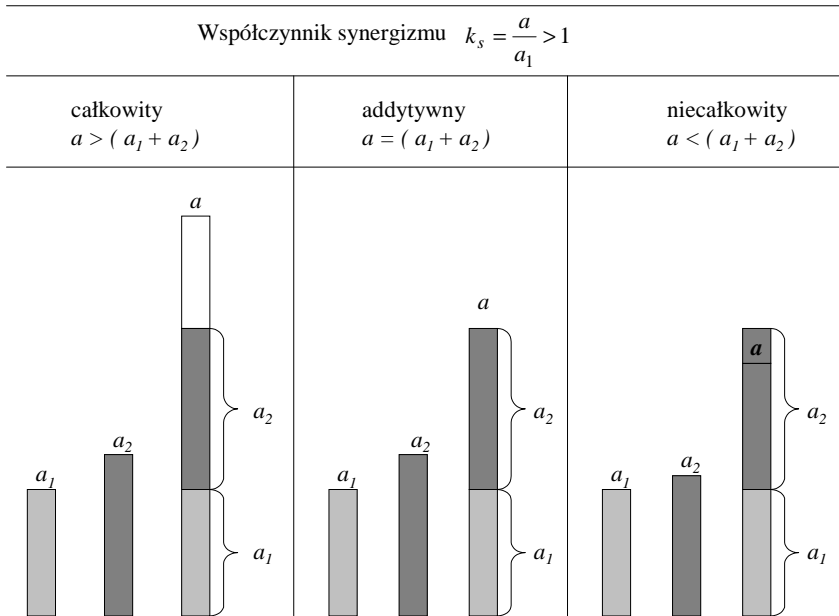
gizmu  $k_S$ ; większe współdziałanie – większy synergizm, większe wartości  $k_S$ ; przy tym synergizm może być [1]: całkowity, addytywny lub niecałkowity (rys. 2);

- dla  $k_o = 1$  występuje zawsze brak oddziaływania czynników układu: neutralizm; współczynnik oddziaływania można nazwać współczynnikiem neutralizmu  $k_N$ ;
- dla  $k_o < 1$  występuje zawsze przeciwnie skierowane oddziaływanie czynników układu: antagonizm; współczynnik oddziaływania przyjmie nazwę współczynnika antagonizmu  $k_A$ ; większy antagonizm – mniejsza wartość  $k_A$ .

Współczynnik oddziaływania  $k_o$  nie jest wielkością, za pomocą której można jednoznacznie określić układ. Każdy układ bowiem, oprócz czynników, charakteryzują różne właściwości, bardziej lub mniej istotne dla opisu jakości układu, np. materiałochłonność, energochłonność. Dla areologii istotne są właściwości technologiczne (potencjalne, np. twardość, struktura, adhezja) i eksploatacyjne (użytkowe, np. wytrzymałość zmęczeniowa, właściwości tribologiczne, właściwości korozyjne) układu, a zwłaszcza trwałość eksploatacyjna.



Rys. 1. Interpretacja graficzna współczynników oddziaływania: synergizmu, neutralizmu, antagonizmu właściwości A utożsamionej z jej wartością  $a$  [1]



Rys. 2. Graficzna interpretacja współczynnika synergizmu całkowitego, addytywnego i niecałkowitego wielkości  $a$  [1]

Między omawianym układem materialnym a systemem areologicznym istnieją ściśle związki, ponieważ elementy systemu areologicznego: rdzeń, warstwa wierzchnia, powłoka są wytwarzane na kolejnych etapach wytwarzania, a ulegają zmianie na kolejnych etapach eksploatacji.

### 3. Efekt kompozycji technologii – synergizm żądanych właściwości

Do wstępnego określania jakości kompozycji technologii areologicznych, zwłaszcza w stosunku do zwiększenia trwałości eksploatacyjnej narzędzi, można przyjąć postępowanie uproszczone:

- 1) należy przyjąć punkt odniesienia: w stosunku do jakiej trwałości bazowej będzie przyjęta trwałość. Proponuje się przyjąć, że jest to trwałość typowego narzędzia bez powłoki, wytworzonego tradycyjną metodą (wielkość  $a_1$ ). Z areologicznego punktu widzenia jest to rdzeń R (stal szybko tnąca) + warstwa wierzchnia WW (stal szybko tnąca zahartowana). Warstwę wierzchnią można dodatkowo:
  - modyfikować, np. przez nagniatanie, obróbkę cieplną lub cieplno-chemiczną, implantowaniem jonów lub poprzez ich kompozycję. Trwałość narzędzia z tak wytworzonym na rdzeniu narzędzi systemem are-

