BIBLIOTEKA

ZESZYTY
NAUKOWE
POLITECHNIKI
ŚLĄSKIEJ

P. 3361/77

MECHANIKA

Z. 61
GLIWICE
1977

SPIS TREŚCI

Str.

GENEZA I CEL PRACY 3
PRZEGLĄD LITERATURY ŹRÓDŁOWEJ 5
WŁAŚNOSCI TWORZYW SZTUCZNYCH WARSTWOWYCH . . 7
PROCES SKRAWANIA 13
ZUŻYCIE OSTRZA NARZĘDZIA 32
SIŁY SKRAWANIA 41
TEMPERATURA SKRAWANIA 56
JAKOŚĆ WYROBU 66
ZALECANE WARUNKI SKRAWANIA 74
SKRAWALNOŚĆ TWORZYW SZTUCZNYCH WARSTWOWYCH . 86
WNIOSKI 93
LITERATURA 95
STRESZCZENIA 101

POLITECHNIKA ŚLĄSKA BIBLIOTEKA GŁÓWNA W GLIWICACH

POLITECHNIKA ŚLĄSKA

ZESZYTY NAUKOWE

Nr 520

P. 3361/77

JAN DARLEWSKI

WYBRANE ZAGADNIENIA OBRÓBKI WIÓROWEJ TWORZYW SZTUCZNYCH WARSTWOWYCH

(SKRÓT)

PL ISSN 0434–0817

GLIWICE 1977

OPINIODAWCY

Prof. dr inż. Jan Kaczmarek

Prof. dr hab. inż. Jerzy Bursa

REDAKTOR NACZELNY WYDAWNICTW UCZELNIANYCH
POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ

Jan Bandrowski

REDAKTOR DZIAŁU

Jan Darlewski

SEKRETARZ REDAKCJI

Jan Znamirowski

Wydano za zgodą
Rektora Politechniki Śląskiej

Dział Wydawnictw Politechniki Śląskiej
Gliwice, ul. Kujawska 2

Nakł. 130+85 Ark. wyd. 5,8 Ark. druk. 6,5 Papier offset. kl. III. 70x100, 70 g
Oddano do druku 30 5.1977 Podpis. do druku 2 9.1977 Druk ukończ. we wrześniu 1977
Zamówienie 813/77 Cena zł 15,—

Skład, fotokopie, druk i oprawę
wykonano w Zakładzie Graficznym Politechniki Śląskiej w Gliwicach

P. 311/77

1. GENEZA I CEL PRACY

Dynamiczny rozwój produkcji i stosowania tworzyw sztucznych w różnych gałęziach gospodarki spowodował potrzebę zajęcia się zagadnieniem ich obróbki. Spośród wszystkich gatunków tworzyw sztucznych, podlegających obróbce, na szczególną uwagę zasługują tworzywa warstwowe zwane również laminatami, stosowane szeroko jako materiały elektroizolacyjne i konstrukcyjne. Produkowane są one przeważnie w postaci półfabrykatów, jak np. płyty, rury lub pręty, zaś gotowy wyrób otrzymywany jest na drodze dalszej obróbki, zwykle wiórowej.

Do produkcji tych tworzyw stosowane są żywice utwardzalne fenolowo-formaldehydowe, epoksydowe, melaminowe, poliestrowe, silikonowe i poliuretanowe, zaś jako nośniki papier, tkaniny z włókien bawełnianych, syntetycznych, szklanych i azbestowych, maty i pasma z włókna szklanego oraz arkusze tektury azbestowej.

Tablica 1

Ważniejsze wyroby z tworzyw warstwowych

Żywica / Nośnik	Fenolowo-formaldehydowa F	Melaminowa M	Poliestrowa P	Epoksydowa E	Silikonowa S
papier celulozowy Pc	P,Pd,Pf, Rz,L	Pd		Rz	
papier azbestowy Pa	(P),(R), (L)			P	P
tkanina celulozowa Tc	P,Rz,L	(P),(R), (L)		P,Rz	
tkanina nylonowa Tn	(P),(R), (L)				
tkanina szklana Ts	P,Rp,Rz, L	P,(R), (L)	(P),(R)	P,Pf,Rp, Rz,L	P,Rp,Rz L
tkanina azbestowa Ta	P,(R), (L)	(P),(R), (L)		(P)	
maty szklane Ms	(P)	(P)	P	(P)	
pasma szklane (roving) Rs	(Rz),(Lc) (Pc)		(Rz), (Lc)	(Rz),(Lc (Pc)	

P - płyty prasowane
Pd - płyty dekoracyjne
Pf - płyty foliowane miedzią
Pc - płyty CBAM
R - rury
Rp - rury prasowane
Rz - rury zwijane
L - pręty i listwy prasowane Lc - pręty ciągłe
Wyroby krajowe wg katalogu ZPTS "Erg" [63].
Wyroby nieprodukowane w kraju podano w nawiasie.

Badania procesów obróbki skrawaniem tworzyw sztucznych warstwowych prowadzone są na Politechnice Śląskiej w Gliwicach od kilkunastu lat. Dla potrzeb przemysłu opracowano, w oparciu o obszerne badania, normatywy źródłowe doboru warunków skrawania tych tworzyw dla toczenia [36], wiercenia [32] i przecinania piłami tarczowymi [34]. Niniejsza rozprawa stanowi próbę uogólnienia wyników dotychczasowych prac w tej dziedzinie.

Celem poznawczym pracy jest przedstawienie procesu skrawania tworzyw sztucznych warstwowych w ujęciu kompleksowym, z uwzględnieniem specyfiki budowy tworzywa.

Celem utylitarnym jest określenie najważniejszych zależności technologicznych, mogących stanowić podstawę do optymalizacji obróbki tych tworzyw.

W pracy starano się stosować nomenklaturę przyjętą w podstawowej literaturze z zakresu obróbki wiórowej [61], z uwzględnieniem zaleceń CIRP [62]. Jednostki wszystkich omawianych wielkości fizycznych podano w układzie SI, jedynie czas określano również w minutach lub godzinach. Przy korzystaniu z danych literaturowych obok jednostek SI pozostawiono nieraz jednostki układu technicznego zgodnie z oryginałem.

2. PRZEGLĄD LITERATURY ŹRÓDŁOWEJ

W ostatnim ćwierćwieczu pojawiła się na świecie ogromna ilość publikacji dotyczących własności, technologii i możliwości użytkowania tworzyw sztucznych. Wśród tej lawiny informacji nieproporcjonalnie mały udział stanowią jednak pozycje traktujące o obróbce tworzyw sztucznych. Spośród tych publikacji większość stanowią opracowania o charakterze praktycznym, podające wskazówki dotyczące warunków obróbki ogólnie określonych grup lub rodzajów tworzyw sztucznych. Nieliczne tylko pozycje odnoszą się do konkretnych gatunków tworzyw. Przykładowo w tablicy 2 przedstawiono stan literatury dotyczącej obróbki skrawaniem tworzyw warstwowych. Publikacje podzielono na trzy grupy, w zależności od stopnia szczegółowości opracowania. W grupie A ujęto prace oryginalne - w tym doktorskie - przedstawiające materiał źródłowy z badań własnych, w grupie B prace przeglądowe referujące dane źródłowe, zaś w grupie C prace o charakterze poradnikowym, podające zalecane warunki obróbki, często nawet bez powołania się na źródła. Należy zauważyć, że niejednokrotnie własności tworzyw o tej samej nazwie, lecz wytwarzanych przez różnych producentów, wykazują duże rozbieżności. Stąd trudno nieraz znaleźć w literaturze zagranicznej odpowiedniki gatunków krajowych. Brak kompletności danych odnośnie cech materiałowych powoduje więc duże rozbieżności w zalecanych warunkach obróbki [24] [107]. Analizując tablicę 2 można stwierdzić, że dla szeregu gatunków tworzyw i rodzajów obróbki brak jest zupełnie danych literaturowych, zaś opracowań pełnowartościowych jest niewiele.

Zestawienie ważniejszej literatury dotyczącej obróbki skrawaniem tworzyw sztucznych warstwowych. Liczby odpowiadają pozycjom spisu literatury. Litery określają rodzaj opracowania: A - prace źródłowe z badań własnych (w tym doktorskie), B - prace przeglądowe z badań własnych i literatury, C - zalecane warunki skrawania.

Rodzaj tworzywa	Rodzaj obróbki skrawaniem									
	przecinanie			toczenie	struganie i dłutowanie	wiercenie	pogłębianie i rozwiercanie	gwintowanie	frezowanie	szlifowanie
	piłami tarczowymi	piłami taśmowymi	ściernicami							
papierowe celulozowo-fenolowe	A-34,46,84,104 B-64,105 C-10,17,20,72,81,101,115,119,121,127,129,132	C-10,72,81,101,115,119,127,132	B-64,105 C-20	A-36,69,70,100,107 B-64,105,119,122 C-6,17,20,72,81,82,101,115,121,132	C-6,54,72	A-9,32,56 B-64,105,119,122 C-6,17,20,72,77,80,81,101,121,132	B-105 C-20	C-6,80	A-41,56,104 B-76,105,119,122 C-20,72,81,97,101,115,121	B-105 C-72,121
laminaty dekoracyjne	C-45	C-45				C-45				
tkaninowe bawełniano-fenolowe	A-34,46,58,104, B-105 C-20,101,115,119,121	B-105 C-20,101,115,119 121	B-105 C-20,121	A-36,47,57,100,102,107,124, B-64,105,119,122 C-20,101,115,121	A-102 C-20,121	A-9,32,56,102 B-64,105,119,122 C-20,101,121	B-105 C-20		A-41,56,102,104 B-76,105,119,122 C-20,101,115,121	B-105 C-20,121
tkaninowe bawełniano-melaminowe				A-65 B-64,122 C-127						
tkaninowe nylonowo-fenolowe				C-6,80		C-80		C-80		
laminaty na nośniku szklanym (bez określenia żywicy)	C-44,54,77,101,103,106,115,128,134	C-103,115,119,128,132	B-105 C-2,10,17,44,49,77,88,119,127,128	C-17,44,77,81,101,103,106,108,128,134	C-6,106,129	C-6,17,44,49,81,88,101,106,126	B-105	C-6,106 119	C-77,81,101,106,128,134	B-105 C-88
szkło-fenolowe	A-22,23,34,58,84 B-64,105 C-20,121	C-80,121	B-64 C-20,121	A-23,36,71,79,97,98,99,100,107,117,118 B-64,105,119,122 C-115,121		A-7,15,32,89 B-64,90,105,119,122 C-20,121	B-90	B-59	A-58,104 B-90,105,119,122 C-20,115,121	C-121
szkło-melaminowe	A-34,84		B-64	C-6		A-32				
szkło-epoksydowe	A-34,84 B-89,105			A-28.29,30,36,50,29,98,99,107,131 B-105,119 C-6		A-7,32,89 B-90,105,119,122	B-90	B-59	B-89,90,105,122 C-119	
szkło-poliestrowe	B-64 C-130	C-51	B-64 C-2,51,67	A-98 C-51		A-9 B-105 C-51			C-51	
szkło-silikonowe				A-98 B-122 C-6						
azbestowo-fenolowe			B-105	B-105 C-20		C-20				B-105

3. WŁASNOŚCI TWORZYW SZTUCZNYCH WARSTWOWYCH

3.1. Czynniki wpływające na własności laminatów

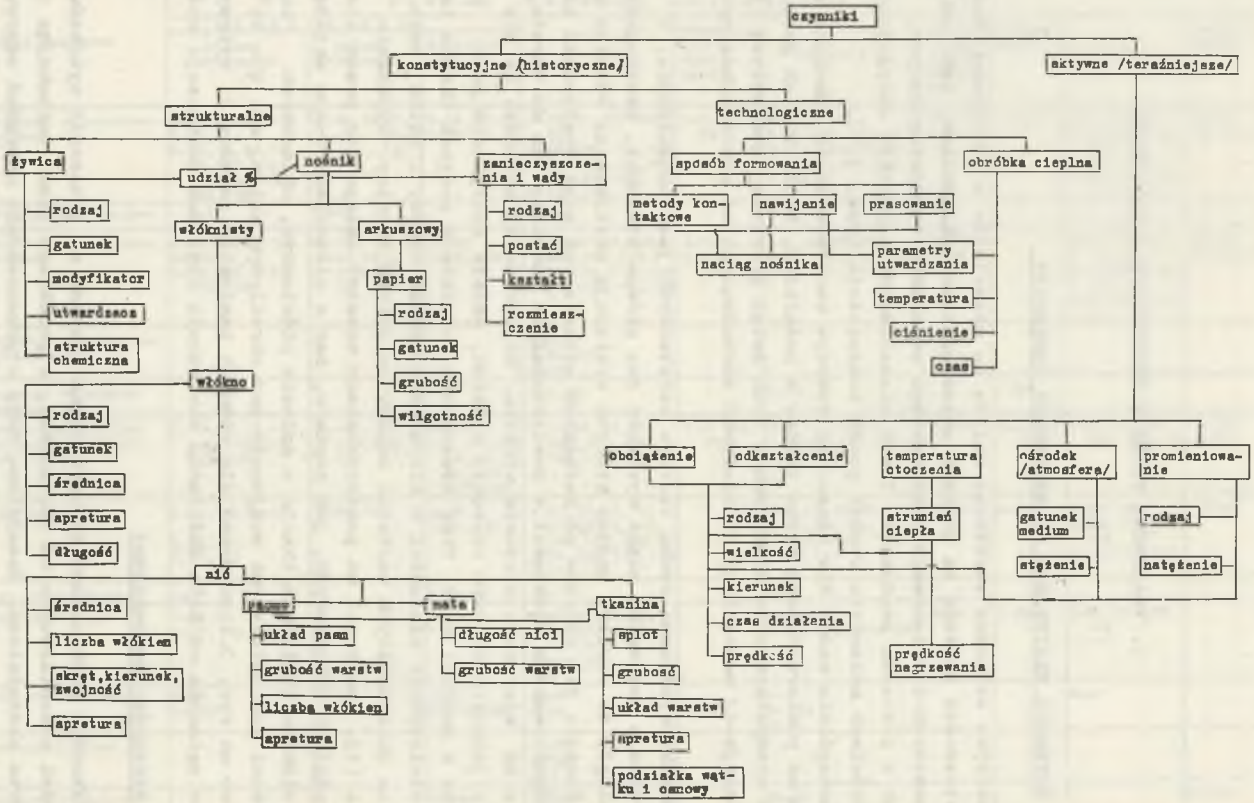
Tworzywa sztuczne warstwowe należą do materiałów o złożonej budowie, ich własności zależne są od cech poszczególnych składników, ich udziałów procentowych i orientacji oraz szeregu czynników technologicznych, związanych z procesem produkcji. Ilość niezależnych czynników decydujących o własnościach materiału wynosi ponad dwadzieścia (rys. 3.1).

Szczególnie ważne dla własności tworzyw warstwowych są zjawiska zachodzące na powierzchniach styku żywicy z nośnikiem. Wiele z nich jest jeszcze niedostatecznie zbadanych i brak dotąd przyjętej jednolitej teorii wyjaśniającej mechanizmy oddziaływań zachodzących na powierzchni granicznej.

Charakterystyczną cechą tworzyw warstwowych jest anizotropia. W każdym rodzaju laminatów można wyróżnić dwa główne kierunki, prostopadły i równoległy do warstw, wzdłuż których występują ekstremalne różnice własności. Ponadto dla tworzyw na nośnikach włóknistych mogą występować kierunki zróżnicowanych własności w powierzchniach równoległych do warstw, zależnie od kierunków ułożenia włókien. Najwyraźniej zachodzi to dla tworzyw o jednokierunkowym ułożeniu włókien, często spotykanym przy użyciu nośnika w postaci pasm. Przy stosowaniu nośników w postaci tkanin istnieje zróżnicowanie własności w kierunkach wzdłuż osnowy i wątku, przy czym różnica ekstremalnych wartości zależy od splotu tkaniny. Uzyskanie ortotropii (tj. izotropii na powierzchniach warstw) osiąga się przez stosowanie nośników arkuszowych, jak papieru, mat o niezorientowanym układzie ciętych włókien względnie tkanin o splocie płóciennym, układanych kolejno warstwami zorientowanymi wzajemnie pod określonym kątem, np. $\varphi = 45^{\circ}$. Przykładowo na rys. 3.2 pokazano dla różnych laminatów zależność wytrzymałości na zginanie od kąta działania obciążenia względem orientacji nośnika.

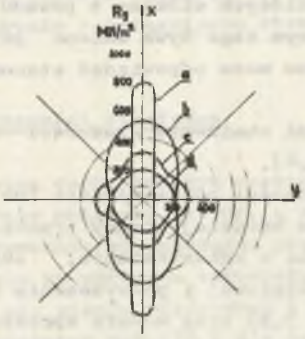
3.2. Własności mechaniczne

Własności mechaniczne tworzyw można oceniać na podstawie wykresów zależności odkształcenia od obciążenia, z przebiegu linii wnioskując o charakterze okdsztalceń. Zasadniczą rolę w przenoszeniu naprężeń odgrywa nośnik. Z szeregu przeprowadzonych badań [87, 120, 135, 19, 1, 92] wynika, że liniową zależność obciążenia od wydłużenia prawie aż do osiągnięcia granicy wytrzymałości zachowują tylko laminaty na nośniku szklanym, obcią-



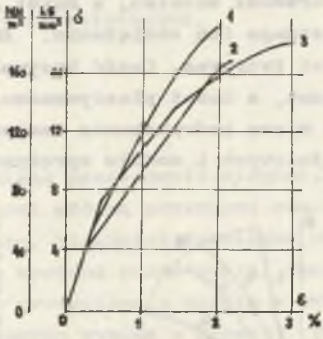
Rys. 3.1. Czynniki warunkujące własności laminatów

żane wzdłuż włókien. Dla innych typów wzmocnienia włóknem szklanym krzywa rozciągania składa się z dwóch odcinków prostych o różnym nachyleniu i często jeszcze z końcowej części krzywoliniowej [73,78,125,95] (rys. 3.3).



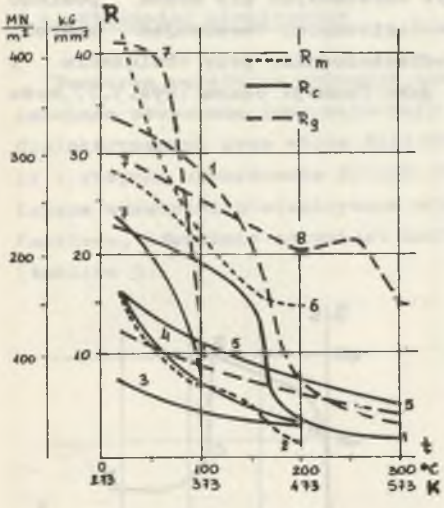
Rys. 3.2. Wytrzymałość na zginanie laminatów szkło-poliestrowych [3]

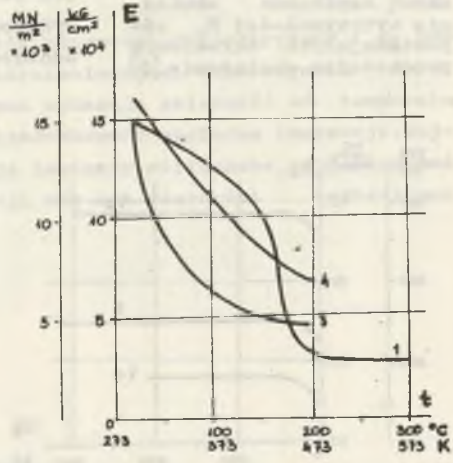
Nośnik: a - pasma jednokierunkowe, b - tkanina o splocie satynowym skośnym, c - tkanina o splocie płóciennym, d - mata. Oś x - kierunek osnowy, oś y - kierunek wątku



Rys. 3.3. Wykres rozciągania laminatów szkło-poliestrowych

Nośnik: 1 - tkanina [73], 2 - mata [73], 3 - mata orientowana [78]



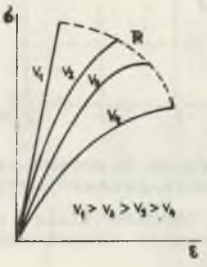


Rys. 3.4. Zależność wytrzymałości na rozciąganie R_m, ściskanie R_c i zginanie R_g oraz modułu sprężystości E od temperatury

1 - laminat tkaninowy szkło-epoksydowy G-Etronax Ep11 wzdłuż osnowy [29], 2 - laminat tkaninowy szkło-epoksydowy Cevausit-57 wzdłuż osnowy [50], 3 - laminat tkaninowy szkło-fenolowy KACT wzdłuż osnowy [5], 4 - laminat tkaninowy szkło-fenolowy BĘT-C wzdłuż osnowy [5], 5 - tłoczywo szkło-fenolowe AG-4B [85], 6 - tłoczywo szkło-epoksydowe 33-18-C [85], 7 - laminat tkaninowy poliestrowo-szklany [128], 8 - laminat tkaninowy szkło-fenolowy formowany próżniowo i utwardzony w temperaturze t = 523 K = 250 °C [75]

Końce obu odcinków prostych odpowiadają osiągnięciu pierwszej i drugiej granicy proporcjonalności. Pierwsza granica proporcjonalności związana jest z lokalnym utraceniem adhezji żywicy do włókna szklanego i wzajemnymi przesunięciami w tworzywie. Powstają wtedy mikropęknięcia w żywicy i na powierzchni włókien, a nawet pęknięcia niektórych włókien z powodu nierównomiernego ich obciążenia. Efektem wizualnym tego bywa zmiana przejrzystości tworzywa. Część krzywoliniowa wykresu może odpowiadać stanom: sprężystemu, a nawet plastycznemu.

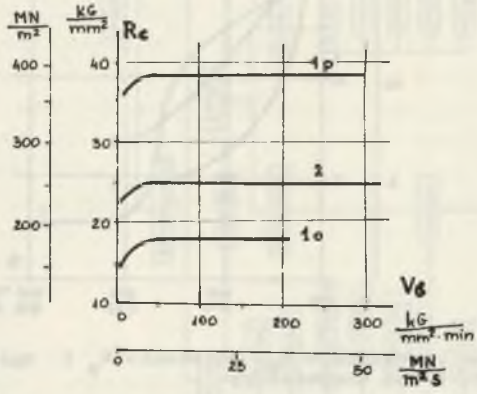
W miarę podwyższania temperatury zachodzi obniżenie własności wytrzymałościowych i modułu sprężystości (rys. 3.4).



Rys. 3.5. Wpływ prędkości obciążania v na przebieg zależności odkształcenia od obciążenia. Linią kreskową oznaczono obwiednię wytrzymałości R, odpowiadających określonym prędkościom obciążenia [5]

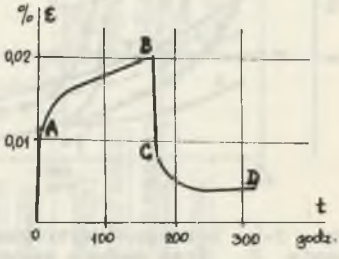
Wzrost prędkości odkształcania lub obciążania powoduje bardziej stromy przebieg krzywych obciążenie - odkształcenie, skrócenie części krzywoliniowej i podwyższenie wytrzymałości (rys. 3.5) oraz modułu sprężystości, przy czym wytrzymałość wzrasta asymptotycznie do wartości granicznej (rys. 3.6). Wpływ wzrostu prędkości odkształcania na własności mechaniczne tworzyw warstwowych jest więc przeciwny do wpływu wzrostu temperatury.

Przy rozpatrywaniu własności mechanicznych tworzyw warstwowych nie można pominąć ich cech reologicznych. Obserwując wykresy cykliczne odkształcenia, przy obciążaniu i odciążaniu jako funkcji czasu (rys.3.7),moż-



Rys. 3.6. Wykres zależności wytrzymałości na ściskanie R_c od prędkości obciążania v_6 [5].

1 - laminat tkaninowy szkło-fenolowy GΦT-C prostopadle do warstw (P) i wzdłuż osnowy (O), 2 - laminat szkło-fenolowy CBAM prostopadle do warstw



Rys. 3.7. Wykres cyklu obciążenia i odciążenia przy ściskaniu w układzie odkształcenie - czas dla laminatu tkaninowego szkło-fenolowego KACT-B wzdłuż wątku przy naprężeniach o wartości $\sigma = 90$ kN/m² [5]

na wyróżnić cztery odcinki: OA - szybkie obciążenie ze stałą szybkością odkształcenia, AB - pełzanie (powolny wzrost odkształcenia przy stałym obciążeniu), BC - szybkie odciążenie i CD - odwrotne pełzanie (nawrót). Całkowity zanik odkształcenia w określonym czasie po odciążeniu świadczy o lepko-sprężystym obszarze odkształceń tworzywa, zaś pozostające odkształcenie trwałe o osiągnięciu obszaru odkształceń plastycznych.

3.3. Własności termiczne

Istotną cechą tworzyw warstawowych jest niska przewodność cieplna, kilkaset razy mniejsza niż np. u stali, co stanowi główną przyczynę znacznego nagrzewania się narzędzi przy ich skrawaniu. Własności termiczne zmieniają się ze wzrostem temperatury i wykazują wyraźną anizotropię. Zmniejszanie się ciepła właściwego i współczynnika przewodzenia ciepła w zakresie temperatur 520-770 K dla tworzyw epoksydowych wynika z gorszej przewodności cieplnej gazów, jakie powstają w porach tworzywa w czasie jego destrukcji [113]. Intensywność rozkładu tworzywa zależy nie tylko od temperatury, ale również od szybkości nagrzewania, ciśnienia i rodzaju ośrodka.

3.4. Własności elektryczne

Tworzywa warstwowe wykazują znakomite własności dielektryczne i są powszechnie stosowane jako materiały elektroizolacyjne. Współczynnik strat dielektrycznych oraz stała dielektryczna wykazują zależność od temperatury i stopnia utwardzenia żywicy oraz kierunkowość względem laminacji. Najlepsze własności dielektryczne wykazują laminaty silikonowe, najgorsze zaś fenolowe, odwrotnie natomiast kształtują się ich własności mechaniczne (tablica 3).

Tablica 3

Ważniejsze własności fizyczne tworzyw sztucznych warstwowych

Właściwość	Jednostka	płyty warstwowe																		
		papierowe | tkaninowe celulozowo-fenolowe				tkaninowe szklano-fenolowe				tkaninowe szklano-epoksydowe			tkaninowe szklano-silikonowe			tkaninowe szklano-poliestrowe		tkaninowe szklano-melaminowe		anizotropowe szklano-epoksydowe
		PcF2	PcFE	TcFE2	TcFE	TsFE	STF[x]	KAST-B[x]	SOC2[xx]	TsE-150	CTЭ[x]	STEF[xx]	TsK	SKL-9[x]	SSR[xx]	ST-911	GSS[xx]	TsM	3212[xx]	CBAM-M[x]
Gęstość	g/cm³	1,3-1,4	1,3-1,4	1,3-1,4	1,3-1,4	1,6-1,8	1,6-1,7	1,85	1,6-1,8	1,6-1,8	1,6-1,8	1,7-1,8	1,6-1,8	1,35	1,7	1,67	1,8	1,9	1,8-2	1,8-2
Temperatura ugięcia wg Martensa	K	423	433	413	418	493	513	583	-		453	-	-	583	-	458	-	-	-	473
Wytrzymałość na zginanie prostopadle do warstw	MN/m²	130	150	130	150	150	277	126	200	370	250	350	100	155	125	178	350	195	270	700
Wytrzymałość na rozciąganie	MN/m²	90	120	60	80	120	322	210	100	260	275	220	88	-	90	650	380	175	180	450
Wytrzymałość na ściskanie prostopadle do warstw	MN/m²	60	150	-	150	70	130	-	150	190	-	200	-	85	50	66	260	210	180	450
Udarność prostopadle do warstw	kJ/m²	15	24	25	35	90	90	40	50	130	150	100	40	-	40	490	200	-	50	500
Oporność właściwa powierzchniowa	Ω	10^{11}	10^{10}	10^{10}	-	10^{11}	10^{12}	10^{12}	10^{11}	10^{13}	10^{13}	10^{18}	10^{12}	10^{14}	10^{12}	-	10^{13}	-	10^{10}	10^{13}
Próba napięciowa prostopadle do warstw	kV/mm	6,5	-	2,5	-	18	80	23	6,6	-	-	13,3	8	5	8,3	-	85	-	6,6	-
Współczynnik strat dielektrycznych przy częstotliwości: 50 Hz	-	0,05	-	-	-	0,07	0,01	-	0,1	0,03	0,005	0,05	0,06	-	0,05	-	-	-	0,1	0,003
przy częstotliwości: 1 MHz	-	-	-	-	-	-	-	0,018	0,2	0,03	0,037	0,05	0,01	0,018	0,05	0,087	0,008	-	0,8	-
Współczynnik cieplnej rozszerzalności liniowej	1/K	-	-	-	-	$2\cdot10^{-5}$	$8\cdot10^{-6}$	$8,3\cdot10^{-6}$	-	-	$6,8\cdot10^{-6}$	$1,8\cdot10^{-5}$	-	-	-	$3,5\cdot10^{-6}$	$1,5\cdot10^{-6}$	$5\cdot10^{-6}$	-	-
Współczynnik przewodzenia ciepła	W/mK					0,24	0,33	0,27		-	0,28	0,35	-	-	-	0,48	0,35	0,3	-	-
Ciepło właściwe	J/gK					1,05	1,0	-		-	0,92	-	-	-	-	1,6	-	1,03	-	-

Właściwość	Jednostka	rury prasowane				rury zwijane							pręty			
		tkaninowe				papierowe | tkaninowe			papierowe | tkaninowe				papierowe | tkaninowe			
		celulozowo-fenolowe	szklano-fenolowe	szklano-epoksydowe		celulozowo-fenolowe		szklano-fenolowe	celulozowo-epoksydowe		szklano-epoksydowe		celulozowo-fenolowe		szklane fenolowe	szklane epoksydowe
		TcFE	TsF	TsE-130	TsE-160	PcF	TcF	TsF	PcE	TcE	TsE-130	TsE-155	PcF	TcF	TsF	TsE-155
Gęstość	g/cm³	1,2	1,7	1,7	1,8	1,05	1,05	1,6	-	-	1,7	1,7	1,35	1,35	1,7	1,7
Wytrzymałość na zginanie prostopadle do warstw, co najmniej	MN/m²	100	150	300	300	80	80	150	70	80	180	290	120	120	180	360
Wytrzymałość na ściskanie równolegle do warstw, co najmniej	MN/m²	100	70	160	600	45	80	100	60	110	150	160	80	100	120	280
Oporność właściwa powierzchniowa	Ω	10^{9}	10^{10}	10^{12}	10^{13}	10^{11}	10^{10}	10^{11}	10^{11}	10^{10}	10^{12}	10^{13}	10^{11}	10^{10}	10^{11}	10^{12}
Próba napięciowa prostopadle do warstw	kV/mm	5	8	40	25	25	5	15	40	15	30	40	10	3	11	15
Współczynnik strat dielektrycznych przy częstotliwości 50 Hz	-	-	-	-	-	0,05	-	0,1	0,02	-	0,03	0,02	-	-	-	-
przy częstotliwości 1 MHz	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

x - produkcja ZSRR

xx - produkcja NRD

4. PROCES SKRAWANIA

4.1. Ogólna charakterystyka procesu skrawania polimerów

Skrawanie jest procesem bardzo złożonym, gdyż jego przebieg jest uzależniony od wielu czynników związanych z materiałem obrabianym, narzędziem, obrabiarką i warunkami skrawania (tabl. 4.1). Scharakteryzowanie tego procesu wymaga m.in. podania modelu powstawania wióra, określenia sił tworzenia wióra i sił cząstkowych działających na ostrze oraz temperatur stykowych. Każdy z czynników, opisujących proces skrawania, można by wyrazić jako funkcję zbioru parametrów wg relacji:

$$A = f(X_i, Y_j, Z_k, U_l, V_m), \qquad (4.1)$$

gdzie:

X_i - zbiór parametrów charakteryzujących własności przedmiotu obrabianego,

Y_j - zbiór parametrów charakteryzujących własności narzędzia,

Z_k - zbiór parametrów charakteryzujących własności obrabiarki wraz z uchwytami,

U_l - zbiór parametrów charakteryzujących własności płynu obróbkowego,

V_m - zbiór parametrów charakteryzujących kinematykę skrawania,

przy czym:

$i = 1 \ldots n, \quad j = 1 \ldots o, \quad k = 1 \ldots p, \quad l = 1 \ldots r, \quad m = 1 \ldots s.$

Należy jednak pamiętać, że szereg parametrów - szczególnie X_i i Y_j - jak też postać funkcji f ulega zmianom w trakcie procesu skrawania, przy czym w wielu przypadkach zachodzi sprzężenie zwrotne między chwilowymi warunkami, w jakich proces zachodzi, a parametrami charakteryzującymi własności materiału obrabianego lub narzędzia (rys. 4.1). Prowadzi to oczywiście do postaci uwikłanych funkcji typu

$$A = f\left[X_i(A), Y_j(A), Z_k, U_l, V_m\right] \qquad (4.2)$$

i powoduje ogromne skomplikowanie modelu matematycznego.

Tablica 4.1

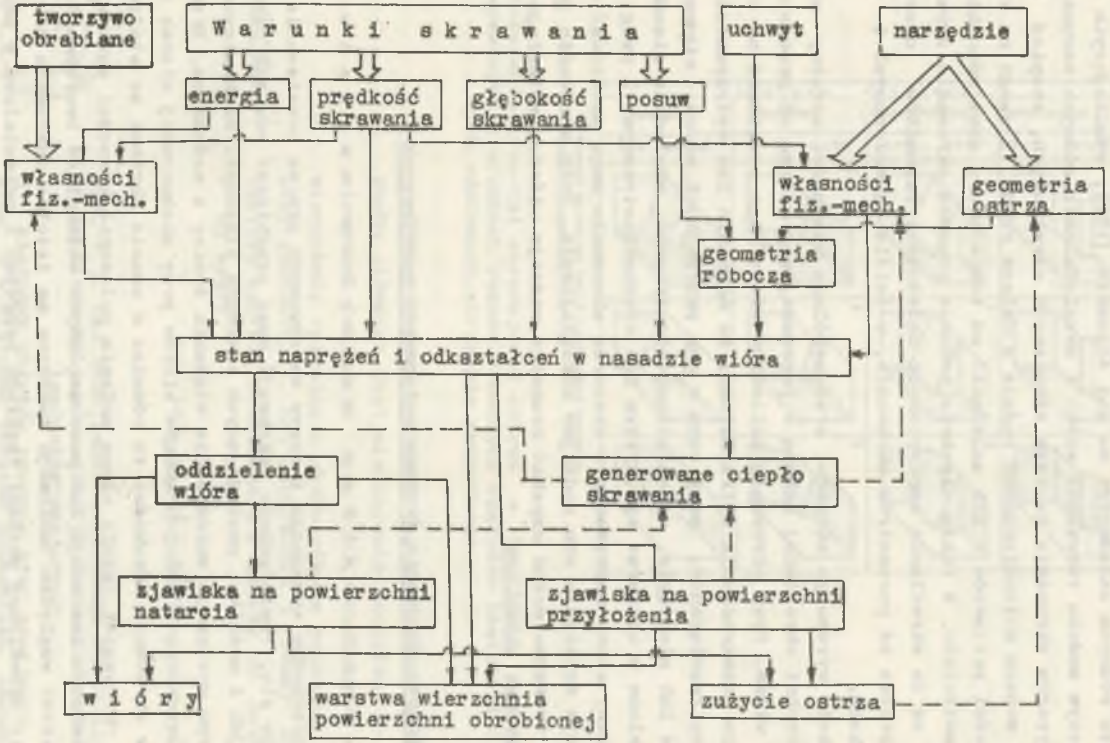
Ważniejsze czynniki związane z procesem skrawania

	cechy przedmiotu obrabianego	cechy narzędzia skrawającego	cechy obrabiarki wraz z uchwytami	Warunki obróbki: sposób i odmiana obróbki	Warunki obróbki: rodzaj i parametry skrawania	Warunki obróbki: cechy płynu obróbkowego
Czynniki wpływające na proces skrawania tworzyw	geometryczne: - kształt - wielkość ... sztywność statyczna i dynamiczna własności materiału: - sprężysto-plastyczne (lepko-sprężysto-plastyczne jak np. granica sprężystości, granica plastyczności; naprężenia niszczące przy rozciąganiu, ścinaniu i ścinaniu; udarność; twardość; moduł sprężystości; liczba Poissona) - cierne (współczynnik tarcia, ścierność) - cieplne (ciepło właściwe, współczynnik przewodzenia ciepła, współczynnik rozszerzalności cieplnej, temperatury charakterystyczne np. zeszklenia, mięknięcia, topnienia, zapłonu, rozkładu) - elektryczne i magnetyczne - fizykochemiczne (budowa atomowa i strukturalna, stopień polimeryzacji, wilgotność) - jednorodność - kierunkowość temperatura początkowa	geometryczne: - kształt - wielkość - geometria ostrza (kąty na ostrzu, kształt powierzchni roboczych, promień wierzchołka ostrza, promień zaokrąglenia krawędzi skrawającej) ... sztywność statyczna i dynamiczna własności materiału ostrza: - mechaniczne (granica sprężystości; granica plastyczności; naprężenia niszczące przy rozciąganiu, ścinaniu, zginaniu i ścinaniu; udarność, twardość, moduł sprężystości, liczba Poissona) - cierne (współczynnik tarcia, ścieralność) - cieplne (ciepło właściwe, współczynnik przewodzenia ciepła, współczynnik rozszerzalności cieplnej, temperatury charakterystyczne np. mięknięcia, utleniania) - elektryczne i magnetyczne - fizykochemiczne (budowa atomowa i strukturalna) - jednorodność - kierunkowość temperatura początkowa ostrza	geometryczne: - kształt - wielkość dynamiczne: - moc napędu sztywność statyczna i dynamiczna	toczenie: - wzdłużne, poprzeczne - zewnętrzne, wewnętrzne - czołowe, woinające struganie: - wzdłużne, poprzeczne, - obwiedniowe przeciąganie: - wewnętrzne, zewnętrzne - prostoliniowe, obrotowe, śrubowe wiercenie powiercanie pogłębianie rozwiercanie frezowanie: - walcowe, czołowe - przeciwbieżne, współbieżne - obwiedniowe przecinanie: -tarczowe, taśmowe	skrawanie: - swobodne, nieswobodne - prostokątne, ukośne prędkość skrawania głębokość skrawania i posuw lub grubość i szerokość warstwy skrawanej kąty ostrza w układzie roboczym kierunek ruchu głównego względem laminacji tworzywa kierunek ruchu posuwowego względem laminacji tworzywa stałość parametrów skrawania	skład chemiczny -rodzaj składników ciekłych, stałych i gazowych - udziały składników własności płynu: - cieplne (ciepło właściwe, współczynnik przewodzenia ciepła, temperatury charakterystyczne) - fizykochemiczne np. lepkość, zwilżalność - elektryczne wydajność miejsce i sposób doprowadzenia temperatura początkowa

Czynniki opisujące proces	w obszarze powstawania wióra:	na powierzchni natarcia:	na powierzchni przyłożenia:
	stan naprężeń i odkształceń praca rozkład temperatur	rozkład naprężeń i odkształceń tarcie i przebieg zużycia rozkład temperatur siły szczątkowe	rozkład naprężeń i odkształceń tarcie i przebieg zużycia rozkład temperatur siły szczątkowe nalep

Ogólnie:
rodzaje wiórów i sposób ich powstawania
współczynnik spęczenia wióra
siły skrawania i ich dynamika
praca i moc skrawania
bilans cieplny
temperatura styku

Czynniki wynikowe procesu (efekty)	w odniesieniu do przedmiotu obrobionego:			w odniesieniu do narzędzia:	w odniesieniu do odpadów:
	makrogeometria: - dokładność kształtu - dokładność wymiaru - anomalie	mikrogeometria: - chropowatość powierzchni - kierunkowość struktury geometrycznej powierzchni	warstwa wierzchnia: - zmiany składu i struktury - zgniot - rozkład twardości - rozkład naprężeń - anomalie	zużycie ostrza: - starcie - wykruszenia - odkształcenia plastyczne - pęknięcia - zmiany składu i struktury warstwy wierzchniej - zmiana wymiarów	kształt wiórów zanieczyszczenia płynu obróbkowego zanieczyszczenia atmosfery pyłami i gazami



Rys. 4.1. Uproszczony schemat związków między czynnikami w procesie skrawania tworzyw

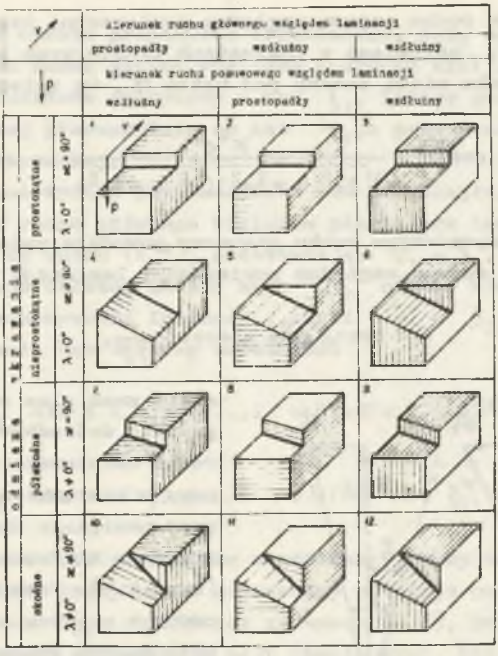
Zauważyć należy, że trudności te tłumaczą wystarczająco fakt braku zadawalającej ogólnej teorii skrawania pomimo ponad stuletnich badań nad skrawaniem metali. Przykładem może tu być choćby opublikowanie ponad czterdziestu różnych zależności na kąt ścinania [109], wynikających z różnic w przyjętym modelu tworzenia wióra i uwzględnianiu różnych warunków tarcia. W przypadku skrawania tworzyw sztucznych warstwowych, stopień skomplikowania modelu matematycznego rośnie o dalsze rzędy, z uwagi na reologiczne własności polimerów i ich zależność od temperatury oraz różnokierunkową budowę materiału. W takim aspekcie badania procesu skrawania zwykle sprowadzone są do określania empirycznych zależności czynników charakteryzujących proces od parametrów skrawania, w ściśle ograniczonych i ustalonych warunkach.

Jakość wyrobu po obróbce, a szczególnie własności warstwy wierzchniej powierzchni obrobionej zależą w przeważającej mierze od procesu powstawania wióra. Przy skrawaniu polimerów wióry mogą powstawać na skutek lokalnego przekroczenia wytrzymałości na ścinanie lub wytrzymałości rozdzielczej na rozciąganie, przy czym w obu przypadkach można otrzymać wióry ciągłe lub nieciągłe, odkształcone plastycznie, względnie nieodkształcone oddzielone w obszarze sprężystym lub wysokoelastycznym. Z uwagi na możliwe zmiany stanu naprężenia w obszarze skrawania mogą powstawać wióry przy złożonym działaniu obu rodzajów odkształcenia. Przy skrawaniu jednego gatunku tworzywa można uzyskać rozmaite rodzaje wiórów, zmieniając odpowiednio warunki skrawania.

4.2. Proces skrawania tworzyw sztucznych warstwowych

4.2.1. Ruch ostrza względem uwarstwienia

W przypadku skrawania tworzyw warstwowych proces powstawania wióra komplikuje się. Powierzchnia dekohezji musi przebiegać wówczas zarówno w żywicy jak i nośniku, posiadających odmienne własności mechaniczne; często przy tym występuje zniszczenie wiązania żywicy z nośnikiem. Efektem tego jest uzyskiwanie różnych rodzajów wiórów przy nieznacznej nieraz zmianie warunków skrawania. Zachodzi to również w czasie obróbki ze stałymi parametrami skrawania, jeżeli ulega zmianie położenie krawędzi skrawającej względem kierunku laminacji lub poszczególnych składników tworzywa. Kierunek ruchu ostrza względem laminacji tworzywa ma istotne znaczenie dla rozwinięcia się określonej postaci rozkładu naprężeń i odkształceń w nasadzie wióra. Na rys. 4.2 przedstawiono podstawowe położenia krawędzi skrawającej względem laminacji tworzywa przy struganiu lub przeciąganiu, gdzie prostoliniowy kierunek ruchu ostrza pokrywa się z kierunkiem ruchu głównego.