- ologicznym – to wielkość  $a$  dla systemu areologicznego bezpowłokowego,
- na podłożu z modyfikowaną lub niemodyfikowaną warstwą wierzchnią można nanieść powłokę jedną lub kilka. Trwałość narzędzia z tak wytworzoną powłoką – to wielkość  $a$  dla systemu areologicznego powłokowego;
- 2) stosunek wielkości  $a$  do  $a_1$  określa wartość współczynnika synergizmu  $k_s$  lub – inaczej mówiąc – wartość synergicznego oddziaływania między sobą wyrażonego trwałością eksploatacyjną. Im większa jest wartość  $k_s$  – tym większy występuje synergizm między elementami systemu areologicznego, tym lepsza jest kompozycja zastosowanych technologii wytwarzania i tym większa jest trwałość eksploatacyjna narzędzia.

*Ostateczne określenie jakości kompozycji technologii wytwarzania i ich wpływu na jakość eksploatacyjną narzędzi powinno dodatkowo uwzględniać: parametry procesów technologicznych wytwarzania i użytkowania. Przy ich różnej wartości – rozbieżności wartości współczynnika synergizmu trwałości (lub po prostu synergizmu trwałości) mogą być nawet kilukrotne.*

Wykorzystując pojęcie współczynnika synergizmu (tu trwałości, ale nie tylko trwałości może on dotyczyć, bo również: wytrzymałości zmęczeniowej, odporności tribologicznej i korozyjnej), możliwe jest prowadzenie wstępnej i ostatecznej oceny wartościowej (kwantyfikującej ilościowo) narzędzi wytwarzanych różnymi technologiami i pracujących w różnych warunkach.

Dalej podano zbiorcze zestawienie synergizmu technologii wytwarzania zebrane z literatury, przetworzone na potrzeby niniejszego opracowania [8–16].

#### **4. Synergizm trwałości bezpowłokowych systemów areologicznych narzędzi**

W zasadzie wszystkie technologie areologiczne umacniające warstwę wierzchnią są stosowane w systemach areologicznych bezpowłokowych.

Najczęściej stosowane są technologie umacniania cieplnego i cieplno-chemicznego, rzadziej – umacniania mechanicznego, najrzadziej przez implantację jonów.

Dobre wyniki dają kompozycje technologii: cieplnych z cieplno-chemicznymi i mechanicznymi, cieplno-chemicznych z mechanicznymi i wszystkich z implantacją jonów.

W tabeli 1 podano wartości współczynnika trwałości eksploatacyjnej narzędzi zahartowanych, odpuszczonych i azotowanych gazowo, w tabeli 2 – różnych narzędzi skrawających implantowanych jonami azotu. Wynika z nich, że azotowanie nieco mniej niż implantacja jonów do narzędzi zwiększają trwałość różnych narzędzi – w pierwszym przypadku do ponad 3 razy, w drugim – nawet do ponad 6 razy. Wiarygodność danych, zwłaszcza wartości skrajnie wysokich,

zawsze budzi wątpliwości. Najpewniejsze i sprawdzone dane dotyczą kilkudziesięcioprocentowej wartości trwałości.

Tabela 1. Trwałość narzędzi skrawających ze stali X82WMo6.5 zahartowanych, odpuszczonych i azotowanych gazowo (grubość warstwy azotowanej 0,01-0,02 mm) [8]