Rys. 4.2. Położenie krawędzi skrawającej ostrza w tworzywie warstwowym przy 3 podstawowych kierunkach ruchów roboczych względem laminacji i różnych odmianach skrawania swobodnego

Przy toczeniu prętów i rur zwijanych kierunek ruchu głównego jest nieznacznie nachylony do powierzchni laminacji (rys. 4.3), stanowiącej powierzchnię spiralną o skoku równym grubości warstwy laminatu s. Kąt nachylenia ϑ równy kątowi wzniosu spirali Archimedesa δ zależy od średnicy d wg wzoru:

$$tg\vartheta = tg\delta = \frac{s}{\pi d}. \qquad (4.3)$$

Rys. 4.3. Kąt nachylenia ϑ kierunku ruchu głównego do kierunku laminacji przy toczeniu wzdłużnym laminatów zwijanych

m - kierunek obrotów rdzenia przy nawijaniu nośnika, n - kierunek obrotów przedmiotu obrabianego przy toczeniu

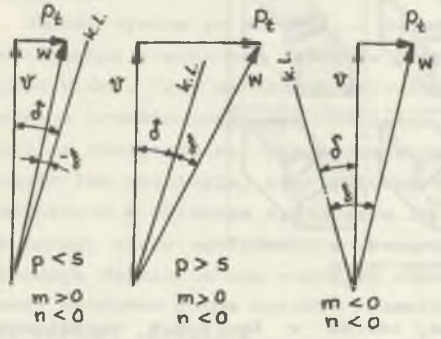
Kierunek ruchu ostrza, odpowiadający kierunkowi wektora prędkości skrawania w, jest wypadkowym kierunkiem wektorów prędkości ruchu głównego v i posuwowego p. Przy toczeniu wzdłużnym, ruch posuwowy nie wpływa na kąt

nachylenia kierunku ruchu ostrza względem powierzchni laminacji $\xi = \zeta$ określony wzorem (4.3), natomiast w laminatach tkaninowych powoduje nachylenie względem kierunku nitki osnowy pod kątem η, wg zależności:

$$\cos\eta = \frac{\pi^2 d^2}{\sqrt{(p^2 + \pi^2 d^2)(s^2 + \pi^2 d^2)}} \tag{4.4}$$

Przy toczeniu poprzecznym ruchu posuwowy powoduje zmianę kąta nachylenia kierunku ruchu ostrza względem powierzchni laminacji wg zależności:

$$\xi = \operatorname{arctg}\frac{p}{\pi d} \pm \operatorname{arctg}\frac{s}{\pi d}, \tag{4.5}$$



Rys. 4.4. Kąt nachylenia ξ kierunku ruchu ostrza do kierunku laminacji przy toczeniu poprzecznym laminatów zwijanych

v - prędkość obwodowa, p_t - prędkość posuwu, w - wypadkowa prędkość skrawania, p - posuw, δ - kąt wzniosu spirali Archimedesa nawinięcia nośnika, s - skok wzniosu spirali równy grubości warstwy laminatu, m - kierunek obrotów rdzenia przy nawijaniu nośnika, n - kierunek obrotów przedmiotu przy toczeniu, k.l. - kierunek styczny do laminacji tworzywa

gdzie znak plus odnosi się, przy posuwie dośrodkowym, do kierunku ruchu obrotowego przy toczeniu zgodnego z kierunkiem obrotu rdzenia przy nawijaniu tkaniny, zaś znak minus do kierunku przeciwnego (rys. 4.4). Przy toczeniu poprzecznym z posuwem odśrodkowym zależność między znakami a kierunkiem obrotu jest odwrotna. W szczególnych przypadkach dla p = s przy przeciwnych kierunkach toczenia i nawinięcia i posuwie dośrodkowym oraz przy zgodnych kierunkach i posuwie odśrodkowym wektor prędkości skrawania jest styczny do powierzchni laminacji.

Przy toczeniu wyciętych z płyt tkaninowych krążków o osi prostopadłej do warstw kierunek ruchu głównego jest równoległy do płaszczyzn laminacji. Kierunek ruchu ostrza przy toczeniu poprzecznym pozostaje równoległy, zaś przy toczeniu wzdłużnym jest nachylony pod kątem ξ_1 według wzoru

$$tg\,\xi_1 = \frac{p}{\pi d}. \tag{4.6}$$

Cyklicznej zmianie natomiast ulega kąt nachylenia kierunku ruchu głównego względem kierunku dowolnej nici η_1 wg zależności

$$\left.\begin{aligned} \eta_1 &= \omega - k\pi \quad \text{dla } k = 0,1,2\ldots \text{i } \omega \in (k\pi, \tfrac{2k+1}{2}\pi) \\ \eta_1 &= k\pi - \omega \quad \text{dla } k = 1,2,3\ldots \text{i } \omega \in (\tfrac{2k-1}{2}\pi, k\pi) \end{aligned}\right\} \tag{4.7}$$

gdzie ω jest kątem obrotu przedmiotu obrabianego, przy założeniu $\eta_1 = 0$ dla $\omega = 0$. Kierunek ruchu ostrza względem kierunku nici jest na skutek ruchu posuwowego dodatkowo odchylony o kąt ξ_{31}, leżący przy toczeniu poprzecznym w tej samej płaszczyźnie co kąt η_1, a przy toczeniu wzdłużnym w płaszczyźnie prostopadłej.

Przy toczeniu wyciętych z płyt wałków o osi równoległej do warstw kąt nachylenia kierunku ruchu głównego względem płaszczyzn laminacji χ_2 zmienia się cyklicznie wg wzoru (4.7), podstawiając $\eta_1 = \chi_2$. Ruch posuwowy wzdłużny nie powoduje dalszej zmiany kąta ξ_2 między kierunkiem prędkości skrawania a płaszczyznami laminacji, czyli $\xi_2 = \chi_2$, natomiast posuw poprzeczny zmienia kąt ξ_3 wg zależności

$$\left.\begin{aligned} \xi_3 &= \omega - k\pi - \xi_{31} \quad \text{dla } k = 0,1,2,\ldots \text{i} \quad \omega \in (k\pi + \xi_{31},\ \tfrac{2k+1}{2}\pi + \xi_{31}) \\ \xi_3 &= k\pi - \omega + \xi_{31} \quad \text{dla } k = 1,2,3\ldots \text{i} \quad \omega \in (\tfrac{2k-1}{2}\pi - \xi_{31},\ k\pi - \xi_{31}) \end{aligned}\right\} \quad (4.8)$$

gdzie ω jest kątem obrotu przedmiotu obrabianego, przy założeniu $\xi_3 = 0$ dla $\omega = \xi_{31}$. Jak widać stały posuw poprzeczny powoduje przesunięcie fazowe o zmiennej wartości ξ_{31} określonej ze wzoru (4.6), zależnie od zmiany średnicy d. Dla wałków wyciętych z płyt tkaninowych, kąt między kierunkiem ruchu ostrza i kierunkiem nici może być stały lub cyklicznie zmienny zależnie od ułożenia nici i kierunku posuwu.

Przy wierceniu płyt warstwowych kierunki ruchów ostrza względem laminacji są identyczne jak przy toczeniu wzdłużnym, zarówno przy wierceniu prostopadle do warstw jak i równolegle do nich.

Przy frezowaniu walcowym i przecinaniu piłami tarczowymi płyt warstwowych w przypadku osi obrotu narzędzia prostopadłej do warstw kierunek ruchu ostrza jest równoległy do płaszczyzn laminacji. Jeżeli oś obrotu narzędzia jest równoległa do warstw, to wówczas kąt nachylenia ostrza względem laminacji ξ_4 zmienia się wg zależności

$$\operatorname{tg} \xi_4 = \frac{\pi d \sin \omega}{\pi d \cos\omega \pm p}, \quad (4.9)$$

gdzie ω jest kątem obrotu narzędzia przy założeniu $\xi_4 = 0$ dla $\omega = 0$ (tzn. początek układu leży w punkcie styczności obwodu narzędzia z kierunkiem laminacji), znak plus w mianowniku odnosi się do frezowania lub przecinania współbieżnego, a znak minus do przeciwbieżnego.

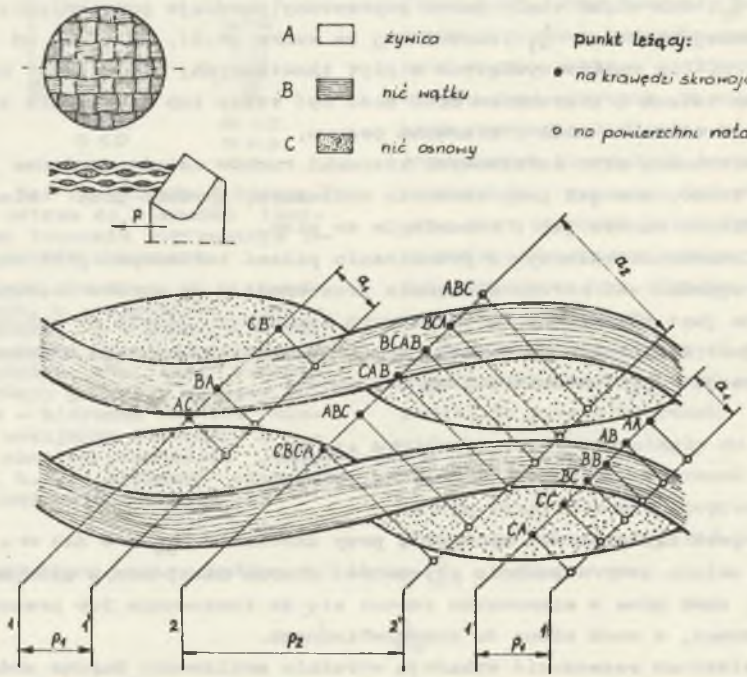
Przedstawione rozważania wykazują wyraźnie możliwości bardzo zróżnicowanego ukierunkowania ruchu ostrza względem uwarstwienia tworzywa, a rozpatrzono tylko przypadki ograniczone do trzech podstawowych położeń laminatu względem narzędzia. Spośród nich w trzech przypadkach (kąty ξ_2, ξ_3 i ξ_4) występuje w czasie skrawania ciągła zmiana kierunku wektora skrawania względem laminacji, powodując ustawiczną zmianę warunków powstawania wióra.

W zdecydowanej większości przypadków obróbki (praktycznie zawsze) zachodzi ustawiczna zmiana składników tworzywa, skrawanych przez ostrze w określonej płaszczyźnie przekroju głównego, zmieniając warunki powstawania wióra. Łatwo daje się to zauważyć przy małych przekrojach warstwy skrawanej, porównywalnych z przekrojami poszczególnych komponentów. Można to wyjaśnić na przykładzie skrawania laminatów tkaninowych, analizując model procesu powstawania wióra [38].

4.2.2. Model skrawania laminatu tkaninowego

Rozpatrzmy model skrawania laminatu z tkaniną szklaną ostrzem o kątach: natarcia $\gamma_o = 0^o$, przyłożenia $\alpha_o > 0^o$, pochylenia krawędzi skrawającej $\lambda = 0^o$ i przystawienia $\varkappa = 45^o$ z prędkością skrawania o kierunku zgodnym z kierunkiem osnowy i posuwem w kierunku wątku tkaniny (pozycja 6 na rys. 4.2).

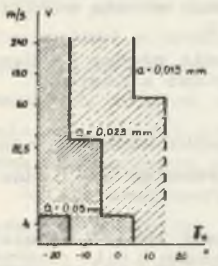
Przypadek taki jest typowy dla toczenia wzdłużnego prętów i rur zwijanych oraz strugania i przeciągania płyt z laminatów. Na rys. 4.5 pokazano



Rys. 4.5. Schemat możliwych kombinacji komponentów tworzywa we wiórze przy skrawaniu laminatu tkaninowego. Kierunek ruchu głównego wzdłuż nici osnowy, kierunek ruchu posuwowego wzdłuż nici wątku

przekrój tworzywa w płaszczyźnie podstawowej z zaznaczonymi położeniami krawędzi ostrza, oznaczonymi 1 i 2 dla dwóch posuwów oraz ślady płaszczyzn przekrojów głównych, oznaczone literami A,B,C. Litery te odpowiadają poszczególnym komponentom tworzyw a ich kombinacje zestawione przy poszczególnych płaszczyznach przekrojów głównych wskazują, które składniki są w danym przekroju chwilowo skrawane. Przy założonych kątach $\gamma_o = 0^o$ i $\lambda = 0^o$ powierzchnia natarcia leży w płaszczyźnie podstawowej, tak więc punkt początkowy (pierwsza litera) odcinka przekroju głównego znajduje się na krawędzi skrawającej, zaś punkt końcowy (ostatnia litera) na powierzchni natarcia w odległości równej grubości warstwy skrawanej a. Przy małych posuwach p_1 o wartości rzędu grubości spłaszczonej nitki (np. ok. 0,1 mm dla rur z tworzywa gatunku TsE 130) w jednym przekroju głównym istnieje dziewięć możliwych kombinacji, zawierających jeden lub dwa z trzech komponentów tworzywa. Przy większych posuwach p_2 o wartości zbliżonej do szerokości spłaszczonej nitki (np. ok. 0,4 - 0,5 mm dla TsE 130) ilość możliwych kombinacji zwiększa się, gdyż występują tu wszystkie składniki w różnej kolejności, a nawet z sąsiedniej warstwy.

Jako przypadki elementarne należy rozpatrzeć skrawanie pojedynczych komponentów (AA,BB i CC na rys. 4.5).



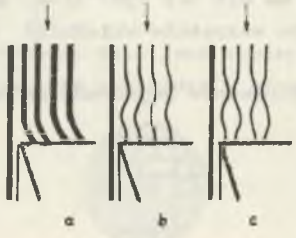
Rys. 4.6. Zakres parametrów skrawania umożliwiających powstawanie ciągłego wióra ścinanego przy skrawaniu swobodnym czystej żywicy poliestrowej [64]. Linie graniczne przedstawiają maksymalne grubości warstwy skrawanej a zapewniające powstawanie wióra ciągłego przy danej prędkości skrawania v i kącie natarcia γ_o

Przy skrawaniu czystej żywicy (AA) mogą wystąpić różne rodzaje wiórów zależnie od jej gatunku, prędkości skrawania, grubości warstwy skrawanej i kąta natarcia. Wióry ciągłe powstają [64] np. przy skrawaniu żywicy epoksydowej tylko przy bardzo cienkich warstwach o grubości $a < 0{,}02$ mm, niskich prędkościach skrawania $v < 1$ m/s i ujemnych kątach natarcia $\gamma_o = 0^o \div -10^o$, zaś przy żywicy poliestrowej w niewiele szerszym zakresie parametrów (rys. 4.6). Poza zakresem tych parametrów powstają wióry nieciągłe. Charakterystyczne są tu wióry odrywane (odłupywane), powstające w sprężyście odkształconej warstwie na skutek przekroczenia wytrzymałości rozdzielczej. Oderwane nieregularne cząstki odprowadzane są zarówno przez powierzchnię natarcia jak też i przez powierzchnię przyłożenia. Cząstki te nie są ze sobą powiązane. Przy wysokich prędkościach skrawania większość cząstek stanowi drobny pył.

Przy skrawaniu nici wątku (BB) włókna szklane ułożone równolegle do powierzchni natarcia ostrza zostają oddzielane w odcinkach o długości rów-

nej wartości posuwu. Ponieważ są one między sobą słabo związane ich zachowanie można by porównać do materiału ciągliwego. Daje się tu wyróżnić strefę, odpowiadającą strefie ścinania. Oddzielone luźne cząstki włókien nie mają charakteru typowego wióra i są odprowadzane głównie przez powierzchnię natarcia ostrza.

Przy skrawaniu nici osnowy (CC) włókna szklane ułożone prostopadle do powierzchni natarcia ostrza trafiają na nią swymi czołami. Ulegają one odginaniu lub wybaczaniu. W pierwszym przypadku powstaje szczelina wybiegająca wprzód od krawędzi skrawającej, oddzielająca warstwę włókien od reszty materiału (podobnie do odłupywania słojów drewna). W drugim przypadku poszczególne włókna w nitce mogą wybaczać się zgodnie z fazą lub niezgodnie, co prowadzi do wystąpienia naprężeń stycznych lub normalnych rozdzielających włókna (rys. 4.7). Pękanie włókien następuje przy przekroczeniu



Rys. 4.7. Schemat możliwych odkształceń włókien szklanych przy skrawaniu w przypadku zgodnego kierunku ruchu głównego z osią nici i kąta natarcia ostrza $\gamma_o = 0$.
a - zginanie, b - wyboczenie zgodne w fazie, c - wyboczenie niezgodne w fazie

ich wytrzymałości na zginanie. Poszczególne luźne cząstki włókien odprowadzane są głównie przez powierzchnię natarcia. Mogą również być oddzielane dłuższe odcinki związanych włókien.

Przy jednoczesnym skrawaniu dwóch komponentów opisany sposób oddzielenia jednostkowego wióra nie może podlegać superpozycji, lecz należy uwzględnić zarówno wiązanie składników, jak też ich wzajemne oddziaływanie. Szczegółowa analiza sześciu takich przypadków [38] wykazuje, że wióry związane mogą powstawać tylko przy kombinacjach AC, CA i BC. Przy większych posuwach sytuacja komplikuje się z uwagi na występowanie w jednym przekroju wszystkich komponentów tworzywa.

W rozpatrzonym modelu zawężono proces powstawania wióra do płaszczyzny przekroju głównego w wyidealizowanych warunkach. W rzeczywistości, skrawanie jest procesem przestrzennym, należy go więc traktować jako sumę procesów zachodzących w szeregu równoległych płaszczyzn wzdłuż całej szerokości warstwy skrawanej. Analizowane przypadki elementarne występują w czasie skrawania jednocześnie i kolejno, powstający więc wiór ma w różnych miejscach inny charakter. Przy skrawaniu laminatów o różnokierunkowym ułożeniu warstw tkaniny lub nici (np. CBAM) w jednym przekroju warstwy skrawanej mogą znajdować się te same komponenty o rozmaitej orientacji względem powierzchni natarcia ostrza. Również kierunek ruchu głównego często nie pokrywa się z podstawowymi kierunkami charakterystycznymi dla tworzywa warstwowego.

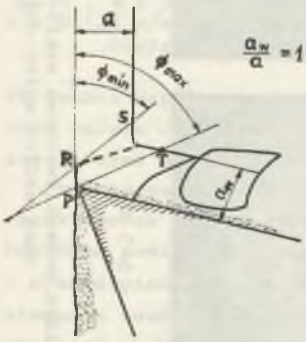
Te przypadki jeszcze bardziej zwiększają możliwości zróżnicowania powstającego wióra i wskazują na wątpliwą celowość rozpatrywania analitycznego modelu powstawania wióra.

4.2.3. Przebieg dekohezji laminatu

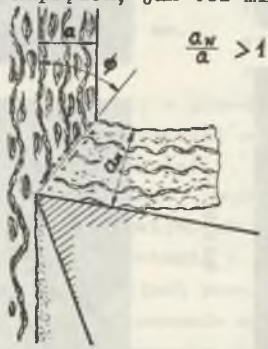
W zakresie praktycznie stosowanych warunków skrawania typowych laminatów wzmocnionych włóknem szklanym można przyjąć, że materiał obrabiany podlega tylko odkształceniom sprężystym. Ostrze noża wywołuje w warstwie skrawanej naprężenia ściskające, zaś w pobliżu krawędzi skrawającej naprężenia rozciągające, które w przypadku przekroczenia wytrzymałości rozdzielczej powodują zapoczątkowanie pęknięcia. Jego przebieg uzależniony jest przede wszystkim od położenia i własności komponentów w tworzywie.

Inicjacja pęknięcia praktycznie może nastąpić w żywicy albo na powierzchni kontaktu żywicy z nićmi lub między włóknami szklanymi, zależnie od tego czy wytrzymałość wiązania komponentów przewyższa wytrzymałość żywicy, czy na odwrót. Wytrzymałość włókna szklanego jest z reguły znacznie wyższa od wytrzymałości żywicy lub wiązania tak, że można pominąć inicjację pęknięcia wewnątrz włókna jako przypadkową, wynikającą jedynie z wad włókien. Czynnikiem sprzyjającym zapoczątkowaniu pęknięcia są mikroszczeliny, pęcherze gazowe lub obce wtrącenia w materiale, których nie zawsze udaje się uniknąć w procesie przetwórstwa laminatu, jak również skutki poprzedniej obróbki zmniejszającej spójność warstwy wierzchniej tworzywa. Należy zauważyć, że mimo szeregu wartościowych prac [18,19,96], brak dotąd zadawalającej teorii wyjaśniającej inicjowanie i propagację pęknięć w tworzywach wzmocnionych włóknem szklanym [48].

Dalsze rozprzestrzenianie się pęknięcia może nastąpić w każdym z komponentów laminatu, przy czym jego przebieg jest uwarunkowany położeniem zarówno linii maksymalnych naprężeń, jak też miejsc o minimalnej wytrzymałości tworzywa. Ogólnie można przyjąć, że pęknięcie to rozbudowuje się ku swobodnej powierzchni materiału, utrzymując się w ograniczonej strefie możliwych pęknięć PRST (rys. 4.8), którą można określić minimalnym i maksymalnym kątem Ø.



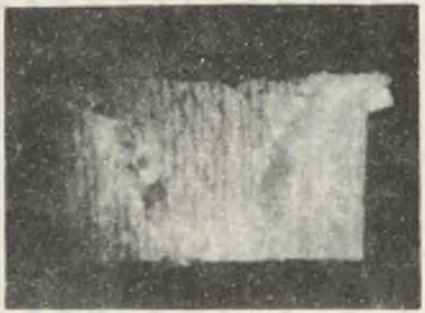
Rys. 4.8. Schemat powstawania wióra odrywanego. PRST - strefa możliwych pęknięć



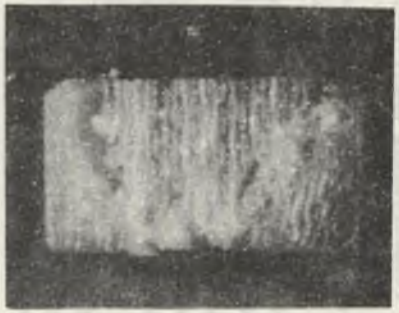
Rys. 4.9. Schemat powstawania wióra ścinanego przy skrawaniu tworzyw wzmocnionych tkaniną szklaną

Na sposób burzenia spójności materiałów kompozycyjnych istotny wpływ ma tzw. efekt skali. Jeżeli skrawanie odbywa się z dużym przekrojem warstwy skrawanej, obejmującej szereg warstw laminatu, można przyjąć, że tworzywo zachowuje się w

403 K



428 K



453 K

503 K

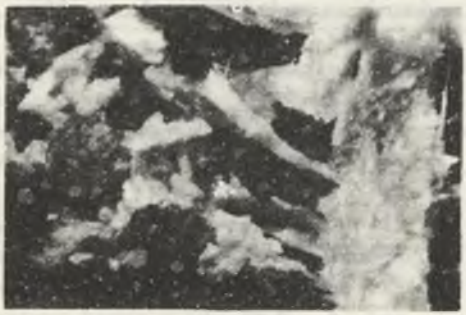
P 503 K

Rys. 4.10. Widok próbek tworzywa szkło-epoksydowego G-Etronax Epl1 po próbie ściskania w różnych temperaturach wzdłuż wątku oraz prostopadle do warstw (P). Powiększenie ok. 7 x

swej odkształcanej masie jak materiał jednolity (choć niejednorodny). W takich warunkach powstawać mogą również wióry ścinane, oddzielane w strefie ścinania leżącej pod kątem Ø (rys. 4.9). Zachodzi tu analogia do strefy ścinania obserwowanej na próbkach poddanych ściskaniu (rys. 4.10), uzysadnionej przez Rosena i Dowa [96] dla jednokierunkowo zbrojonego tworzywa szkło-epoksydowego.

4.2.4. R o d z a j e w i ó r ó w

Przy toczeniu swobodnym, prostokątnym i wzdłużnym rur szkło-epoksydowych powstający wiór (rys. 4.11) stanowią, obok luźnych cząstek żywicy i odcinków włókna szklanego, także wstążki tkaniny z przyczepionymi do nich cząstkami żywicy. Wstążki te zawierają zwykle po jednej warstwie tkaniny na skutek rozwarstwienia tworzywa, zaś szerokość ich a_w jest większa od grubości warstwy skrawanej a. Zgrubienie to jest spowodowane spęczeniem tworzywa i wynika z rozluźnienia tkaniny w kierunku prostopadłym do wektora prędkości skrawania i wciśnięcia w powstałe szczeliny bardzo drobnych cząstek żywicy. Wartości współczynnika zgrubienia wióra k_a zestawiono w tablicy 4.2. W badanym zakresie parametrów skrawania współczynnik k_a mieści się w przedziale $k_a = 1{,}16 - 1{,}34$ przy czym rośnie on w miarę zmniejszania grubości warstwy skrawanej i kąta natarcia oraz zwiększania prędkości skrawania.



Rys. 4.11. Widok wiórów otrzymanych przy toczeniu swobodnym rury szkło-epoksydowej G-Etronax Ep11. Ostrze z węglików spiekanych H1P o geometrii: $\gamma_o = 0^o$, $\alpha_o = 20^o$, $\lambda = 0^o$, $\varkappa = 90^o$. Parametry skrawania: $v = 0{,}166$ m/s, $p = 1{,}66$ mm/obr, $g = 5$ mm. Powiększenie ok. 6x

Przy toczeniu swobodnym, prostokątnym, poprzecznym laminatów szkło-epoksydowych w postaci rur i prętów zwijanych obserwuje się uszkodzenie bocznych powierzchni skrawanego pierścienia w postaci wykruszeń krawędzi i wystrzępień, co przy małych przekrojach warstwy skrawanej sprzyja powstawaniu rozdrobnionego wióra. Przy toczeniu wcinającym w niezmienionych pozostałych warunkach uzyskuje się z reguły wiór związany. Przy grubościach warstwy skrawanej, większych od grubości tkaniny, powstaje wiór ciągły w postaci wstęgi tkaniny z przyczepionymi do niej cząstkami żywicy. Przy wcinaniu szerokość wstęgi b_w jest równa szerokości warstwy skrawanej b, zaś przy toczeniu pierścienia współczynnik poszerzenia wióra $k_b > 1$ natomiast zgrubienie wióra jest znacznie większe przy wcinaniu niż przy to-

Tablica 4.2

Wartości współczynnika zgrubienia wióra k_a określone przy toczeniu prostokątnym swobodnym rur z tworzywa szkło-epoksydowego G-Etronax-Ep11 [30]

Geometria ostrza z węglików spiekanych gat. H1P	prędkość skrawania v m/s	posuw = grubość warstwy skrawanej a mm	średnia grubość wióra a_w mm	odchyłka standartowa S mm	współczynnik zgrubienia wióra $k_a = \frac{a_w}{a}$
$\gamma_o = 6^o$, $\alpha_o = 5^o$, $\lambda = 0^o$, $\varkappa = 90^o$	0,166	2,00	2,32	0,08	1,16
$\gamma_o = 0^o$, $\alpha_o = 20^o$ $\lambda = 0^o$ $\varkappa = 90^o$	0,166	2,00	2,36	0,24	1,18
	0,166	1,43	1,75	0,16	1,22
	0,166	1,00	1,30	0,10	1,30
	0,5	1,43	1,78	0,14	1,25
	0,5	1,00	1,34	0,09	1,34

czeniu swobodnym. Uzyskane orientacyjne wartości współczynników poszerzenia wióra k_b i zgrubienia wióra k_a zestawiono w tablicy 4.3. Wynika z niej, że największe zgrubienie wióra przy toczeniu swobodnym zachodzi dla najmniejszych posuwów, przy grubości warstwy skrawanej mniejszej od grubości warstwy laminatu. Spęczony wiór składa się tu (szczególnie przy grubości warstwy skrawanej a = 0,04 mm) z samej żywicy w postaci wstęgi o wyraźnej członowej budowie (rys. 4.12). Prędkość skrawania nie wykazuje istotnego wpływu na wielkość zgrubienia wióra. Wzrost kąta natarcia γ_o od 0° do 10° powoduje przy prędkościach skrawania $v < 1$ m/s zmniejszenie zgrubienia wióra, natomiast wpływ kierunku toczenia względem kierunku nawinięcia tkaniny nie jest jednoznaczny.

Rys. 4.12. Widok wiórów uzyskanych przy toczeniu swobodnym poprzecznym rury szkło-epoksydowej TsE-130. Ostrze z węglików spiekanych H03 o geometrii: $\gamma_o = 10^o$, $\alpha_o = 20^o$, $\lambda = 0^o$, $\varkappa = 90^o$. Parametry skrawania: v = 3,42 m/s, p = 0,04 mm/obr., g = 5 mm. Kierunek toczenia zgodny z kierunkiem nawinięcia tkaniny. Zmniejszenie 2:3

Rozpatrując omówione zjawisko spęczenia wiórów należy pamiętać, że spęczone wstążki stanowią zawsze tylko pewną część powstałych wiórów, występując jednocześnie z drobnymi cząstkami żywicy i nośnika.

Tablica 4.3

Orientacyjne wartości współczynników odkształcenia wióra: k_a - zgrubienia, k_b - poszerzenia i k_{sp} - spęczenia przy toczeniu poprzecznym rury szkło-epoksydowej TsE-130 ostrzem z węglików spiekanych gat. H03 o geometrii:

$$\gamma_o = 0^o,\ 10^o,\ \alpha_o = 20^o,\ \lambda = 0^o,\ \varkappa = 90^o$$

Rodzaj toczenia	Kąt γ_o	Kierunek	Parametry skrawania p mm/obr	v m/s	g mm	k_b	k_a	k_{sp}
toczenie swobodne	0	Z	0,2	1,08	4	1,06	1,32	1,4
wcinanie	0	Z				1	2,33	2,33

Współczynnik zgrubienia wióra k_a

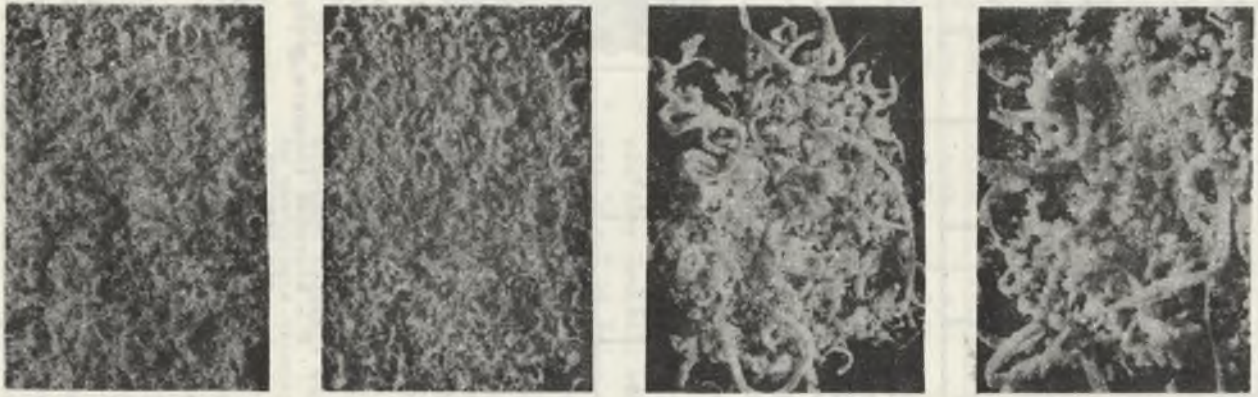
toczenie swobodne (pierścienia o szer. g = 5 mm)	v m/s / p mm/obr	0,04		0,34		2,3		3,4		5,1	
	0,04	-	-	3,6	-	-	-	-	-	-	-
		-	-	-	5,3	-	-	-	5,4	-	-
	0,08	-	-	-	-	-	-	2,7	-	-	-
		-	-	-	-	2,1	-	-	-	1,7	-
	0,10	1,5	-	1,5	-	1,6	-	1,6	-	1,5	-
		-	-	-	-	1,2	-	-	-	1,4	-
	0,21	1,2	1,6	1,1	-	-	-	1,1	-	1,2	-
		1,4	-	-	1,5	-	1,1	-	-	1,3	1,1
	0,40	1,1	1,2	-	-	1,2	-	1,4	-	-	-
		1,1	1,4	-	1,2	-	1,1	-	1,3	-	1,1

Umieszczenie liczby w odpowiednim narożu pola oznacza:

10P 0P 10Z 0Z	10 - kąt natarcia $\gamma_o = 10^o$ 0 - kąt natarcia $\gamma_o = 0^o$ P - kierunek toczenia przeciwny do kierunku nawinięcia tkaniny Z - kierunek toczenia zgodny z kierunkiem nawinięcia tkaniny

4.2.5. Wpływ warunków obróbki na proces powstawania wióra

Posuw i głębokość skrawania, determinując przekrój warstwy skrawanej, decydująco wpływają na proces powstawania wióra. Zwiększenie przekroju warstwy skrawanej powoduje wzrost sił skrawania i podwyższenie temperatury skrawania, co ułatwia wykruszanie żywicy. Wzrost posuwu sprzyja tworzeniu się dłuższych wiórów odcinkowych (rys. 4.13).



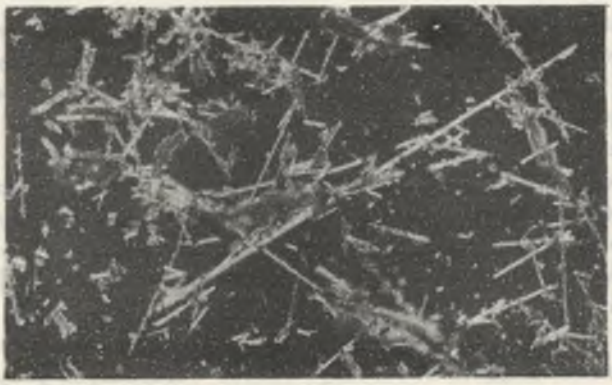
p = 0,08 mm/ob | p = 0,40 mm/obr | p = 1,04 mm/ob | p = 2,08 mm/obr

Rys. 4.13. Wpływ posuwu na kształt wiórów przy toczeniu swobodnym wzdłużnym rury szkło-epoksydowej TsE-130. Ostrze z węglików spiekanych H03 o geometrii: $\gamma_o = 10^o$, $\alpha_o = 20^o$, $\lambda = 0^o$, $\varkappa = 90^o$. Parametry skrawania: v = 0,33 m/s, g = 5 mm, p = oznaczony pod zdjęciami. Zmniejszenie 2:3

Prędkość skrawania wpływa na proces powstawania wióra w sposób bezpośredni i pośredni. Bezpośrednio wywołuje w warstwie skrawanej określoną prędkość odkształcania. Jeżeli jest ona mniejsza od prędkości propagacji pęknięcia, oddzielanie wióra może następować z pełnym rozwinięciem się szczeliny wyprzedzającej ostrze. W przeciwnym przypadku, pęknięcie może rozwijać się stopniowo w żywicy, zatrzymując się na nitkach szklanych i wówczas trudno określić z góry kierunek powierzchni oddzielenia wióra. Zwiększenie szybkości odkształcenia wpływa też na własności mechaniczne tworzywa, podwyższając moduł sprężystości i wytrzymałość. W efekcie, w miarę wzrostu prędkości skrawania, wiór staje się bardziej zróżnicowany, gdyż obok drobnych cząstek żywicy i włókien trafiają się dłuższe odcinki nitek (rys. 4.14 i 4.15). Przy wyższych prędkościach skrawania decydujący

v = 0,06 m/s v = 0,35 m/s v = 5,2 m/s

Rys. 4.14. Wpływ prędkości skrawania na kształt wiórów przy toczeniu swobodnym poprzecznym rury szkło-epoksydowej TsE-130. Ostrze z węglików spiekanych H03 o geometrii: $\gamma_o = 10^o$, $\alpha_o = 20^o$, $\lambda = 0^o$, $\varkappa = 90^o$. Parametry skrawania: g = 5 mm, p = 0,1 mm/obr. Kierunek toczenia przeciwny do kierunku nawinięcia tkaniny. Zmniejszenie 2:3



Rys. 4.15. Widok wiórów z laminatu szkło-fenolowego (rezotekst S) uzyskanych przy toczeniu. Parametry skrawania: v = 6,66 m/s, p = 0,05 mm/obr., g = 3 mm. Powiększenie ok. 50x

wpływ na proces powstawania wióra wywiera temperatura skrawania, powodując stopniowy rozkład żywicy, np. epoksydowej, począwszy już od temperatury 470 K. Zwiększa to kruchość żywicy i powoduje "wypreparowanie" nici szklanych w nasadzie wióra.

W laminatach, na nośniku celulozowym, obrabianych z dużymi prędkościami skrawania wysoka temperatura skrawania powoduje rozkład zarówno nośnika jak i żywicy. Powstały w takich warunkach wiór ma postać pyłu, łatwo ulegającego samozapłonowi.

Geometria ostrza zarówno warunkuje rozkład naprężeń w nasadzie wióra i warstwie wierzchniej powierzchni obrobionej, jak też w decydujący sposób określa możliwości spływu wiórów.

Kąt natarcia γ_o w sposób istotny wpływa na rozkład naprężeń w nasadzie wióra. Wzrost kąta γ_o powoduje zwiększenie naprężeń rozciągających w strefie przyległej do krawędzi skrawającej, co sprzyja powstawaniu szczeliny wyprzedzającej, a w przypadku skrawania w kierunku stycznym do laminacji prowadzi do rozwarstwienia tworzywa. Większe kąty natarcia sprzyjają odrywaniu dłuższych odcinków nici szklanych i powstawaniu wiórów związanych. Ujemne kąty natarcia powodują wnikanie strefy naprężeń głębiej w materiał obrabiany, przez co wzrasta grubość warstwy materiału zgniatanej przez ostrze [60]. Po przekroczeniu zdolności odkształcania się warstwy zgniatanej następuje jej miażdżenie i rozkruszanie; drobne cząstki żywicy i włókien szklanych zostają odprowadzane częściowo przez powierzchnię przyłożenia. Ponadto ujemne kąty natarcia utrudniają swobodny spływ wiórów i powodują ich dalsze rozdrobnienie.

Kąt przyłożenia α_o oddziaływuje tylko pośrednio na powstawanie wióra. Z uwagi na dużą sprężystość tworzywa istnieje strefa styku powierzchni przyłożenia ostrza z materiałem obrabianym, powiększająca się w miarę zmniejszania kąta α_o. Wydzielające się na tej powierzchni ciepło tarcia podnosi temperaturę ostrza i materiału obrabianego w pobliżu krawędzi skrawającej, zmieniając tam własności mechaniczne tworzywa i ułatwiając pękanie żywicy.

Kąt pochylenia krawędzi skrawającej λ wpływa na kierunek wektora siły skrawania, powodując w przypadku $\lambda \neq 0$ przy toczeniu wzdłużnym powstawanie składowej odporowej na powierzchni natarcia. Siła ta, działając prostopadle do laminacji, może powodować rozwarstwienie tworzywa.

Kąt przystawienia $\varkappa$ określa przy stałej wartości posuwu p grubość warstwy skrawanej $a = p \sin \varkappa$. Zwiększenie kąta $\varkappa$ sprzyja więc skrawaniu kilku komponentów tworzywa jednocześnie i powstawaniu w większym stopniu wiórów związanych. Zmiany kąta przystawienia w zakresie $\varkappa = 45\text{-}90^{\circ}$ nie powodują jednak istotnych zmian w procesie powstawania wióra [50].

Gatunek żywicy i związane z nim własności mechaniczne mają zasadniczy wpływ na proces powstawania wióra, gdyż inicjacja pękania zwykle występuje w żywicy. Potwierdzają to obserwacje wiórów otrzymanych przy toczeniu tworzyw szkło-melaminowych i szkło-silikonowych, które są znacznie drob-

niejsze niż wióry szkło-fenolowe lub szkło-epoksydowe. Wynika to z większej kruchości pierwszej grupy żywic.

Tworzywa na nośniku celulozowym skrawają się podobnie jak na nośniku szklanym, lecz określone rodzaje wiórów powstają w innych obszarach parametrów skrawania. Przy toczeniu tworzyw celulozowo-fenolowych (papierowych) wióry odrywane powstają tylko przy kątach natarcia $\gamma_o = -20^o$ i grubościach warstwy skrawanej $a \geq 0{,}04$ mm oraz prędkościach skrawania $v \geq 2{,}5$ m/s, zaś wióry ciągłe ścinane przy bardzo cienkich warstwach o grubości $a < 0{,}012$ mm. W pozostałym obszarze warunków skrawania powstają wióry nieciągłe ścinane lub złożone [64].

Przy wierceniu przebieg procesu skrawania jest uzależniony w znacznej mierze od możliwości sprawnego odprowadzenia wiórów. Nagromadzone w wierconym otworze wióry utrudniają odprowadzanie ciepła z obszaru skrawania i powodują wzrost temperatury, mogący powodować nawet rozkład składników tworzywa. Sprzyja to powstawaniu wióra odrywanego w postaci drobnych cząstek. Taki pylisty wiór łatwo zatyka rowki wiórowe, przywierając do ich powierzchni. Zachodzić to może zarówno przy wysokich prędkościach skrawania, jak i przy wierceniu głębokich otworów. Gazowe produkty rozkładu tworzywa mogą powodować nawet gwałtowne, wybuchowe wyrzucanie wiórów z otworu.

Przy przecinaniu piłami tarczowymi powstają z reguły wióry bardzo rozdrobnione. Wynika to z kinematyki procesu i udarowego wejścia ostrza w materiał obrabiany. Stosowane wysokie prędkości skrawania, wywołując wysoką temperaturę stykową, doprowadzają do lokalnego rozkładu tworzywa i powstawania wióra w postaci drobnych cząstek komponentów.

Przedstawione rozważania, jakkolwiek naświetlają szereg zagadnień związanych z procesem powstawania wióra przy skrawaniu tworzyw warstwowych, pozostawiają jednak nadal wiele niejasności i wątpliwości, których rozwiązanie wymaga prowadzenia dalszych badań.

5. ZUŻYCIE OSTRZA NARZĘDZIA

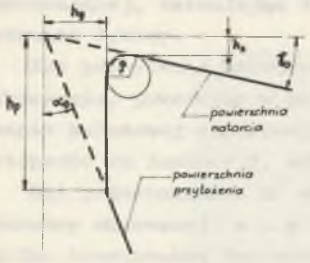
Tworzywa sztuczne warstwowe, zwłaszcza na nośniku szklanym i azbestowym, cechują się dużą ściernością. Drugą istotną ich cechą, rzutującą na dobór materiału narzędziowego, jest zła przewodność cieplna, która powoduje skierowanie prawie całego strumienia ciepła skrawania do ostrza narzędzia. Dalszą cechą charakterystyczną tych tworzyw są stosunkowo nieduże opory skrawania.

Materiał narzędziowy musi więc posiadać dobrą odporność na ścieranie i działanie wysokich temperatur, natomiast nie potrzebuje wykazywać się wysoką wytrzymałością na zginanie. Warunkom tym odpowiada najlepiej diament techniczny a następnie węgliki spiekane grupy wolframowo-kobaltowej.

W warunkach krajowych narzędzia diamentowe z uwagi na ich wysoką cenę nie znalazły szerszego rozpowszechnienia. Jako podstawowy materiał narzędziowy do obróbki tworzyw warstwowych stosuje się węgliki spiekane grupy H. Do mniej wydajnej obróbki tworzyw na nośniku celulozowym mogą być też stosowane narzędzia ze stali szybkotnącej.

5.1. Postać i przebieg zużycia

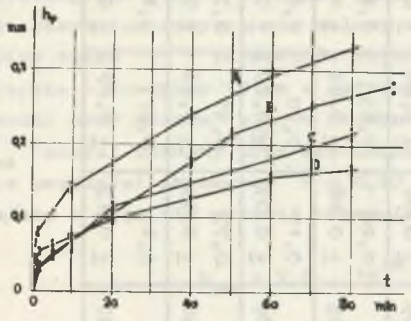
Postać zużycia ostrza jest ściśle zależna od warunków powstawania wióra, stanu naprężeń i rozkładu temperatur na powierzchniach roboczych. Warunki te przy skrawaniu tworzyw warstwowych prowadzą do zużywania się ostrzy głównie na powierzchni przyłożenia i krawędzi skrawającej. Powierzchnia natarcia podlega nieznacznemu zużyciu prawie wyłącznie w wyniku powiększania się zaokrąglenia krawędzi skrawającej. Wielkościami charakteryzującymi zużycie są więc: wysokość starcia powierzchni przyłożenia h_p i promień zaokrąglenia krawędzi skrawającej ϱ. Powodują one przesunięcie krawędzi skrawającej o wielkość h_y i obniżenie o wielkość h_z (rys. 5.1). Promień zaokrąglenia krawędzi skrawającej powoduje wytworzenie się ujemnego kąta natarcia przy krawędzi.



Rys. 5.1. Parametry zużycia ostrza: h_p - wysokość starcia powierzchni przyłożenia, h_y - przesunięcie krawędzi skrawającej, h_z - obniżenie krawędzi skrawającej, ϱ - promień zaokrąglenia krawędzi skrawającej

Przebieg zużycia ostrzy z węglików spiekanych w czasie posiada dwa okresy: wstępnego (dotarcie ostrza) i normalnego zużycia (rys. 5.2). Nie występuje tu okres końcowego przyspieszonego zużycia ostrza. Wpływ parametrów skrawania v, g, p i czasu t na wysokość starcia powierzchni przyłożenia h_p przy toczeniu można przedstawić zależnością:

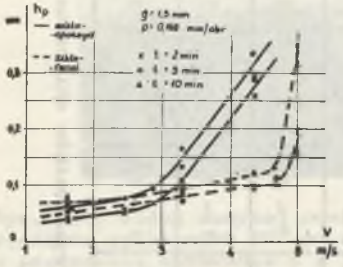
$$h_p = C \cdot v^a \cdot g^e \cdot p^u \cdot t^s. \quad (5.1)$$



Rys. 5.2. Wykres zużycia powierzchni przyłożenia ostrzy noży z węglików spiekanych H03 przy toczeniu płyt: A - celulozowo-fenolowych papierowych, B - szkło-fenolowych, C - szkło-epoksydowych i D - celulozowo-fenolowych tkanikowych. Geometria ostrza: γ_o=10°, α_o = 20°, λ= 0°, $\varkappa$ = 45°, ε = 123°, r_ε = 1 mm. Parametry skrawania: v = 8,05 m/s (A), 1,66 m/s (B,C), 9,16 m/s (D), g = 1,5 mm, p = 0,169 mm/obr

Wartości stałych i wykładników potęgowych dla kilku krajowych laminatów wg badań [107] zestawiono w tablicy 5.1.

Przy toczeniu tworzyw na nośniku szklanym, po przekroczeniu pewnej wartości prędkości skrawania, występuje wzrost intensywności zużycia ostrza (rysunek 5.3), co związane jest z osiągnięciem określonej temperatury przez żywicę i zmianą warunków tarcia na powierzchni styku tworzywa z ostrzem.