Narzędzia skrawające		Materiał skrawany (wg PN, DIN, TGL)	Współczynnik synergizmu trwałości
Nieobrobione		-	1
Wiertło spiralne	φ6,75	St38/St52	1,36
	φ8,4	210Cr46	1,73
	φ8,4	St38	1,73
	φ8,4	C60W3	1,66
	φ10,25	22CrMo4	1,56
Wiertło stopniowe	φ15/9	St38/St52	2,17
	φ18/11	St38/St52	1,80
Gwintownik maszynowy	M5	St38	1,43
	M6	St38	1,6
	M8	St38	1,4
	M10	St38	1,73
	M12	22CrMo4	1,25-1,8
	M4 automat.	St38	3,3
Wiertło lufowe	M16	22CrMo4/St50	1,95
	M20	22CrMo4/St50	2,04
	M6	100Cr6	1,6
Frez palcowy do podłużnych otworów	φ2	21Cr46	2,40
	φ2,5	13NiCr18	2,30
	φ3	13NiCr18	2,50
Wiertło dwuostrzowe φ4-9		100Cr6	2,0
Nóż krążkowy		100Cr6	2,0
Frez trzpieniowy φ8		400Cr4N	2,5
Frez walcowo-czołowy do frezowania zgrubnego φ40		400Cr4N	2,0

Tabela 2. Współczynnik synergizmu trwałości eksploatacyjnej systemu: podłoże–implantowane jony (na podstawie prac [9–12])

Zastosowanie systemu		System areologiczny		Współczynnik synergizmu trwałości eksploatacyjnej
grupa	rodzaj	podłoże	jony	
Narzędzia do przeróbki plastycznej	matryce i stemple	stal, węgliki spiekane (WC-Co)	N <sup>+</sup>	2 - 5
	kowadła spęczające łąby nitów z metali szlachetnych	stal 210Cr46	N <sup>+</sup>	2 - 5
	walce do walcarek Cu, Al	stale stopowe	N <sup>+</sup>	3 - 6
	narzędzia do wyłaczania puszek aluminiowych i tub	stal 210Cr46	N <sup>+</sup>	3 - 5
	narzędzia odlewane pod ciśnieniem	stal	N <sup>+</sup>	3 - 5
Narzędzia do cięcia	nożyce	stal narzędziowa	N <sup>+</sup>	2 - 4
		WC-Co	N <sup>+</sup>	5
	nożyce do tworzyw sztucznych	90% Mn; 8% V	N <sup>+</sup>	6
		diamant	N <sup>+</sup>	2 - 4
Narzędzia skrawające	gwintowniki	stal narzędziowa	N <sup>+</sup>	8 - 10
	narzynki	stal narzędziowa	N <sup>+</sup>	3 - 4
	wierćta do metali	stal narzędziowa	N <sup>+</sup>	1,2 - 6
		twarde spieki	N <sup>+</sup>	1,2 - 6
	wierćta dentystyczne	WC-Co	N <sup>+</sup>	2 - 3
	wierćta do obwodów drukowanych	stal szybko tnąca	N <sup>+</sup>	4
		węgliki spiekane	N <sup>+</sup>	4
	frezy krążkowe	stal szybko tnąca	N <sup>+</sup>	2 - 3
noże do gwintów	stal szybko tnąca	N <sup>+</sup>	5	
noże krążkowe	stal szybko tnąca	N <sup>+</sup>	11	

## 5. Synergizm trwałości powłokowych systemów areologicznych narzędzi

Pośród technologii powłokowych do poprawy trwałości eksploatacyjnej narzędzi najczęściej stosowane są różne odmiany technologii CVD i PVD, znacznie rzadziej technologie natryskiwania cieplnego i stopowania lub przetopieniowe technologie laserowe i elektronowe. Coraz częściej stosowane są powłoki wielowarstwowe, w tym modulowane. Cienkimi i twardymi powłokami przeciwzużyciowymi bardzo często pokrywa się narzędzia skrawające, rzadziej do obróbki plastycznej.

W tabeli 3 podano wartości współczynnika trwałości eksploatacyjnej ważniejszych grup narzędzi skrawających ze stali szybko tnących i z podłożami z ceramiki narzędziowej. Szczególnie dobre wyniki można odnotować dla ostrzy skrawających z węgla spiekane go powlekanego powłoką trójwarstwową: TiC + TiN + regularny BN. Warto zwrócić uwagę na duży rozrzut trwałości wiertel krętych i gwintowników (rys. 3) – może on być nawet 10-krotny.