Rys. 5.3. Wpływ prędkości skrawania na zużycie ostrza z węglików spiekanych H03 o geometrii γ_o = 10°, α_o = 20°, λ= 0°, $\varkappa$ = 45°, ε = 123°, r_ε = 1 mm przy toczeniu płyt z laminatów na nośniku z tkaniny szklanej

Dla większości przypadków obróbki wpływ parametrów skrawania na zużycie ostrza jest w zasadzie jednoznaczny, tzn. że ze wzrostem prędkości skrawania, posuwu lub głębokości skrawania wartość parametru zużycia h_p osiągniętego po określonym czasie skrawania jest większa. Wyjątek stanowi tu wpływ prędkości skrawania na zużycie ostrza z węglików spiekanych przy wierceniu laminatu szkło-fenolowego, gdzie po przekroczeniu wartości v = 1,73 m/s dalszy wzrost prędkości skrawania do v = = 2,43 m/s powoduje zmniejszanie się zużycia ostrza osiągniętego po danym czasie skrawania [7]. Wynika to z termicznej destrukcji tworzywa wewnątrz otworu w warstwie skrawanej i zmiany warunków tarcia na powierzchni przyłożenia ostrza.

Zużycie ostrza często nie jest jednakowe w różnych przekrojach rozmieszczonych wzdłuż krawędzi skrawającej; dotyczy to zwłaszcza wierteł, pił tarczowych i noży przecinaków. Wynika to oczywiście z warunków pracy tych narzędzi.

Tablica 5.1

Wartość stałej C i wykładników potęgowych a,e,u,s do wzoru 5.1 na wysokość zużycia powierzchni przyłożenia ostrza h_p przy toczeniu ostrzem z węglików spiekanych HO3 o geometrii: $\gamma_o = 10^o$, $\alpha_o = 20^o$, $\lambda = 0^o$, $\varkappa = 45^o$, $\varepsilon = 123^o$, $r_\varepsilon = 1$ mm:

$$h_p = C \cdot v^a \cdot g^e \cdot p^u \cdot t^s$$

h_p - wysokość zużycia ostrza na powierzchni przyłożenia (mm), v - prędkość skrawania (m/s), g - głębokość skrawania (mm), p - posuw (mm/obr), t - czas (min), wg [107]

Rodzaj płyt warstwowych	Zakres parametrów skrawania				C	a	e	u	s
	v m/s	g mm	p mm/obr	t min					
papierowe celulozowo-fenolowe	8,06-19,33	1 - 3	0,1 - 0,62	10 - 140	$1,18.10^{-4}$	1,53 ±0,12	0	0,16 ± 0,03	0,40 ± 0,02
tkaninowe celulozowo-fenolowe	9,17 - 16,67	1 - 3	0,1- 0,62	10 - 160	$4,92.10^{-4}$	0,61 ± 0,09	0,13 ± 0,06	0,16 ± 0,04	0,37 ± 0,02
tkaninowe szkło-fenolowe	1 - 4,37	1 - 3	0,1 - 0,34	5 - 110	$1,48.10^{-4}$	0,62 ± 0,05	0,26 ± 0,08	0,43 ± 0,09	0,62 ± 0,03
	4,37- 5	1 - 3	0,1 - 0,34	5 - 60	$1,53.10^{-7}$	4,87 ± 0,69	0,19 ± 0,09	0,20 ± 0,09	0,64 ± 0,04
tkaninowe szkło-epoksydowe	1,25 - 2,5	1 - 3,5	0,1 - 0,42	5 - 120	$2,52.10^{-3}$	0,42 ± 0,08	0,77 ± 0,09	0,57 ± 0,06	0,39 ± 0,02
	2,5 - 3,33	1 - 3,5	0,1- 0,42	5 - 120	$5,32.10^{-4}$	2,14 ± 0,29	0,41 ± 0,13	0,67 ± 0,09	0,41 ± 0,04

Wartości przedziałów ufności wykładników obliczono dla poziomu ufności 0,95.

Wiertła wykazują największe zużycie na narożu zmniejszając się w kierunku ścina. Zasadniczą przyczyną są tu różnice dróg przebieganych przez poszczególne punkty krawędzi skrawającej różnie odległe od osi wiertła. Ten charakter zużycia nie zależy od gatunku wierconego laminatu.
Wpływ czasu t i parametrów skrawania na zużycie powierzchni przyłożenia wiertła o średnicy 10 mm z ostrzem z węglików spiekanych H20 w trzech miejscach: przy narożu h_{pn}, w środku krawędzi skrawającej h_{pk} i przy ścinie h_{ps} został zbadany przy wierceniu laminatu szkło-fenolowego [7] w zakresie prędkości skrawania v = 0,87 - 1,73 m/s oraz posuwów p = 0,05 - 0,2 mm/obr i daje się wyrazić równaniami:

$$h_{pn} = 9,8 \cdot 10^{-4} \cdot t^{0,67} \cdot v^{1,07} \cdot p^{0,23}, \qquad (5.2)$$

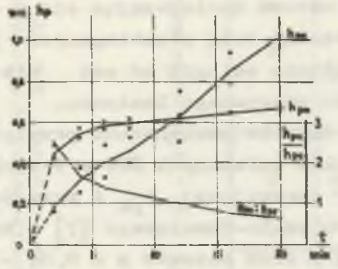
$$h_{pk} = 2,7 \cdot 10^{-4} \cdot t^{0,77} \cdot v^{1,05} \cdot p^{0,18}, \qquad (5,3)$$

$$h_{ps} = 4,7 \cdot 10^{-5} \cdot t^{0,94} \cdot v^{0,97} \cdot p^{0,12}. \qquad (5.4)$$

Jak wynika z porównania wykładników, najbardziej intensywnie na zużycie wpływa prędkość skrawania, najmniej zaś posuw, przy czym intensywność wpływu parametrów skrawania rośnie wzdłuż krawędzi skrawającej ku narożu, zaś wpływ czasu jest odwrotny, tzn. najszybciej przyrasta w okresie normalnego zużycia starcie w pobliżu ścina.

Rys. 5.4. Widok zużytej powierzchni przyłożenia ostrza piły tarczowej z węglików spiekanych H20 po obróbce płyt szkło-fenolowych grubości w=23 mm z prędkością skrawania v = 31,1 m/s, posuwem p_z = 0,01 (A), 0,12 (B)mm/ostrze w czasie t = 25 (A), 1,75 (B) min. Powiększenie około 13 x.

Ostrza pił tarczowych i noży przecinaków zużywają się nierównomiernie, (rys. 5.4) wykazując odmienne zużycie na narożach (o wysokości h_{pn}) niż w środkowym odcinku krawędzi skrawającej (h_{ps}). Stosunek $h_{pn} : h_{ps}$ zależy od gatunku skrawanego tworzywa ooraz parametrów i czasu skrawania (rys.5.5) Przy przecinaniu piłą tarczową płyt szkło-melaminowych oraz celulozowo-fenolowych papierowych i tkaninowych stosunek $h_{pn} : h_{ps}$ jest zawsze większy od 1, zaś przy cięciu płyt szkło-fenolowych [27] i szkło-epoksydowych z małymi posuwami i wysokimi prędkościami skrawania stosunek ten po pewnym czasie obróbki przyjmuje wartość poniżej 1 i przeważa zużycie na środkowym odcinku krawędzi.



Rys. 5.5. Wykres zużycia powierzchni przyłożenia na narożach h_{pn} i w środku krawędzi skrawającej h_s ostrza piły tarczowej z węglików spiekanych H20 przy przecinaniu płyt szkło-fenolowych (rezotekst S, tkanina o splocie satynowym). Geometria ostrza: $\gamma_o = 5^o$, $\alpha = 20^o$, $\lambda = 0^o$, $\varkappa = 90^o$, $\varepsilon = 88^o$, $\alpha'_o = 2^o$. Parametry skrawania: v = 31,1 m/s, p_z = 0,01 mm/ostrze, grubość płyty w = 23 mm, średnica piły D = 350 mm.

W tablicy 5.2 zestawiono przykładowo charakterystyczne parametry, przy których stosunek $h_{pn} : h_{ps} = 1$. Można zauważyć tu pewne prawidłowości, a mianowicie:

- przy stałym posuwie na ostrze p_z w miarę wzrostu prędkości skrawania v wartość charakterystyczna $h_{pn} = h_{ps}$ rośnie, zaś czas skrawania maleje,
- przy stałej prędkości skrawania w miarę wzrostu posuwu na ostrze p_z wartość $h_{pn} = h_{ps}$ rośnie, zaś czas skrawania maleje.

Tablica 5.2

Zestawienie charakterystycznych parametrów obróbki przy cięciu płyt szkło-fenolowych grubości w = 23 mm piłą tarczową z ostrzami z węglików spiekanych gatunku H20, dla jakich wysokość starcia powierzchni przyłożenia w środku krawędzi skrawającej h_{ps} zaczyna przekraczać wysokość starcia na narożach h_{pn}.

Czas skrawania t min	Prędkość skrawania v m/s	Posuw p_z mm/ostrze	Wysokość starcia powierzchni przyłożenia h_p mm
11	39,33	0,01	1,08
12	31,08	0,01	0,62
100	19,83	0,01	0,53
60	19,83	0,016	0,63
50	19,83	0,02	0,70
90	16,03	0,02	0,63

Przy większych posuwach $p_z > 0,03$ mm/ostrze zawsze przeważa zużycie na narożach ostrza. Nierównomierne zużycie powierzchni przyłożenia, powodując niejednakowe przesunięcia krawędzi skrawającej w różnych jej miejscach, doprowadza do utracenia prostoliniowości krawędzi. W płaszczyźnie podstawowej zarys krawędzi skrawającej wykazuje zaokrąglenia przy narożach (jeśli przeważa wysokość zużycia h_{pn}) lub jest wklęsły, gdy dominuje zużycie w środkowej części.

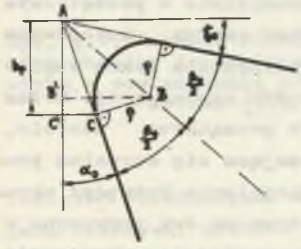
Wzrost promienia zaokrąglenia krawędzi skrawającej ostrzy pił tarczowych jest niewielki, gdyż nawet najbardziej stępione ostrza o $h_p = 0,7$ mm wykazują wielkość $\varrho = 0,02 - 0,03$ mm. Można to tłumaczyć stosowanymi bardzo małymi posuwami na ostrze w zakresie $p_z = 0,01 - 0,12$ mm/ostrze, a tym samym bardzo cienkimi warstwami skrawanymi w granicach $a = 0,002 - 0,04$ mm.

Przy frezowaniu [42] i wierceniu [43] W.I. Drożżin i Ł.S. Krawczenko stwierdzili, że wzrost promienia zaokrąglenia krawędzi skrawającej ϱ jest proporcjonalny do wysokości starcia powierzchni przyłożenia h_p i podali wzór:

$$\varrho = \varrho_o + k\, h_p. \tag{5.5}$$

Przy toczeniu ostrzami z węglików spiekanych promień zaokrąglenia krawędzi skrawającej rośnie do osiągnięcia pewnej maksymalnej wartości, która nie ulega już zmianie w czasie dalszego skrawania. A.W. Rudniew i A.A. Korolew [98] stwierdzili przy toczeniu laminatu szkło-epoksydowego ЭФБ-π ostrzami z piętnastu różnych gatunków węglików spiekanych o geometri: $\gamma_o = 10^\circ$, $\alpha_o = 25^\circ$, $\lambda = 0^\circ$, $\varkappa = 45^\circ$, $\varepsilon = 123^\circ$, $r_\varepsilon = 0,71 - 1$ mm z parametrami skrawania: $v = 1,5$ m/s, $g = 1,5$ mm, $p = 0,21$ mm/obr., że w początkowym okresie aż do osiągnięcia wysokości starcia powierzchni przyłożenia $h_p = 0,22 - 0,25$ mm stosunek $h_p : \varrho$ ma wartość prawie stałą równą 1,7 - 1,8. Można to wyjaśnić faktem braku płaskiego starcia powierzchni przyłożenia o kącie $\alpha_o = 0$ na tym etapie skrawania i wówczas obserwowane zużycie h_p jest funkcją zaokrąglenia krawędzi ϱ wg wzoru wyprowadzonego zgodnie z rys. 5.6:

$$h_p = AB' + B'C' = \varrho\left[\frac{\cos(\alpha + \frac{\beta}{2})}{\sin\frac{\beta}{2}} + \sin\alpha\right]. \tag{5.6}$$



Rys. 5.6. Związek zużycia ostrza na powierzchni przyłożenia z zaokrągleniem krawędzi skrawającej

Dla podanych wyżej parametrów geometrycznych ostrza uzyskuje się $h_p = 1,74\,\varrho$, co w pełni odpowiada przytoczonym danym uzyskanym z doświadczeń [98]. Zgodności tej nie uzyskali Rudniew i Korolew, gdyż przyjęli błędne założenia dla wyprowadzenia zależności geometrycznej $h_p = f(\varrho)$. Oczywiście z chwilą pojawienia się i rozwoju płaskiego starcia powierzchni przyłożenia stosunek $h_p : \varrho$ zmienia się, zaś po osiągnięciu przez promień zaokrąglenia ϱ wartości granicznej stosunek ten stale rośnie. Przy większych prędkościach skrawania i mniejszych grubościach warstwy skrawanej promień zaokrąglenia krawędzi skrawającej ustala się na niższej wartości ϱ.

5.2. Mechanizm zużycia

Zużycie ostrzy z węglików spiekanych przy skrawaniu tworzyw warstwowych ma charakter zużycia ściernego. Świadczą o tym wyraźne rysy i bruzdy na startej powierzchni przyłożenia o kierunku zgodnym z kierunkiem prędkości skrawania (rys. 5.7). Powstają one w wyniku mikroskrawania osnowy kobal-

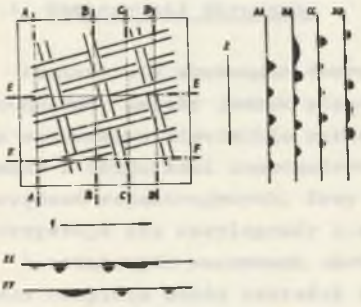
Rys. 5.7. Widok zużytej powierzchni przyłożenia ostrza piły tarczowej z węglików spiekanych H20 po przecinaniu płyt tkaninowych szkło-fenolowych. Parametry: v = 16 m/s, p_z = 0,02 mm/ostrze, w = 23 mm, t = 90 min. Powiększenie ok. 50 x

Rys. 5.8. Widok zużytej powierzchni przyłożenia ostrza nożna z węglików spiekanych H03 po toczeniu laminatu szkło-fenolowego z parametrami: v = = 4,37 m/s, p = 0,1 mm/obr, g= 1,5mm, t = 40 min. Powiększenie ok. 2000x

towej spieku przez twarde składniki tworzywa i obnażania ziarn węglików, które następnie ulegają wykruszeniu (rys. 5.8). Bruzdy powstające szczególnie w początkowym okresie pracy ostrza inicjowane są przez wykruszanie ziarn węglików z krawędzi skrawającej. Można przyjąć, że początkowe zużycie, charakteryzujące się wzrostem promienia zaokrąglenia krawędzi skrawającej ostrza ma swą przyczynę w niskiej odporności na wykruszanie ziarn leżących na krawędzi. Jest to więc zużycie wytrzymałościowe, o charakterze wyszczerbienia, ograniczone do obszaru przylegającego do krawędzi skrawającej. Niewątpliwy udział w osłabieniu wytrzy-

małości krawędzi płytek ze spieków mają defekty wywołane ostrzeniem, jak np. mikropęknięcia. Może o tym świadczyć fakt zwiększenia o ok. 20% okresu trwałości ostrzy docieranych w porównaniu do ostrzonych ściernicą diamentową [23].

Na ścieranie się powierzchni przyłożenia istotny wpływ ma stan powierzchni skrawania przedmiotu, uformowany w chwili powstania wióra. Dotyczy to szczególnie tworzyw zbrojonych włóknem szklanym i azbestowym, gdzie ważny jest zarówno kierunek ułożenia włókien względem powierzchni skrawania, jak też jakość ich utwierdzenia w żywicy. Ponieważ w szeregu zakresach warunków skrawania, zaś szczególnie przy wysokiej prędkości powodującej nadmierny wzrost temperatury, lub ujemnym kącie natarcia wynikającym ze wzrostu promienia zaokrąglenia krawędzi, zachodzi rozkruszanie żywicy w warstwie leżącej poniżej krawędzi skrawającej wgłąb materiału, zostają obnażone na pewnej długości włókna zbrojenia, tworząc "szczotkę" o dużej sprężystości, agresywnie ścierającej powierzchnię przyłożenia. Można porównać taką "szczotkę" do ostrzy przeciągacza, powodujących mikroskrawanie, przy czym należy wziąć pod uwagę możliwość uformowania się takiego "przeciągacza" nawet w przypadku równoległego ułożenia tkaniny do powierzchni skrawania (rys. 5.9).



Rys. 5.9. Schemat rozmieszczenia nici tkaniny laminatu w strefie styku z powierzchnią przyłożenia ostrza [59]

Przy pracy z wysokimi prędkościami skrawania wzrost temperatury ostrzy do ponad 1000 K powoduje występowanie zużycia chemicznego na drodze utleniania węglików wolframu. Ma to miejsce głównie przy przecinaniu piłami tarczowymi ze względu na stosowane tam wysokie prędkości skrawania, jak też swobodny dostęp tlenu atmosferycznego do powierzchni ostrza w warunkach obróbki przerywanej. Miękkie tlenki wolframu zostają z łatwością ścierane, tworząc na powierzchni przyłożenia jednolicie matową powierzchnię starcia bez widocznych większych zarysowań.

Na roboczych powierzchniach ostrza poza strefą bezpośredniego styku z materiałem obrabianym i wiórem powstają warstwy przyczepionych produktów rozpadu tworzywa. Grubość tych warstw, ich skład i siła adhezji zależą od gatunku tworzywa i temperatury ostrza. Szczególnie dobrą przyczepność wykazują zwęglone produkty rozpadu żywic fenolowo-formaldehydowych. Wpływ tych warstw na zużycie ostrza jest pośredni. Powodują one utrudnione oddawanie ciepła do otoczenia i tym samym podwyższają temperaturę ostrza w strefie sąsiadującej z krawędzią skrawającą.

Zużycie ahdezyjne jest mało prawdopodobne z uwagi na słabość ewentualnych wiązań składników tworzywa i spieku oraz stosunkowo niewielkie naciski jednostkowe. Możliwość powstania silnych szczepień ahdezyjnych istnieje tylko przy skrawaniu żywic epoksydowych niecałkowicie dotwardzonych,nie ma więc praktycznego znaczenia.

Zużycie dyfuzyjne, wymagające odpowiedniego czasu przy wysokiej temperaturze stykowej, jest również mało prawdopodobne, tym bardziej, że złożona budowa tworzywa uniemożliwia dłuższy styk tych samych partnerów.

Czynnikiem, który może dodatkowo ingerować w ścierne zużycie ostrzy jest elektryczność statyczna. Tworzywa warstwowe, jako dielektryki, dają się łatwo elektryzować przez tarcie, gromadząc przy tym znaczne ładunki. Należy przypuszczać, że stwierdzone przy skrawaniu elektryzowanie się przedmiotu obrabianego stwarza możliwość powstawania mikrowyładowań na trących powierzchniach ostrza, przyspieszając ich zużycie.

6. SIŁY SKRAWANIA

Znajomość sił skrawania przy obróbce tworzyw sztucznych ma istotne znaczenie dla zapewnienia wymaganej jakości wyrobu. Wynika to przede wszystkim ze stosunkowo niskich wartości modułu sprężystości tworzyw warstwowych (ok. 10 razy mniejszych od stali), a tym samym małej sztywności obrabianego przedmiotu, utrudniającej uzyskanie wysokich dokładności obróbki. Ponadto zachodzi konieczność utrzymania sił skrawania na poziomie poniżej wartości wywołujących uszkodzenia przedmiotu obrabianego w postaci wykruszeń krawędzi, rozwarstwień i zwłóknień. Ponieważ nie ma dotąd możliwości obliczania sił skrawania na podstawie znanych własności mechanicznych tworzyw, istnieje konieczność ustalenia empirycznych zależności sił skrawania od parametrów obróbki dla poszczególnych gatunków laminatów.

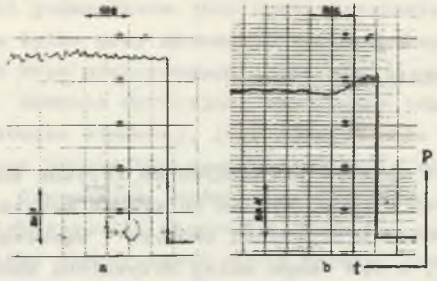
6.1. Pomiary sił skrawania

Pomiary sił skrawania tworzyw warstwowych nie nastręczają większych trudności, należy jednak stosować siłomierze o wysokiej czułości z uwagi na stosunkowo niewielkie wartości oporów skrawania. Zwykle używane są przyrządy z czujnikami tensometrycznymi lub pojemnościowymi, podłączonymi do urządzeń rejestrujących. Przy pomiarze przebiegu sił szybkozmiennych wykorzystuje się oscylografy z rejestracją fotograficzną.

W ustalonych warunkach obróbki siła skrawania nie ma stałej wartości, lecz oscyluje wokół wartości średniej odpowiednio do chwilowych zmian zachodzących w procesie powstawania wióra. Pojęcie ustalonych warunków obróbki obejmuje nie tylko niezmienne parametry skrawania i geometrię ostrza ale również stan równowagi cieplnej w strefie skrawania, utrzymujący się przez określony czas. W rzeczywistości, w miarę upływu czasu skrawania postępuje zużycie ostrza, powodując ciągłą zmianę warunków obróbki. Przy mniejszych prędkościach skrawania, przyrost zużycia ostrza jest na tyle powolny, że można przyjąć warunki jako ustalone nawet w przedziałach kilkuminutowych, jednakże przy wysokich prędkościach skrawania może nie dochodzić do ustalenia się warunków, gdyż nawet w kilkusekundowych przedziałach przyrost zużycia ostrza jest istotny dla zmian równowagi cieplnej.

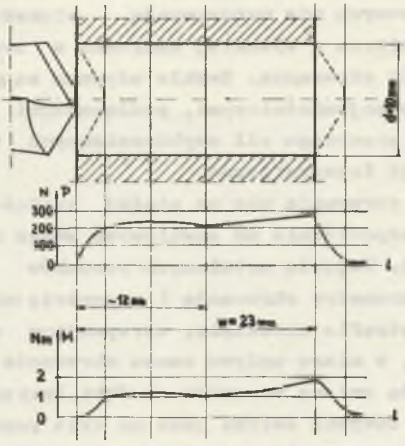
Dla wyprowadzenia zależności średniej siły skrawania od parametrów obróbki należy dokonywać pomiarów w ustalonych warunkach. Przy toczeniu, czas ustalania się warunków od chwili rozpoczęcia skrawania wynosi zwykle od kilku do kilkunastu sekund, rzadziej do kilkudziesięciu sekund.

Przy małej prędkości skrawania (rys. 6.1a) średnia siła ustala się szybko, przy większej natomiast (rys. 6.1b) po dłuższym czasie, przy czym w okresie nieustalonych warunków na początku skrawania wartości siły są wyższe niż wartość w warunkach ustalonych. Wynika to z wpływu temperatury na własności mechaniczne tworzywa (rys. 3.4), a stąd w okresie początkowym, zanim materiał obrabiany nagrzeje się, opory skrawania są większe i zmniejszają się stopniowo w miarę wzrostu temperatury skrawania aż do jej ustalenia.



Rys. 6.1. Przebieg zmian siły skrawania w czasie przy toczeniu swobodnym rury szkło-epoksydowej G-Etronax Ep11. Ostrze z węglików spiekanych H1P o geometrii: $\gamma_o = 0^o$, $\alpha_o = 20^o$, $\lambda = 0^o$, $\varkappa = 90^o$. Parametry: a) v = 0,39 m/s, p = 0,04 mm/obr., g = 5,5 mm, h_p = 0,29 mm, b) v = 1,75 m/s, p = 0,04 mm/obr., g = 5,5 mm, h_p = 0,29 mm

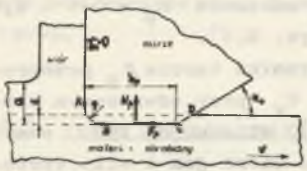
Przy wierceniu ustalona wartość siły osiowej i momentu skrawania utrzymuje się tylko do określonej głębokości otworu (rys. 6.2). Przy dalszym zagłębianiu się wiertła w materiał następuje zatykanie się rowków wiórowych z uwagi na utrudnione odprowadzanie wiórów i wzrost tarcia, co wywołuje zwiększenie oporów skrawania. Również zwiększa się moment tarcia sprężyście odkształconych ścian otworu o łysinki prowadzące wiertła, szczególnie przy zbyt małej ich zbieżności.



Rys. 6.2. Przebieg zmian oporów skrawania przy wierceniu płyty tkaninowej szkło-fenolowej. Ostrze z węglików spiekanych H03. Wiertło o średnicy d = 10 mm zaszlifowane metodą Washburne'a. Geometria ostrza: $\gamma_o = 10^o$, $\alpha_o = 22^o$, $2\varkappa = 120^o$, $\omega = 40^o$. Parametry: v = 1,24 m/s, p = 0,2 mm/obr.

6.2. Siły działające na powierzchni przyłożenia

Duża sprężystość tworzyw warstwowych powoduje uginanie się materiału w warstwie skrawanej pod ostrzem narzędzia i znaczną długość styku powierzchni przyłożenia z powierzchnią obrobioną (rys. 6.3). Wynikiem tego jest istotny udział sił działających na powierzchni przyłożenia P_p w całkowitej sile skrawania P, rosnący w miarę zużycia ostrza, przedstawiony na

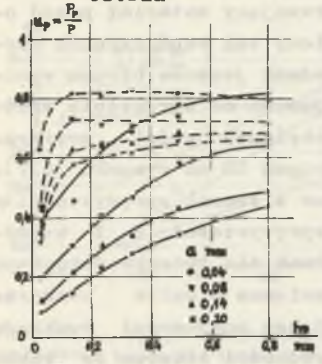


Rys. 6.3. Schemat sił działających na powierzchni przyłożenia ostrza

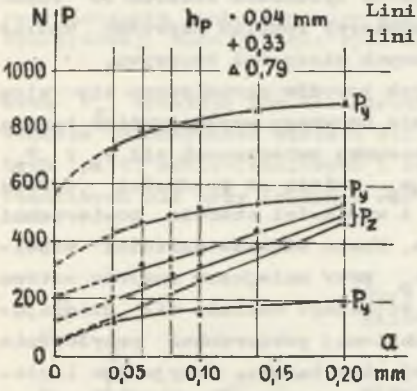
przykładzie toczenia swobodnego rury szkło-epoksydowej na rys. 6.4. Udziały u_p obliczono ze wzoru:

$$u_p = \frac{P_p}{P} \approx \frac{P_{a=0}}{P}, \qquad (6.1)$$

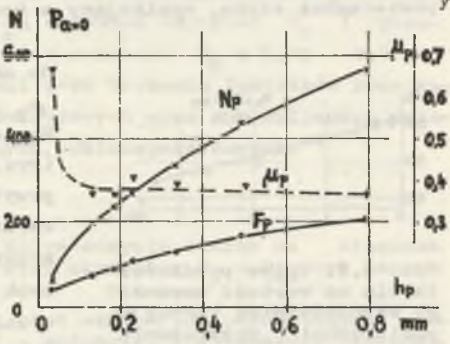
przy czym siły działające na powierzchni przyłożenia oszacowano na drodze ekstrapolacji wykresów $P = f(a)$ do zerowej grubości warstwy skrawanej $a = 0$ (rys. 6.5), określając wartości $P_{a=0}$. Zmiany wartości tej siły w zależ-



Rys. 6.4. Wpływ wysokości starcia ostrza h_p na udział sił działających na powierzchni przyłożenia ostrza w całkowitej sile skrawania przy toczeniu swobodnym rury szkło-epoksydowej G-Etronax Ep11. Ostrze z węglików spiekanych H1P o geometrii: $\delta_o = 0^o$, $\alpha_o = 20^o$, $\lambda = 0^o$, $\varkappa = 90^o$. Parametry: $v = 0{,}166$ m/s, $g = 5{,}3$ mm. Linia ciągła - udział składowej obwodowej P_z, linia kreskowa - udział składowej odporowej P_y



Rys. 6.5. Wpływ grubości warstwy skrawanej a na składowe siły skrawania przy toczeniu swobodnym rury szkło-epoksydowej. Dane jak dla rys. 6.4



Rys. 6.6. Wpływ zużycia ostrza na składowe siły skrawania działające na powierzchni przyłożenia i umowny współczynnik tarcia. Dane jak dla rysunku 6.4.

ności od zużycia ostrza pokazano na rys. 6.6. W miarę wzrostu grubości warstwy skrawanej a udział sił działających na powierzchni przyłożenia ostrza maleje (rys. 6.4), co jest oczywiste z uwagi na większy udział sił oddzielania wióra.

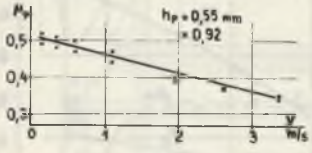
Rozpatrując składowe siły skrawania, działające na powierzchni przyłożenia (rys. 6.3), przyjmuje się stosunek sił $F_p : N_p$ jako umowny współ-

czynnik tarcia μ_p. Jego wartość dla omawianego przykładu toczenia rury szkło-epoksydowej w przypadku ostrzy o zużyciu w zakresie h_p = 0,1 - 0,8 mm mieści się w przedziale μ_p = 0,37 - 0,41 (rys. 6.6).

Celem uzyskania dokładniejszych wartości współczynnika tarcia μ_p przeprowadzono [31] serię pomiarów sił składowych P_z i P_y przy odwróconym kierunku ruchu ostrza względem przedmiotu (rys. 6.7), eliminując tym samym zarówno siły tworzenia wióra jak i siły występujące na zaokrąglonej krawędzi skrawającej. Dla zachowania identycznego charakteru trącej powierzchni tworzywa jak przy toczeniu zastosowano drugi nóż, skrawający materiał przed ostrzem trącym. Określony tak współczynnik tarcia obarczony jest jednak jeszcze błędem wynikającym z sił działających na sprężyście wgłębionej w tworzywo nachylonej części powierzchni przyłożenia (odcinek CD na rysunku 6.7).

Rys. 6.7. Schemat sił działających na trącej powierzchni ostrza

Obliczenie teoretyczne tych sił w oparciu o znane z teorii sprężystości zagadnienie Boussinesqa wymaga znajomości modułu sprężystości E i współczynnika Poissona ν tworzywa. Wartości te są jednak dla tworzyw sztucznych silnie uzależnione od temperatury i wobec tego zmienne w całym obszarze tarcia, uniemożliwiając przeprowadzenie obliczeń bez znajomości rozkładu temperatur w rozpatrywanej strefie. Dodatkowe trudności stwarza tu technologiczna anizotropia tworzywa i nierównomierny rozkład naprężeń wzdłuż powierzchni styku, wynikający z reologicznych własności tworzywa.



Rys. 6.8. Wpływ prędkości tarcia na wartość umownego współczynnika tarcia na powierzchni przyłożenia dla pary trącej: rura szkło-epoksydowa G-Etronax Ep11 - węgliki spiekane H1P.

Z podanych powodów ograniczono się więc do określenia umownego współczynnika tarcia μ_p jako stosunku zmierzonych sił P_z : P_y. Wartości μ_p zależą od prędkości tarcia (rys. 6.8) i wielkości starcia powierzchni przyłożenia. Nieco większe wartości współczynnika μ_p przy mniejszym zużyciu ostrza wynikają z większego udziału sił działających na nachylonej powierzchni przyłożenia w całkowitej sile tarcia. Przyjmując liniową aproksymację zależności $\mu_p = f(v)$ uzyskano równanie prostej regresji o postaci:

$$\mu_p = 0{,}51\ (1 - 0{,}1\ v), \qquad (6.2)$$

gdzie v - prędkość tarcia w m/s. Równanie to jest słuszne dla tworzywa szkło-epoksydowego gatunku G-Etronax-Ep11 i ostrza z węglików spiekanych gatunku H1P w zakresie parametrów stosowanych przy przeprowadzonych badaniach, tj. wysokości starcia powierzchni przyłożenia h_p = 0,5 - 1 mm, kącie przyłożenia $\alpha_o = 20^o$ i prędkości tarcia v = 0,14 - 3,4 m/s. Zmniej-

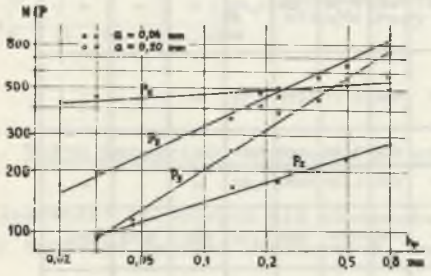
szanie się siły tarcia w miarę wzrostu prędkości można tłumaczyć zarówno wpływem wzrastającej temperatury, jak też własnościami reologicznymi tworzywa.

6.3. Wpływ zużycia ostrza

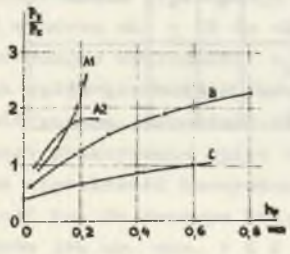
Z istotnego znaczenia sił działających na powierzchni przyłożenia ostrza w całkowitej sile skrawania wynika różny wzrost poszczególnych składowych siły skrawania w miarę zużycia ostrza (rys. 6.9). Zależność składowych sił skrawania od zużycia ostrza można przedstawić z wystarczającym przybliżeniem w postaci funkcji potęgowej

$$P_i = C_i \cdot h_p^{b_i} \qquad (6.3)$$

dla $i = x,y,z$. Z porównania wartości wykładników potęgowych b_i, uzyskanych z badań dla różnych tworzyw warstwowych (tabl. 6.1) wynika, że szczególnie intensywnie rosną składowe odporowa P_y i posuwowa P_x. Wykazują one kilkakrotny wzrost w zakresie $h_p = 0,05 - 0,8$ mm. Większa intensywność wzrostu sił zachodzi przy toczeniu laminatów prasowanych (płyt) szkło-fenolowych i szkło-epoksydowych oraz rur zwijanych szkło-fenolowych niż przy toczeniu rur zwijanych szkło-epoksydowych.



Rys. 6.9. Wpływ zużycia ostrza na składowe siły skrawania P_z i P_y przy toczeniu swobodnym rury szkło-epoksydowej. Dane jak dla rys. 6.4



Rys. 6.10. Wpływ zużycia ostrza na stosunek składowych siły skrawania $P_y : P_z$ przy toczeniu

A) krążki z płyt szkło-fenolowych toczone promieniowo: 1 - wcinanie, 2 - toczenie swobodne. Ostrze z węglików spiekanych H20 o geometrii: $\gamma_o = 5^o$, $\alpha_o = 20^o$, $\lambda = 0^o$, $\varkappa = 90^o$. Parametry skrawania: v = 2,75 m/s, a = 0,08 mm, b = 5 mm

B) rura szkło-epoksydowa. Dane jak dla rysunku 6.4, a = 0,1 mm

C) stal 40, ostrze o kącie $\gamma_o = 10^o$, parametry skrawania: v = 2,67 m/s, a = 0,1 mm, b = 5 mm

[133]

Jako charakterystyczny wskaźnik stosowany jest stosunek składowych sił skrawania odporowej P_y do obwodowej P_z, rosnący w miarę zużycia ostrza na powierzchni przyłożenia. Jest on dla tworzyw warstwowych znacznie większy niż np. dla stali (rys. 6.10) i zależy zarówno od gatunku tworzywa jak i

Tablica 6.1

A. Wartości stałych C_z, C_y, C_x i wykładników potęgowych b_z, b_y, b_x do wzoru 6.3 na siłę skrawania przy toczeniu

$$P_i = C_i \cdot h_p^{b_i}$$

Siła P_i (N), zużycie h_p (mm)

Materiał obrabiany	Materiał ostrza	Zużycie ostrza h_p mm	Parametry skrawania v m/s	g mm	p mm/obr	C_z	b_z	C_y	b_y	C_x	b_x	Poz. literat.
Płyta szkło-fenolowa Rezotekst-S wcinanie promieniowe	H20	≤0,46	2,75	5,0	0,08	441	0,38	1324	1,10	-	-	-
Rura szkło-epoksydowa TsE-130 toczenie swobodne	H20	≤1,0	1,75	7,0	0,16	481	0,11	1275	0,55	-	-	-
Rura szkło-epoksydowa G-Etronax-Ep 11 toczenie swobodne	H1P	<0,8	0,167	5,3	0,04	287	0,32	910	0,64	-	-	-
					0,20	531	0,07	1080	0,47	-	-	-
Rura szkło-fenolowa AG -4C	BK-3M	<0,6	1,67	1,5	0,21	185	0,40	450	1,06	160	0,82	[98]
Laminat szkło-fenolowy CT	BK-2	≤0,85	5	3	0,21	116	0,62	456	1,05	284	1,05	[119]
Laminat szkło--epoksydowy ЭФБ-Т	BK-3M	<0,6	1,67	1,5	0,21	230	0,31	991	1,08	409	0,92	[98]

B. Wartości stałych C_x, C_M i wykładników potęgowych b_x i b_M do wzoru na siłę osiową

$$P_x = C_x \cdot h_p^{b_x}$$

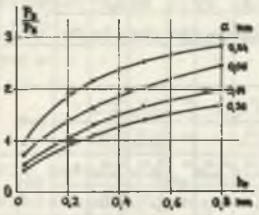
i moment skrawania

$$M = C_M \cdot h_p^{b_M}$$

przy wierceniu. Siła P_x(N), moment M(Nm), zużycie h_p (mm).

Materiał obrabiany	Materiał ostrza	Zużycie ostrza h_p mm	Parametry skrawania v m/s	D mm	p mm/obr.	C_x	b_x	C_M	b_M	Pozycja literatury
Płyta papierowa celulozowo--fenolowa getinaks III	P18	<0,4	0,52	10	0,1	963	0,7	7,23	0,98	[105]

odmiany toczenia. Wyraźne zagięcie krzywej A2 na wykresie wynika z rozwarstwienia się toczonego pierścienia przy stępieniu ostrza przekraczającym wysokość starcia h_p = 0,2 mm. Ze wzrostem grubości warstwy skrawanej stosunek $P_y : P_z$ maleje (rys. 6.11), podobnie jak udział sił działających na powierzchni przyłożenia ostrza.



Rys. 6.11. Wpływ zużycia ostrza na stosunek składowych sił skrawania $P_y : P_z$ przy różnych grubościach warstwy skrawanej a przy toczeniu swobodnym rury szkło-epoksydowej. Dane jak dla rysunku 6.4

6.4. Wpływ parametrów skrawania na siły przy toczeniu

Zależność składowych sił skrawania P_i od parametrów obróbki v, g, p, przy toczeniu tworzyw warstwowych, wyrażana jest zwykle funkcją o postaci

$$P_i = C_{Pi} \cdot g^{e_{Pi}} \cdot p^{u_{Pi}} \cdot v^{a_{Pi}} \cdot K_{Pi}, \qquad (6.4)$$

dla i = x,y,z. Stała C_{Pi} uwzględnia gatunek materiału obrabianego i ostrza oraz odmianę toczenia, zaś współczynnik poprawkowy K_{Pi} pozostałe stałe warunki obróbki, jak np. wartość wysokości starcia powierzchni przyłożenia h_p. Wartości stałych i wykładników potęgowych zestawiono w tablicy 6.2. Zostały one określone na podstawie wyników pomiaru składowych sił skrawania, bądź analitycznie metodą korelacji wielokrotnej, bądź wykreślnie w podwójnie logarytmicznym układzie współrzędnych kolejno dla poszczególnych parametrów. Metoda analityczna pozwoliła na określenie przedziałów ufności dla wykładników potęgowych, które przy poziomie ufności p = = 0,9 wynoszą ok. $\pm$ 5% do ok. $\pm$ 22% wartości wykładnika.

Porównując wykładniki e_{Pz} i u_{Pz} można stwierdzić, że dla tworzyw krajowych wpływ głębokości skrawania na składową siłę obwodową P_z jest większy niż posuwu, natomiast dla tworzyw radzieckich przeważa wpływ posuwu lub jest praktycznie wpływ obu parametrów jednakowy. Może to być przykładem na niecelowość korzystania z danych literatury zagranicznej, celem adaptacji ich do tworzyw krajowych, nawet w przypadku pozornie jednakowych gatunków jak np. poz. 1 i 2 lub 4 i 8 w tablicy 6.2. Na składową siłę odporową P_y większy wpływ wywiera na ogół posuw niż głębokość skrawania, natomiast na składową siłę posuwową P_x wpływ żadnego z parametrów nie jest ogólnie dominujący, choć różnice wartości wykładników e_{Px} i u_{Px} dla poszczególnych gatunków tworzyw są istotne i różnokierunkowe. Pokazane zależności wskazują na wyraźne różnice pomiędzy toczeniem tworzyw warstwo-

Tablica 6.9

Wartości stałych C_{Py}, C_{Pz}, C_{Px} i wykładników e_{pi}, u_{pi}, e_{pi} do wzoru 6.4. na siłę skrawania przy toczeniu

$$P_i = C_{pi} \cdot g^{e_{pi}} \cdot p^{u_{pi}} \cdot v^{e_{pi}}$$

Siła P_i (N), głębokość skrawania g (mm), posuw p (mm/obr), prędkość skrawania v(m/s)

Lp.	Materiał obrabiany	Ostrze		Zakres parametrów skrawania			dla P_z				dla P_y				dla P_x				Poz. lite-racury
		Materiał i kąt ϰ	Zużycie hp mm	v m/s	g mm	p mm/obr	C_{pz}	e_{pz}	u_{pz}	e_{pz}	C_{py}	e_{py}	n_{py}	e_{py}	C_{px}	e_{px}	u_{px}	e_{px}	
1.	Laminat tkaninowy celulozowo-fenolowy Tekstolit	WK6	-	4,5 - - 5,3	1-3	0,1- - 0,5	139	0,72 ±0,12	0,71 ±0,07	0	-	-	-	-	-	-	-	-	wg [115]
2.	Płyty tkaninowe celulozowo-fenolowe	HOJ ϰ=45°	0,2	6,3 -	1-3	0,2 -	34,8	0,8 ±0,09	0,62 ±0,11	0	42,5	0,41 ±0,1	0,44 ±0,12	0	10	0,21 ±0,13	0,28 ±0,16	0	[107]
		0,5	-17			-0,54	65,6	0,82 ±0,06	0,61 ± 0,08	0	152	0,40 ±0,08	0,44 ±0,10	0	26,1	0,14 ±0,03	0,32 ±0,03	0	
3.	Płyty papierowe celulozowo-fenolowe	HOJ ϰ=45°	0,3	4,2-	1-3	0,08-	108	0,64 ±0,08	0,45 ± 0,06	0	140	0,37 ±0,04	0,44 ±0,03	-0,07 ±0,05	32	0,55 ±0,08	0,26 ±0,05	0	[107]
		0,5	-11,7			-0,42	133	0,66 ±0,07	0,44 ±0,05	0	279	0,39 ±0,03	0,41 ±0,02	0	40,2	0,56 ±0,04	0,25 ±0,01	0	
4.	Płyty tkaninowe szkło-fenolowe	HOJ ϰ=45°	0,2	0,9 - - 3	1-3	0,08 - -0,42	164	0,99 ±0,06	0,83 ±0,04	0	52,7	0,41 ±0,07	0,47 ±0,06	-0,09 ±0,07	20	0,4 ±0,09	0,26 ±0,06	0	[107]
5.	Płyty tkaninowe szkło-epoksydowe	HOJ ϰ=45°	0,2	0,5 - -2,8	1-3	0,08- -0,34	220	1,06 ±0,05	0,68 ±0,04	0	40,9	0,15 ±0,05	0,24 ±0,04	0	23,8	0,64 ±0,13	0,38 ±0,09	0	[107]
6.	Taśmy tkaninowe szkło-epoksydowe G-Etronax-Ep 11 toczenie swobodne wzdłuż warstw	H1P ϰ=90°	0,1	0,16- -4,03	3,5	0,04 -0,91	1060	-	0,67 ±0,03	-0,11 ±0,02	435	-	0,29 ±0,04	-0,1 ±0,03	-	-	-	-	
		0,2	0,16- -4,03	3,5	0,04- -0,91	1150	-	0,67 ±0,03	-0,11 ±0,02	619	-	0,29 ±0,04	-0,1 ±0,03	-	-	-	-	
		0,5	0,16- -4,03	3,5	0,04- -0,91	1290	-	0,67 ±0,03	-0,11 ±0,02	988	-	0,29 ±0,04	-0,1 ±0,03	-	-	-	-	
7.	Laminat tkaninowy szkło-fenolowy CT	HK?N ϰ=45°	-	2-6,3	1-4	0,1- -0,5	182	0,82	1,08	0	77,5	0,40	0,65	0	24,6	0,49	0,41	0	[99]
8.	Laminat tkaninowy szkło-fenolowy ΦB	HK3N ϰ= 45°	-	1,7-5	1-4	0,1- -0,4	158	0,87	0,84	0	60,2	0,38	0,34	0	62,8	0,32	0,47	0	[99]
9.	Laminat tkaninowy szkło-fenolowo-silikonowy CK-9Φ	HK3N ϰ = 45°	-	1,2-5	1-4	0,1- -0,4	172	0,66	0,84	0	62,8	0,32	0,47	0	29,5	0,54	0,35	0	[99]
10.	Płyty tkaninowe szkło fenolowe Rezotekst-9 - toczenie swobodne wzdłuż warstw	H20 ϰ = 90°	0,3 0,05	1,3-12 2,8	3 3	0,02 0,04- -0,16	- 706	- -	- 0,75	- -	370 292	- -	- 0,42	0,125 -	- -	- -	- -	- -	
	- wcinanie wzdłuż warstw		0,05	2,8	3	0,04- -0,16	927	-	0,80	-	338	-	0,46	-	-	-	-	-	
	- przecinanie poprzecznie do warstw		0,05	2,8	3	0,08- -0,28	463	-	0,73	-	214	-	0,33	-	-	-	-	-	

UWAGA: Dla pozycji 1-6 przedziały ufności wykładników wyznaczono dla poziomu ufności p = 0,9. W poz. 6 i 10 zamieszczono dane do wiadomości ogólnych.

wych a metali, gdzie zawsze dominuje wpływ głębokości skrawania nad wpływem posuwu na składowe siły skrawania (za wyjątkiem przecinania nożami ze stali szybkotnącej, gdzie jest jednakowy).