Tabela 3. Wartości współczynnika trwałości eksploatacyjnej wybranych grup narzędzi skrawających ze stali szybko tnących i z podłożami z ceramiki narzędziowej

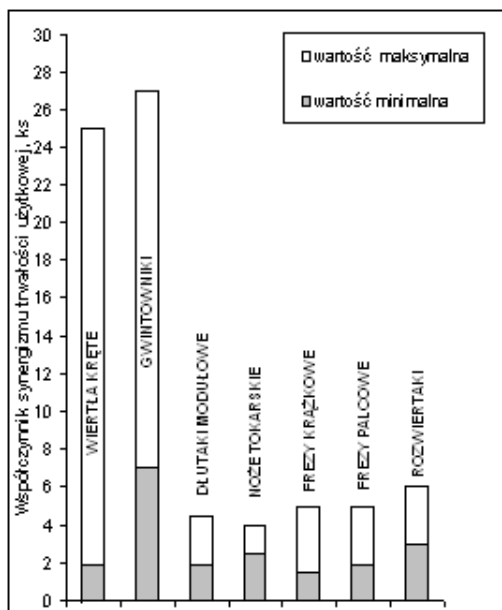
Narzędzia		System areologiczny		Współczynnik synergizmu trwałości eksploatacyjnej
		podłoże	powłoka	
Z metalowym ostrzem skrawającym	Wiertła ø2-ø26	stal szybko tnąca	TiN, TiN-Ti, (Ti,Zr)N, Ti(C,N)	1,7-25
	Gwintowniki M12-M16		TiN, (Ti,Zr)N, (Ti,Al,V)N	15,2-27
	Noże tokarskie składane		TiN, ZrN, (Ti,Cr)N, (Ti,Zr)N	2,5-3,8
	Dłutki modułowe		TiN-Ti	1,7-4,5
	Frezy		TiN-Ti	1,6-2,5
	Noże		TiC+TiN	6,5
			TiC+TiN+cBN	33
Ostrza skrawające		ceramika narzędziowa biała	TiC+BN	3,2
		węgiel spiekany S20S	TiC+TiN TiC+TiN+C·BN	6,5 15-33

Współczynnik synergizmu trwałości eksploatacyjnej niektórych narzędzi z naniesionymi twardymi powłokami przeciwzużyciowymi [17, 18].



Tablica 4. Współczynnik synergizmu trwałości eksploatacyjnej matryc kuźniczych po azotowaniu pokrytych różnymi powłokami przeciwzużyciowymi (na podstawie danych z pracy [15])

System areologiczny			Materiał obrabiany	Współczynnik synergizmu trwałości eksploatacyjnej
rdzeń	warstwa wierzchnia	powłoka		
stal EN X38CrMoV5.3	azotowana gazowo	CrN	EN C45	3,2
stal EN X40CrMo5.1	azotowana gazowo	CrN	EN 25CrMo4	2,0
stal EN X32CrMoV3.3	azotowana gazowo	CrN	EN100 Cr6	1,8
		(Cr/TiN)x3		3,8
		(Cr/TiN)x8 g = 8µm		6,0



Rys. 3. Zestawienie zbiorcze współczynników synergizmu trwałości różnych grup narzędzi skrawających z twardymi powłokami przeciwzużyciowymi na ostrzach skrawających (głównie na podstawie danych z prac [17,18])

W tablicy 4 pokazana 2–6-krotny wzrost trwałości eksploatacyjnej matryc kuźniczych uzyskany w wyniku połączenia azotowania z następnym nanoszeniem powłok pojedynczych i modulowanych.

## Wnioski

1. Synergizm ma podłoże filozoficzno-moralne, ale w sposób niezwykle oczywisty występuje w technice, co stwarza przesłanki do jego świadomego wykorzystania.
2. Pojęcie współczynnika oddziaływania i wynikające stąd pojęcie współczynnika synergizmu pozwala na liczbową ocenę wartościującą stosowane w areologii kompozycje technologii wytwarzania i eksploataowania pod kątem ich różnych właściwości.
3. Analiza zagadnienia synergizmu w odniesieniu do technologii, poprzez wykorzystanie pojęcia współczynnika synergizmu, umożliwia określenie:
  - efektywności użytkowej stosowanych technologii,
  - wybór najlepszej kompozycji spośród porównywalnych technologii, pozwalających na uzyskanie takiej samej efektywności eksploatacyjnej.
4. Współczynnik oddziaływania i współczynnik synergizmu może być wykorzystywany nie tylko do analizy kompozycji technologii areologicznych, ale i innych niż areologiczne technologie wytwarzania i eksploatacji [16].
5. Podobnie jak w tribologii posiadanie wiarygodnych tablic współczynnika tarcia byłoby korzystne, tak w areologii korzystne byłoby posiadanie wiarygodnych tablic współczynnika synergizmu – zwłaszcza w aspekcie tworzenia baz danych.