Drugą istotną różnicą jest istnienie tworzyw, dla których opór właściwy skrawania rośnie przy wzroście jednego z parametrów g lub p, co jest niespotykane przy obróbce metali.

Opór właściwy skrawania k_s można wyrazić wzorem

$$k_s = \frac{P_z}{F} = \frac{P_z}{g.p} = C_{Pz} \cdot g^{e_{Pz}-1} \cdot p^{u_{Pz}-1} . \qquad (6.5)$$

Dla metali $e_{Pz} \leqslant 1$ i $u_{Pz} \leqslant 1$, zaś dla tworzywa krajowego tkaninowego szkło-epoksydowego $e_{Pz} > 1$ i dla radzieckiego laminatu szkło-fenolowego CT $u_{Pz} > 1$.

Wyjaśnienie takich zróżnicowanych zależności między parametrami warstwy skrawanej a siłami skrawania przy toczeniu tworzyw warstwowych musi być oparte o ich własności mechaniczne. Jak już omówiono w rozdziale 4 proces powstawania wióra jest silnie uzależniony od kierunku ruchu ostrza względem laminacji tworzywa oraz stosunku przekroju warstwy skrawanej do wielkości podstawowych komponentów tworzywa. Te czynniki wpływają więc i na wielkość sił, potrzebnych do oddzielenia wióra. Zmiana parametrów warstwy skrawanej g,p powoduje, zależnie od położenia krawędzi skrawającej ostrza względem laminacji tworzywa, różne udziały poszczególnych składników w przekroju warstwy skrawanej i rzutuje na kierunek wypadkowej siły skrawania. Stąd biorą się zarówno różne stosunki między współczynnikami e_{Pi} i u_{Pi} dla różnych składowych sił skrawania przy tym samym tworzywie, jak również przy toczeniu wzdłużnym i poprzecznym krążków wyciętych z płyt a prętów i rur zwijanych.

Wpływ prędkości skrawania na składowe siły skrawania przy toczeniu tworzyw warstwowych jest dla większości ich gatunków w zakresie zwykle stosowanych prędkości nieistotny i wówczas wykładnik potęgowy $a_{Pi} = 0$. Istotny wpływ stwierdzono w następujących przypadkach:

a) przy toczeniu swobodnym poprzecznym pierścienia wyciętego z płyty szkło-fenolowej gatunku Rezotekst S ostrzem z węglików spiekanych H20 o zużyciu $h_p = 0,3$ mm, przy posuwie 0,02 mm/obr, głębokości skrawania $g = 5$ mm w zakresie prędkości skrawania $v = 1,3 - 12$ m/s uzyskano zależność jedynie dla odporowej siły skrawania

$$P_y = 370 \cdot v^{-0,125} \qquad (6.6)$$

b) przy toczeniu swobodnym rury szkło-epoksydowej gatunku G-Etronax-Ep 11 ostrzem z węglików spiekanych H1P o zużyciu $h_p = 0,79$ mm, przy posuwie 0,04 mm/obr. głębokości skrawania $g = 5$ mm w zakresie prędkości skrawania $v = 0,16 - 1,7$ m/s uzyskano zależności dla siły obwodowej

$$P_z = 155 \cdot v^{-0,24} \qquad (6.7)$$

i siły odporowej

$$P_y = 380 \cdot v^{-0,39} \tag{6.8}$$

zaś przy mniejszym zużyciu $h_p = 0,29$ mm i pozostałych parametrach bez zmiany otrzymano

$$P_z = 145 \cdot v^{-0,15} \tag{6.9}$$

$$P_y = 318 \cdot v^{-0,12} \tag{6.10}$$

Z porównania wykładników wynika, że większy wpływ na siły wywiera prędkość skrawania w przypadku bardziej zużytego ostrza.

Przytoczone przykłady wykazują, że wpływ prędkości skrawania istnieje przy toczeniu bardzo małych grubości warstwy skrawanej stosunkowo znacznie zużytymi ostrzami, a więc w tym zakresie, gdzie dominują siły działające na powierzchni przyłożenia. Obserwowany tu spadek sił skrawania ze wzrostem prędkości skrawania jest związany ze zmianą współczynnika tarcia na powierzchni przyłożenia.

Współczynnik K_p do wzoru (6.4) przykładowo wyznaczono dla przypadku toczenia wcinającego laminatu szkło-fenolowego Rezotekst-S, wykorzystując pomiary składowych sił skrawania P_z i P_y dokonane przy toczeniu nożem ostrym ($h_{pn} < 0,1$ mm) i stępionym ($h_{pn} = 0,36$ mm) przy różnych posuwach w zakresie $p = 0,01 - 0,1$ mm/obr. Jako współczynnik poprawkowy $K_{h_{pi}}$ przyjęto stosunek

$$K_{h_{pi}} = \frac{P_{i(h_{pn} = 0,36 \text{ mm})}}{P_{i(h_{pn} < 0,1 \text{ mm})}}, \tag{6.11}$$

Stosunek ten, większy od 1, nie ma wartości stałej, lecz jest funkcją posuwu o postaci

$$K_{h_{pi}} = C_{h_{pi}} \cdot p^{u_{h_{pi}}}, \tag{6.12}$$

dla której wyznaczono wartości stałych i wykładników potęgowych metodą korelacji dwuczynnikowej, uzyskując zależności:

$$K_{h_{pz}} = 0,9 \cdot p^{-0,27}, \tag{6.13}$$

$$K_{h_{py}} = 2,8 \cdot p^{-0,1}. \tag{6.14}$$

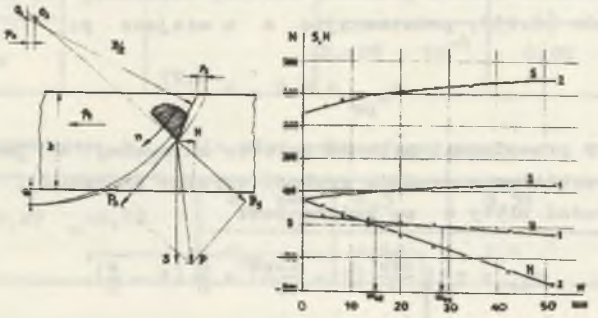
Wstawiając wyrażenie (6.12) do wzoru na siłę skrawania (6.4) w miejsce K_{pi}, uzyskuje się, uwzględniając ujemne wartości wykładnika u_{hpi}, zależność:

$$P_i = C_{Pi} \cdot g^{e_{Pi}} \cdot p^{u_{Pi}-u_{hPi}} \cdot v^{a_{Pi}} \qquad (6.15)$$

Wynika z niej, że dla ostrza stępionego wpływ posuwu na siłę skrawania jest mniej intensywny, niż dla noża ostrego, choć wartości sił są większe. Tłumaczyć to można przedstawionym już poprzednio większym udziałem sił działających na powierzchni przyłożenia w całkowitej sile skrawania, a tym samym zmniejszeniem udziału sił oddzielania wióra, związanym z grubością warstwy skrawanej.

6.5. Wpływ parametrów skrawania na siły i moc przy przecinaniu

Przy przecinaniu piłami tarczowymi zależność sił od parametrów skrawania jest podobna, jak przy toczeniu wcinającym przerywanym. Z kinematyki przecinania piłą tarczową wynika jednak ciągła zmiana grubości warstwy skrawanej, a tym samym i siły skrawania. Dla praktyki ważna jest znajomość składowych sił skrawania w układzie obrabiarki: S - pionowej i H - poziomej. Z podanego na rys. 6.12 przykładu zmian sił skrawania w miarę przemieszczania się ostrza piły tarczowej przez płytę wynika, że składowa pionowa S stale skierowana jest ku dołowi, dociskając płytę do stołu, zaś składowa pozioma H zmienia znak. Graniczna grubość płyty w_o, przy ja-



Rys. 6.12. Zmiany składowych sił skrawania S - pionowej i H poziomej przy przecinaniu współbieżnym płyt szkło-fenolowych (rezotekst S) piłą tarczową o średnicy D = 350 mm w zależności od grubości płyty w. Ostrze z węglików spiekanych H20 o geometrii: $\gamma = 5^o$, $\alpha = 20^o$, $\varkappa = 90^o$, $\lambda = 0^o$, $\varepsilon = 88^o$. Parametry: e = 7 mm, v = 2,8 m/s, B = 3 mm, p_z = 0,12 mm/ostrze. Siły wyznaczono dla jednego ostrza o różnych zużyciach: 1 - $h_{pn} < 0,1$ mm, 2 - $h_{pn} \approx 0,36$ mm.

kiej następuje zmiana znaku siły H, zależy od zużycia ostrza, przy czym w miarę wzrostu zużycia h_{pn} wartość w_o maleje, co wynika ze wzrostu sto-

sunku składowych sił $P_y : P_z$. Korzystny jest ujemny kierunek siły H, skierowany przy cięciu współbieżnym przeciwnie do kierunku ruchu ostrza; kierunek dodatni jest niekorzystny, mogąc powodować wciąganie płyty pod ostrze o wielkość luzów w mechaniźmie posuwowym. Wartości dodatnie siły H są jednak nieznaczne, a w przypadku równoczesnej pracy kilku ostrzy maleją, gdyż ostrza mniej wgłębione w materiał wywołują siłę H ujemną tak, że w praktyce dodatnie siły H mogą być zrównoważone siłami tarcia w prowadnicach stołu lub wrzeciennika piły. Mogą być też stosowane rozwiązania bezluzowego mechanizmu posuwu.

Moc skrawania przy przecinaniu płyt z tworzyw warstwowych wyraża się zależnością

$$N = C_N \cdot v \cdot z \cdot w^{e_N} \cdot p_z^{u_N} \cdot k_{hp} \qquad (6.16)$$

Wartości stałych C_N i wykładników potęgowych e_N i u_N dla krajowych laminatów zestawiono w tablicy 6.3. Wyznaczono je przy skrawaniu ostrą piłą wieloostrzową o liczbie $z = 78$, której zużycie nie przekroczyło w czasie prób wartości $h_{pn} = 0{,}1$ mm. Spowodowane to było trudnością przygotowania piły o jednakowej dla wszystkich ostrzy wielkości stępienia. Współczynnik poprawkowy k_{hp} określono, wykorzystując wyniki pomiarów siły obwodowej P_z przy toczeniu wcinającym laminatu szkło-fenolowego, uzyskane dla różnych wartości zużycia ostrza i różnych grubości warstwy skrawanej w zakresie $a = 0{,}0075 - 0{,}16$ mm. Takie założenie jest dopuszczalne jako pierwszy stopień przybliżenia przy zastosowaniu identycznej geometrii ostrza noża przecinaka jak piły tarczowej. Przy wcinaniu tym wielkość posuwu p odpowiada wprost grubości warstwy skrawanej a, można więc wykorzystać wzór (6.13), podstawiając a w miejsce p:

$$k_{h_{pz}} = 0{,}9 \cdot a^{-0{,}27}. \qquad (6.17)$$

Ponieważ przy przecinaniu grubość warstwy skrawanej a jest zmienna, przyjęto jako przybliżenie średnią grubość warstwy skrawanej, będącą m.in. funkcją grubości płyty w wg zależności:

$$a_{śr} = p_z \sqrt{\frac{e+w}{D}\left(1 - \frac{e+w}{D}\right) + \frac{e}{D}\left(1 - \frac{e}{D}\right)}, \qquad (6.18)$$

gdzie:

$a_{śr}$ - średnia grubość warstwy skrawanej (mm),
p_z - posuw na ostrze (mm/ostrze),
e - wybieg ostrza prostopadle poza płytę (mm) (rys. 6.12),
D - średnica piły tarczowej (mm),
w - grubość płyty (mm).

Tablica 6.3

Wartości stałych C_N i wykładników potęgowych e_N, u_N do wzoru 6.16 na moc skrawania przy przecinaniu płyt z tworzyw warstwowych.

$$N = C_N \cdot v \cdot z \cdot w^{e_N} \cdot p_z^{u_N} \cdot k_{hp}$$

Moc N (kW), prędkość skrawania v (m/s), grubość płyty w (mm), posuw na ostrze p_z (mm/ostrze), z - liczba ostrzy piły tarczowej, k_{hp} - współczynnik poprawkowy uwzględniający zużycie ostrza; dla noża ostrego ($h_{pn} < 0,1$ mm) $k_{hp} = 1$. Warunki stałe: średnica piły D = 350 mm, szerokość ostrza B = 5 mm, geometria ostrza: $\gamma_o = 5^o$, $\alpha_o = 20^o$, $\lambda = 0^o$, $\varkappa = 90^o$.

Materiał obrabiany	Ostrze		Stała C_N	Wykładniki potęgowe	
	Materiał	Geometria		e_N	u_N
płyty papierowe celulozowo-fenolowe	H20	$\gamma_o = 5^o$ $\alpha_o = 20^o$ $\lambda = 0^o$ $\varkappa = 90^o$ B = 5 mm D = 350 mm $h_{pn} < 0,1$mm	$5,576 \cdot 10^{-4}$	1,08	0,70
płyty tkaninowe celulozowo-fenolowe			$3,980 \cdot 10^{-4}$	1,02	0,79
płyty tkaninowe szkło-fenolowe			$2,626 \cdot 10^{-4}$	0,96	0,69
płyty tkaninowe szkło-epoksydowe			$5,348 \cdot 10^{-4}$	1,06	0,92
płyty tkaninowe szkło-melaminowe			$3,008 \cdot 10^{-4}$	0,92	0,78

Współczynnik poprawkowy k_{hp} dla płyt szkło-fenolowych:

$k_{hp} = C_{hp} \cdot p_z^{-0,27} \cdot w^{-0,08}$	h_p mm	0,3	0,36	0,5
	C_{hp}	1,45	1,6	1,9

Po wstawieniu tej zależności do wzoru (6.17) i podstawieniu wartości liczbowych e = 7 mm i D = 350 mm uzyskuje się wzór korelacyjny na obliczenie wartości współczynnika poprawkowego k_{hp}:

$$k_{hp} = 1,6 \cdot p_z^{-0,27} \cdot w^{-0,08}. \qquad (6.19)$$

6.6. Wpływ parametrów skrawania na opory przy wierceniu

Przy wierceniu opory skrawania określane są zwykle w postaci siły posiowej P_x i momentu skrawania M ze wzorów:

$$P_x = C_p \cdot v^{a_p} \cdot p^{u_p} \cdot d^{b_p} \qquad (6.20)$$

$$M = C_M \cdot v^{a_M} \cdot p^{u_M} \cdot d^{b_M} \qquad (6.21)$$

Wartości stałych i wykładników potęgowych wyznaczonych z badań metodą wykreślną zestawiono w tablicy 6.4.

Z porównania wykładników wynika, że największy wpływ na opory skrawania wywiera średnica wiertła, posuw zaś mniejszy. Wpływ prędkości skrawania jest niejednoznaczny: na ogół opory skrawania rosną wraz ze wzrostem prędkości skrawania, w niektórych przypadkach nie stwierdzono istotnego wpływu ($a = 0$), a dla radzieckiego tworzywa papierowo-fenolowego getinaks III maleją. Również dla krajowego laminatu szkło-fenolowego stwierdzono [7] spadek, ale tylko momentu skrawania przy przekroczeniu prędkości skrawania $v = 1{,}73$ m/s. Zjawisko to związane jest z termicznym rozkładem żywicy i zmniejszaniem się współczynnika tarcia na obwodzie wiertła. Siła poosiowa nie wykazuje spadku, gdyż wywołana jest ona głównie oporami na ścinie, gdzie prędkość skrawania jest nieznaczna. Dla tego ostatniego przypadku obróbki M. Błaszczak [7] uzyskał inną postać zależności siły osiowej i momentu skrawania od posuwu, a mianowicie:

$$P_x = C_p \cdot 185^p, \qquad (6.22)$$

$$M = C_M \cdot 12{,}1^p, \qquad (6.23)$$

aproksymując linią prostą punkty pomiarowe na wykresach o skali semilogarytmicznej. Fakt istnienia różnych funkcji opisujących jednoimienne zależności wynika ze statystyczno-doświadczalnego charakteru wzorów, a nie fizykalnego, może jednak świadczyć o złożoności zjawisk występujących w procesach skrawania tworzyw warstwowych.

Tablica 6.4

Wartości stałych C_p i C_M oraz wykładników potęgowych a_p, b_p, u_p, a_M, b_M i u_M do wzorów 6.20 i 6.21 na siłę poosiową i moment skrawania przy wierceniu tworzyw warstwowych:

$$F_x = C_p \cdot v^{a_p} \cdot p^{u_p} \cdot d^{b_p}, \qquad M_x = C_M \cdot v^{a_M} \cdot p^{u_M} \cdot d^{b_M}$$

Siła P (N), moment M (Nm), prędkość skrawania v (m/s), posuw p (mm/obr), średnica wiertła d (mm)

Lp.	Materiał obrabiany	Ostrze		Zakres parametrów			Stała C_p	Wykładniki potęgowe			Stała C_M	Wykładniki potęgowe			Poz. lit.
		Materiał	Zużycie hp mm	v m/s	p mm/obr	d mm		a_p	u_p	b_p		a_M	u_M	b_M	
1	płyty papierowe celulozowo-fenolowe	SW18	0,3	0,45--1,25	0,05--0,3	5 --20	63,54	0,18	0,54	1,12	0,187	0	0,52	1,37	
2	płyty papierowe celulozowo-fenolowe getinaks III	P18	0,03	0,25--1	0,07--0,6	5 --25	54,9	-0,07	0,78	1	2,62	-0,24	0,48	1,20	[105]
3	płyty tkaninowe celulozowo-fenolowe	SW18	0,3	0,45--1,25	0,05--0,3	5 --20	61,71	0,13	0,49	1,26	0,245	0	0,46	1,38	
4	płyty tkaninowe szkło-fenolowe	HO3	0,1	0,45--1,25	0,05--0,3	5 --20	25,96	0,28	0,64	1,34	0,0808	0,17	0,44	1,40	
5	płyty tkaninowe szkło-epoksydowe	HO3	0,1	0,45--1,25	0,05--0,3	5 --20	18,36	0,13	0,40	1,45	0,0398	0,24	0,24	1,72	
6	płyty tkaninowe szkło-melaminowe	HO3	0,1	0,45--1,25	0,05--0,3	5 --20	21,81	0,32	0,60	1,42	0,044	0,12	0,44	1,36	
7	płyty tkaninowe szkło-fenolowe CT	BK8	0,1	0,5--1,33	0,1--0,6	-	1491	0	0,89	-	-	-	-	-	[15]
					0,1	9 --24	-	-	-	-	0,142	0	-	1,56	
8	płyty tkaninowe szkło-fenolowe C	BK8	-	-	-	-	65,7	-	0,7	0,9	0,021	-	0,5	2,1	[105]
9	płyty tkaninowe szkło-fenolowe ϕ	BK8	-	-	-	-	29,4	-	0,65	1,1	0,007	-	0,65	2,5	[105]
10	płyty tkaninowe szkło-epoksydowe CT3ϕ	BK8	0,1	0,5--1,33	0,1--0,6	-	1530	0	0,742	-	-	-	-	-	[15]
					0,1	9 --24	-	-	-	-	0,231	0	-	1,44	
11	laminat anizotropowy szkło-fenolowy CBAM	BK8	0,1	0,5 --1,33	0,1--0,6	-	2031	0	0,718	-	-	-	-	-	[15]
12	płyty tkaninowe szkło-fenolowe	M20	-	0,87--1,73	0,05--0,4	10	226	0,27	-	-	1	0,73	-	-	[7]
				1,73--2,43							2,3	-0,83	-	-	

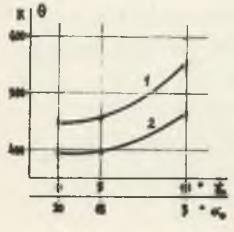
UWAGI: Poz. 7-12 obejmują dane do zależności cząstkowych.

7. TEMPERATURA SKRAWANIA

7.1. Ciepło w strefie skrawania

Temperatura skrawania jest czynnikiem mającym decydujące znaczenie w procesie obróbki, gdyż wywołuje zmiany własności materiału obrabianego w strefie skrawania i warstwie wierzchniej przedmiotu oraz wpływa na mechanizm zużycia ostrza narzędzia. Tworzywa sztuczne warstwowe są materiałem o własnościach szczególnie zależnych od temperatury tak, że znajomość temperatury skrawania ma istotne znaczenie dla wyjaśnienia zjawisk zachodzących w procesie skrawania.

Teoretyczne obliczenia temperatur na powierzchniach kontaktu ostrza z wiórem i materiałem obrabianym metodą źródeł ciepła dokonane przez A.N. Reznikowa [94] odnoszą się do skrawania materiałów tworzących ciągły wiór ścinany w zakresie odkształceń plastycznych. W takim przypadku skrawania głównym źródłem jest ciepło odkształcenia plastycznego w strefie powstawania wióra, kilkakrotnie przewyższające ciepło tarcia na powierzchni przyłożenia. Wymiana ciepła przebiega wówczas na powierzchni natarcia w kierunku do ostrza, zaś na powierzchni przyłożenia w kierunku do materiału. Przy skrawaniu tworzyw warstwowych sytuacja jest odmienna, gdyż w strefie tworzenia wióra występują głównie odkształcenia sprężyste, generujące nieznaczne ilości ciepła [21] oraz kruche pękanie; tarcie wiórów o powierzchnię natarcia jest nieznaczne, natomiast głównym źródłem ciepła jest tarcie powierzchni przyłożenia o materiał obrabiany. O istotnym wpływie na temperaturę skrawania ciepła generowanego na powierzchni przyłożenia przekonuje doświadczenie Rudniewa i Korolewa [98], którzy dokonali pomiaru temperatury skrawania jednym ostrzem, ale ustawionym kolejno pod różnymi kątami skrawania. Jak widać z rysunku 7.1, w miarę zmniejszania się kąta przy-



Rys. 7.1. Wpływ kątów ostrza na temperaturę skrawania przy toczeniu tworzyw warstwowych [98].

1 - laminat szkło-epoksydowy ЭФБ-П, 2 - laminat szkło-fenolowy АГ-4С. Ostrze z węglików spiekanych ВК3М. Parametry: v = 1,67 m/s, p = 0,21 mm/obr., g = 1,5 mm. Pomiar metodą termopary oboej chromel-alumel umieszczonej na powierzchni przyłożenia w odległości 1 mm od krawędzi skrawającej

łożenia α_o temperatura rośnie, pomimo polepszenia się warunków powstawania i spływu wióra dzięki wzrostowi kąta natarcia γ_o.