## Bibliografia

1. Burakowski T.: Rozważania o synergizmie w inżynierii powierzchni, Radom, Wydawnictwo Politechniki Radomskiej, 2004.
2. Burakowski T.: Koefficient synergizma (sinergetiki) technologii, „Problemy Mashinostroeniija i Avtomatyzacii”, 2002, nr 1, s. 54–57.
3. Burakowski T.: Badanie synergizmu wybranych technik inżynierii powierzchni, „Problemy Eksploatacji” 2000, nr 2, s. 55–66.
4. Burakowski T.: Synergism in surface engineering, “Phisico-Chemical Mechanics of Materials”, Spec. Issue, 2000, nr 1, s. 639–642.
5. Burakowski T.: Synergizm w eksploatacji, „Problemy Eksploatacji”, 2001, nr 4, s. 89–102.
6. Burakowski T.: The proposal of determining quantitative synergism in surface engineering, Proc.: 3-rd International Conference on Surface Engineering (Oct. 10–13, 2002, Southwest Jiaotong University, Chengdu, P.R. China). Wersja polska: o możliwościach kwantyfikacji oddziaływania synergicznego w inżynierii powierzchni, Prace naukowe Politechniki Radomskiej, 2002, nr 1, s. 17–28.
7. Haken H.: Sinergetics: an introduction. Springer Verlag, Heidelberg-Berlin-New York, 1978 i 1997.

8. Eckstein H.J.: Technologie der Wärmehandlung von Stahl. VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie. Leipzig 1987.
9. Richter E.: Verschleißschutz durch Ionenimplantation. „Schmierungstechnik“, nr 11, 1985, s. 324–326.
10. Fromson R.E., Kossowski R.: Ion implanted process and its results for tools. “Industrial Heating”, nr 9, 1984, s. 24–28,
11. Ehringer M., Böhm P., Lauffer H.J.: Ionimplantieren und Anwendungspotential ionenimplantieren Werkzeuge. „Werkstattechnik“, 77, 1978, s. 475–478.
12. Gregg I. jr.: The observations of defect structures in nitrogen ion implanted WC-Co. “Scripta Metallurgica”, vol. 17, nr 6, June 1986, s. 765–768.
13. Kupczyk M.: Jakość technologiczna i użytkowa ostrzy skrawających z powłokami przeciwzużyciowymi, Rozprawy, nr 30, Poznań, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, 1997.
14. Kupczyk M., Inżynieria powierzchni. Powłoki przeciwzużyciowe na ostrza skrawające, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2004.
15. Smolik J.: Rola warstw hybrydowych typu warstwa azotowana/powłoka PVD w procesie zwiększania trwałości maszyn kuźniczych. Instytut Technologii Eksploatacji – Państwowy Instytut Badawczy, Radom 2007.
16. Burakowski T., Możliwości wykorzystania pojęcia „współczynnika synergizmu w projektowaniu procesów technologicznych, Materiały V Ogólnopolskiej Konferencji Naukowo-Technicznej „Projektowanie Procesów technologicznych TPP’2006, 19–20.10.2006 Poznań, Politechnika Poznańska, Wyd. Komisja Budowy Maszyn PAN, Oddział w Poznaniu, Poznań 2006.

Recenzent:

**Tadeusz WIERZCHOŃ**

### **Synergism of manufacturing technologies and durability of areological systems of tools**

#### **Key words**

Areology – surface engineering, synergism, coefficient of synergism, composition of technology, quantification of technology synergism.

**Summary**

The information on composition of manufacturing technology and on quantification of composition of this technology by authors introduction of idea of coefficient of interaction and – as derivative – the coefficient of synergism was done. The effect of composition of technology (the synergism of demand proprieties) was discussed and number–set of coefficient of synergism of durability exploitation of tools – as function of manufacturing technology for the areological coating system and core system was described. The farther possibilities of utilization of idea of synergism coefficient were presented.