Gdyby założyć, jako model skrajnie uproszczony, że ciepło generowane jest wyłącznie przez tarcie na powierzchni przyłożenia i temperatury obu stykających się ciał są jednakowe, zaś ich wymiary i pojemności cieplne identyczne, to wówczas udział ciepła przechodzącego do ostrza narzędzia można by wyznaczyć [98] ze wzoru

$$u_N = \frac{\lambda_N}{\lambda_N + \lambda_T} \qquad (7.1)$$

gdzie:

λ_N - współczynnik przewodzenia ciepła materiału ostrza narzędzia,

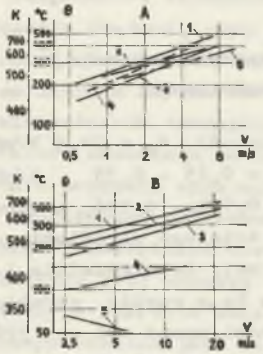
λ_T - współczynnik przewodzenia ciepła tworzywa obrabianego.

Przyjmując dla węglików spiekanych H10, H20 i H03 wartość λ_N = 79,5 W/mK, zaś dla tworzyw warstwowych na nośniku szklanym λ_T = 0,25 - 0,35 W/mK, udział ciepła przechodzącego do ostrza wynosi u_N = 0,994 - 0,996, a więc blisko 100%! Uwzględniając jednak nawet - trudne do ścisłego określenia - ciepło generowane w strefie powstawania wióra oraz fakt, że niewielkie ilości ciepła oddawane są do otoczenia (gdyż tworzywa te z reguły obrabia się na sucho) można przyjąć, że do narzędzia przechodzi ponad 95 - 97% ciepła skrawania. Jest to podstawową przyczyną niskiej trwałości ostrzy z materiałów narzędziowych mało odpornych na podwyższone temperatury. Niska przewodność cieplna tworzyw powoduje nagrzewanie się tylko cienkiej warstwy materiału obrabianego, co zresztą przy wysokich temperaturach skrawania zapobiega rozkładowi żywicy w głębszych warstwach podpowierzchniowych.

7.2. Pomiary temperatury skrawania

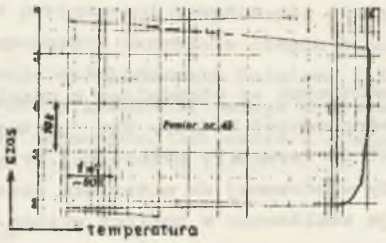
Pomiary temperatury skrawania tworzyw sztucznych są utrudnione z uwagi na dielektryczne ich właściwości oraz niejednorodność budowy. Nie można tu stosować typowej dla skrawania metali metody termopary naturalnej. Przy zastosowaniu termopary lub tylko 1 elektrody wbudowanej do materiału obrabianego i przecinanej przez ostrze, powstają zakłócenia w postaci wyładowań ładunków elektrostatycznych nagromadzonych na powierzchni tworzywa wskutek tarcia przy skrawaniu, pomimo to jednak metoda ta ma zwolenników [105]. Rozpowszechnione stosowanie normalnych tzw. obcych termopar, umieszczonych w ostrzu lub tuż pod powierzchnią obrabianego tworzywa ma tę wadę, że pozwala określić temperaturę dopiero w pewnej odległości od strefy skrawania; w tworzywach dzięki ich złej przewodności cieplnej temperatura na głębokości zaledwie 0,02 mm jest o kilkadziesiąt K niższa od temperatury w strefie skrawania [104]. Oryginalną metodą jest stosowanie narzędzia z ostrzem składanym z dwóch materiałów tworzących termoparę [25,124],

pozwalającą na pomiar temperatury w dowolnym obszarze ostrza np. przy krawędzi skrawającej w pobliżu wierzchołka. Wadą tej metody są trudności techniczne w przygotowaniu ostrza składanego o możliwie minimalnej powierzchni styku i zapewnienie mu wystarczającej wytrzymałości przy obróbce. Określenie tą metodą maksymalnej temperatury skrawania wymaga ekstrapolacji z szeregu pomiarów ostrzami o różnej powierzchni styku, podobnie zresztą jak przy stosowaniu termopary obcej lub półobcej. Przy porównywaniu wyników uzyskanych różnymi metodami pomiaru temperatury skrawania należy więc zachować daleko idącą ostrożność. Dla przykładu podano na rys. 7.2



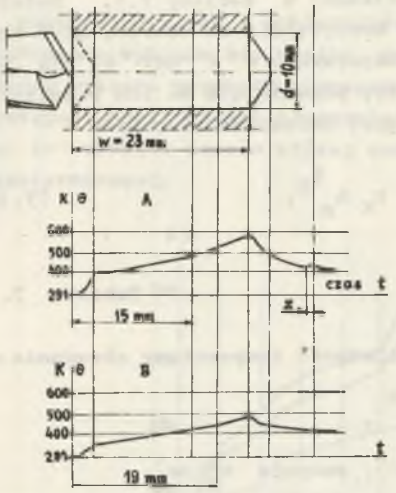
Rys. 7.2. Porównanie wpływu prędkości skrawania na temperaturę skrawania mierzoną różnymi metodami. A - toczenie tekstolitu; parametry: p = 0,2 mm/obr, g = 2 mm (1,2,3,5), 0,5 mm [4], metody: 1 - wbudowanej elektrody w tworzywie [105], 2 - termopary półobcej [69], 3 - ostrza złożonego [41], 4 - jak 3 [124], 5 - termopary obcej [47], B - frezowanie getinaksu [104]; parametry: p_z = 0,32 mm/ostrze, g = = 20 mm, B = 12 mm; metody: 1 - wbudowanej elektrody, 2 - wbudowanych dwu elektrod, 3 - ostrza złożonego, 4 - termopary obcej umieszczonej w tworzywie pod powierzchnią skrawania 0,02 mm, 5 - termopary obcej w ostrzu

wyniki pomiarów temperatury skrawania przy toczeniu i frezowaniu laminatów celulozowo-fenolowych, uzyskane różnymi metodami pomiarowymi. Najwyższe temperatury uzyskano przy zastosowaniu metody wbudowanej elektrody, przecinanej przez ostrze stanowiące drugą elektrodę termopary, najniższe metodą termopary obcej, zaś pośrednie metodą ostrza składanego. Na podane różnice temperatur przy toczeniu mogą mieć wpływ również odmienne właściwości badanych gatunków tekstolitu.



Rys. 7.3. Przebieg zmian temperatury skrawania w czasie przy toczeniu płyty tkaninowej szkło-fenolowej. Ostrze składane z węglików spiekanych H20/S10 o geometrii: γ_o= 0°, α_o = 20°, λ = 0°, $\varkappa$ = 90°, ε = = 88°, h_{pn} = 0,22 mm. Parametry skrawania: v = 3,92 m/s, p = 0,02 mm/obr, g = 3 mm.

Przy pomiarach temperatury metodą termoelektryczną stosowane są z reguły kompensatory elektronowe z urządzeniami rejestrującymi lub wskaźnikami cyfrowymi. Dla rejestracji przebiegów szybkozmiennych np. przy frezowaniu lub przecinaniu piłami tarczowymi, stosowane są oscyloskopy z rejestracją fotograficzną. Przy toczeniu ustalenie się temperatury następuje - zależnie od parametrów skrawania - po czasie kilkunastu lub nawet kilkudziesięciu sekund (rys. 7.3), jedynie przy stosowaniu ostrza w początkowym okresie zużycia przy wysokich pręd-

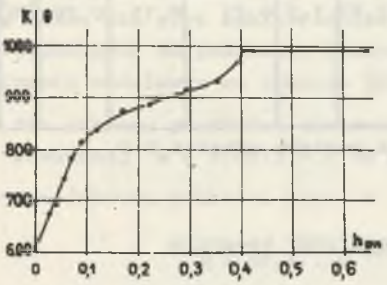


Rys. 7.4. Przebieg zmian temperatury skrawania w czasie przy wierceniu płyty tkaninowej szkło-fenolowej [7]. Parametry: v = 1,24 m/s, p = 0,2 mm/obr., w = 23 mm, d = 10 mm. Temperatura w okolicy A - naroża wiertła, B - ścina, Z - wycofywanie wiertła z otworu

kościach skrawania nie następuje ustalenie temperatury, lecz jej ciągły wzrost, spowodowany postępującym szybko zużyciem ostrza. Przy wierceniu temperatura skrawania, mierzona termoparą obcą w pobliżu naroża wiertła (od strony powierzchni przyłożenia), rośnie ciągle w miarę zagłębiania się wiertła w materiał, wykazując od głębokości l = 1,5 d znacznie większą intensywność wzrostu (rys. 7.4). W takim przypadku dla określania zależności temperatury od parametrów skrawania należy przyjąć temperaturę chwilową uzyskaną np. po określonej drodze naroża, tzn. liczbie obrotów wiertła lub po stałym czasie skrawania względnie przy stałym wgłębieniu wiertła np. aż do końca grubości płyty, kiedy temperatura osiąga maksimum.

7.3. Wpływ zużycia ostrza

Charakterystycznym dla skrawania tworzyw warstwowych zjawiskiem jest szybki wzrost temperatury skrawania w miarę zużycia ostrza, szczególnie w początkowym okresie zużycia (rys.7.5) oraz stabilizacja temperatury przy dużym zużyciu, obserwowana przy wysokich prędkościach skrawania. Temperatura stabilizacji rzędu 1000 K, leżąca powyżej temperatury rozkładu żywicy, została stwierdzona tylko przy pomiarach metodą ostrza składanego. W zakresie mniejszego stępienia ostrza można określić wpływ wysokości starcia powierzchni przyłożenia h_p na temperaturę skrawania θ zależnością



Rys. 7.5. Wpływ zużycia ostrza na narożu powierzchni przyłożenia h_{pn} na temperaturę skrawania przy toczeniu płyty tkaninowej szkło-fenolowej. Dane jak dla rys. 7.3

$$\theta_i = C_i \cdot h_p^{b_i} \qquad (7.2)$$

gdzie:

i = K,C.

Wartości wykładnika b_i zestawiono przykładowo w tablicy 7.1. Należy zwrócić uwagę na wykładniki potęgowe przy korzystaniu ze wzorów, gdyż inne są ich wartości b_K przy określaniu temperatury w K niż b_c dla °C, i nie zachodzi między nimi prosta zależność, pozwalająca na ich przeliczenie. Wzajemna zależność tych wykładników jest określona równaniem

$$C_c \, h_p^{b_c} + 273 = C_K \, h_p^{b_K}. \qquad (7.3)$$

Tablica 7.1

Wartości wykładnika b_i do wzoru 7.2 na zależność temperatury skrawania od zużycia ostrza:

$$\theta_i = C \cdot h_p^{b_i},$$

gdzie: i = K,C. Temperatura θ_K(K), θ_c(°C), zużycie h_p(mm).

Materiał obrabiany	Ostrze			Parametry skrawania			b_K	b_C	Poz. literatury
	Materiał	Geometria	Zakres zużycia h_p mm	v m/s	g mm	p mm/obr			
płyty szkło-fenolowe Rezotekst-S	H20/S10	$\gamma_o = 0^o$, $\alpha_o = 20^o$, $\chi = 0^o$, $\varkappa = 90^o$, $\varepsilon = 88^o$	0,01 - 0,1	1,67	3	0,02	0,18 ±0,02	0,34 ±0,08	
			0,1 - 0,9				0,08 ±0,02	0,17 ±0,02	
			<0,01 - 0,64	3,92			0,13 ±0,01	0,20 ±0,01	
laminat szkło-epoksydowy ЭФБ-Т	ВК3М	-	≤0,5	1,67	1,5	0,21	0,15	0,28	[98]
laminat szkło-fenolowy АГ-4С									

Przedziały ufności wykładników obliczono dla poziomu ufności 0,9.

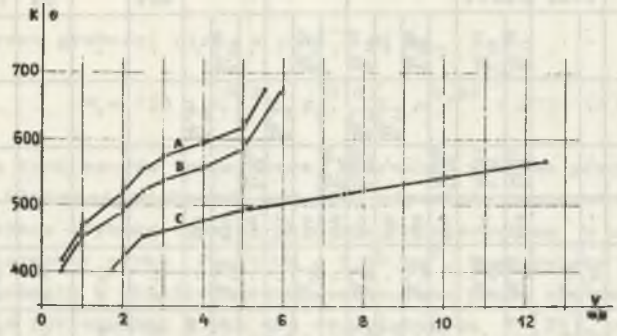
7.4. Wpływ parametrów skrawania na temperaturę przy toczeniu

Zależność temperatury skrawania od parametrów skrawania przy toczeniu przedstawiona jest równaniem:

$$\theta_i = C_{\theta i} \cdot v^{a_{\theta i}} \cdot s^{e_{\theta i}} \cdot p^{u_{\theta i}} \qquad (7.4)$$

dla i = K,C.

Wartości stałych i wykładników potęgowych zestawiono w tablicy 7.2. Z porównania wykładników wynika, że zdecydowanie dominujący wpływ na temperaturę wywiera prędkość skrawania. Przy wysokich prędkościach skrawania występuje nagły wzrost temperatury (rys. 7.6) związany z chemiczną destrukcją tworzywa, w czasie której zostaje dodatkowo wydzielane ciepło reakcji egzotermicznej.



Rys. 7.6. Wpływ prędkości skrawania na temperaturę skrawania przy toczeniu laminatów [107]: A - tkaninowego szkło-fenolowego, B- tkaninowego szkło-epoksydowego, C - papierowego celulozowo-fenolowego. Parametry skrawania: g = 1,5 mm, p = 0,17 mm/obr. Ostrze z węglików spiekanych H03 o geometrii: $\gamma_o = 10^o$, $\alpha_o = 20^o$, $\lambda = 0^o$, $\varkappa = 45^o$, $\varepsilon = 123^o$, $r_\varepsilon = 1$ mm. Zużycie ostrza h_p = 0 - 0,02 (C), 0,02 - 0,05 (B), 0,05 - 0,07 (A) mm. Termopara obca na powierzchni przyłożenia ostrza umieszczona w odległości l_z=0,75mm od krawędzi skrawającej i l_w = 1 mm od wierzchołka ostrza

7.5. Wpływ parametrów skrawania na temperaturę przy przecinaniu

Przy przecinaniu piłą tarczową wpływ parametrów skrawania na temperaturę można dla płyt szkło-fenolowych (Rezotekst-S) wyznaczyć ze wzorów, wyprowadzonych na podstawie pomiarów temperatury przeprowadzonych przy przecinaniu modelowym na tokarce [26]:

- dla zakresu prędkości skrawania v = 3,33 - 22,2 m/s i grubości warstwy skrawanej a = 0,0075 - 0,16 mm,
- dla zakresu grubości płyt w = 5 - 15 mm,

$$\theta = 58{,}1 \cdot v^{0{,}2} \cdot a^{0{,}03} \cdot w^{0{,}65} + 273 \text{ (K)} \qquad (7.5)$$

dla zakresu grubości płyt w = 15 - 30 mm,

$$\theta = 173{,}7 \cdot v^{0{,}2} \cdot a^{0{,}03} \cdot w^{0{,}25} + 273 \text{ (K)} \qquad (7.6)$$

Wartości stałych C_θ i wykładników potęgowych a_θ, e_θ, u_θ do wzoru 7.4 na temperaturę skrawania przy toczeniu $\vartheta_i = C_{\vartheta_i} v^{a_{\vartheta i}} s^{e_{\vartheta i}} p^{u_{\vartheta i}}$, dla i = K, C.
Temperatura ϑ_K(K), ϑ_C (°C), prędkość skrawania v(m/s), głębokość skrawania a(mm), posuw p (mm/obr)
Przedziały ufności wykładników obliczono dla poziomu ufności 0,95.

Lp.	Materiał obrabiany	Ostrze: Materiał	Ostrze: geometria	Ostrze: zużycie h_p mm	Zakres parametrów skrawania: v m/s	a mm	p mm/obr	$C_{\vartheta C}$	$a_{\vartheta C}$	$e_{\vartheta C}$	$u_{\vartheta C}$	$C_{\vartheta K}$	$a_{\vartheta K}$	$e_{\vartheta K}$	$u_{\vartheta K}$	Metoda pomiaru	Pozycja literatury
1	Płyty szkło-fenolowe Rezotekst S	H20/S10	γ_o = 0 α_o = 20 λ = 0 $\varkappa$ = 90 ε = 90	0,4	0,67–3,33	2,5	0,01–0,16	39,7	0,7	0	0,05	–	–	–	–	ostrze składane termopara przy przejściowej krawędzi skrawającej	[26]
					3,33–13,33	2,5	0,01–0,16	527	0,2	0	0,03	–	–	–	–		
2	Rury szkło-epoksydowe Tm S – 130	H03	γ_o = 10 α_o = 20 λ = 0 $\varkappa$ = 45 ε = 123	0,12	0,5–2,5	1,5	0,1–0,5	245	0,4 ±0,03	–	0,27 ±0,03	518	0,15 ±0,01	–	0,11 ±0,02	termopara oboa na powierzchni przyłożenia, odległość od krawędzi skrawającej l = 2,4 mm	
3	Rury szkło-silikonowe Tm S	H03		0,11	0,5–2,5	1,5	0,1–0,5	154	0,5 ±0,02	–	0,13 ±0,03	430	0,17 ±0,01	–	0,04 ±0,01		
4	Płyty szkło-fenolowe	H03	jw	0,06	0,5–5,5	1,5	0,17	192	0,38 ±0,04	–	–	470	0,17 ±0,02	–	–	jw l = 0,75 mm	[107]
				0,07	2,5	1,5	0,08–0,47	423	–	–	0,16 ±0,07	692	–	–	0,09 ±0,04		
				0,08	2,5	0,5–3	0,17	293	–	0,19 ±0,1	–	564	–	0,11 ±0,05	–		
				0,05–0,08	0,5–5,5	0,5–3	0,08–0,47	254	0,4 ±0,07	0,34 ±0,2	0,21 ±0,1	545	0,19 ±0,04	0,17 ±0,1	0,11 ±0,05		
5	Płyty szkło-epoksydowe	H03	jw	0,03	0,5–6	1,5	0,17	172	0,38 ±0,04	–	–	448	0,16 ±0,02	–	–	jw l = 0,75 mm	[107]
				0,08	2,5	1,5	0,08–0,47	456	–	–	0,24 ±0,1	719	–	–	0,13 ±0,07		
				0,1	2,5	0,5–3	0,17	273	–	0,2 ±0,1	–	545	–	0,12 ±0,08	–		
6	Płyty tkaninowe celulozowo-fenolowe	H03	jw	0,01	1,67–12,5	1,5	0,17	122	0,35 ±0,07	–	–	380	0,15 ±0,04	–	–	jw l = 0,75 mm	[107]
				0,11	7,5	1,5	0,08–0,54	365	–	–	0,13 ±0,04	636	–	–	0,07 ±0,02		
				0,12	7,5	0,5–3	0,17	282	–	0,1 ±0,02	–	555	–	0,05 ±0,01	–		
7	Laminat tkaninowy celulozowo-fenolowy tekstolit	BK8/T15K6 / BK15	–	–	2,5–21,2	0,5–5	0,05–1	288	0,18	0,10	0,10	–	–	–	–	ostrze składane elektroda wbudowana	[105]
8	Laminat papierowy celulozowo-fenolowy gatinaks	–	–	–	–	–	–	–	0,28	0,22	0,23	–	–	–	–	–	[119]
9	Laminat papierowy celulozowo-fenolowy gatinaks III	DK8/T15K6 / BK15	–	–	2,5–21,2	0,5–5	0,05–1	313	0,18	0,10	0,10	–	–	–	–	ostrze składane elektroda wbudowana	[105]
10	Laminat szkło-fenolowy CTY	BK15	–	–	2,5–21,2	0,5–5	0,05–0,8	331	0,26	0,18	0,20	–	–	–	–	elektroda wbudowana	[105]
11	Laminat szkło-fenolowy AГ4C	BK3N	–	–	0,42–6,67	1–3	0,1–0,6	–	0,31	0,19	0,23	–	–	–	–	termopara oboa	[105]
12	Laminat szkło-epoksydowe 27-63C	BK2	–	–	1,67–5	1–3	0,1–0,5	–	0,42	0,27	0,36	–	–	–	–	termopara oboa	[119]
13	Laminat szkło-epoksydowy ЭФБ-B	BK3M	–	–	1,67–5	1–3	0,1–0,6	–	0,34	0,21	0,26	–	–	–	–	termopara oboa	[105]

Po podstawieniu średniej grubości warstwy skrawanej $a_{śr}$ ze wzoru 6.18 i przykładowo typowych dla przecinania wartości e = 7 mm i D = 350 mm uzyskuje się po przekształceniach wzory korelacyjne postaci:

- dla zakresu grubości płyt w = 5 - 15 mm,

$$\theta = 55{,}1 \cdot v^{0{,}2} \cdot p_z^{0{,}03} \cdot w^{0{,}66} + 273 \ (K) \qquad (7.7)$$

- dla zakresu grubości płyt w = 15 - 30 mm,

$$\theta = 163 \cdot v^{0{,}2} \cdot p_z^{0{,}03} \cdot w^{0{,}26} + 273 \ (K) \qquad (7{,}8)$$

Obliczona z tych wzorów temperatura, obarczona wskutek przyjętych wyżej uproszczeń błędem nie większym niż ±3%, odpowiada temperaturze mierzonej przez termoparę stykową (ostrze składane) umiejscowioną w narożu ostrza piły o powierzchni styku F = 0,03 - 0,04 mm^2. Rzeczywista temperatura w strefie skrawania w okolicy naroża, oszacowana przez ekstrapolację na zerową wartość powierzchni styku obu części ostrza F [25], osiąga wartości o ok. 300 - 400 K wyższe. Jak wynika z porównania wykładników potęgowych największy wpływ na temperaturę wywiera grubość przecinanej płyty - szczególnie w zakresie małych grubości, następnie zaś prędkość skrawania. Wpływ posuwu jest nieznaczny. Wyraźny wpływ grubości płyty na temperaturę skrawania wynika ze zmian długości drogi roboczej ostrza w materiale obrabianym, a tym samym stosunku czasu nagrzewania się w pracy do czasu chłodzenia na łuku jakowym. Spadek intensywności wzrostu temperatury przy większych grubościach płyt można by tłumaczyć zmniejszającymi się przyrostami długości drogi roboczej w miarę wzrostu grubości płyt, co można zauważyć analizując wzór na długość drogi roboczej ostrza l:

$$l = \frac{D}{2}\left(\arccos\left(1 - \frac{2(e+w)}{D}\right) - \arccos\left(1 - \frac{2e}{D}\right)\right), \qquad (7.9)$$

gdzie:

D - średnica piły (mm),
e - wybieg ostrza prostopadle poza płytę w (mm) (rys. 6.12),
w - grubość płyty (mm).

7.6. Wpływ parametrów skrawania na temperaturę przy wierceniu

Przy wierceniu zależność temperatury od parametrów skrawania wyraża się zwykle wzorem

$$\theta = C_\theta \cdot v^{a_\theta} \cdot p^{u_\theta} \cdot D^{b_\theta} \cdot k_{hp}. \qquad (7.10)$$

Wartości stałej i wykładników podano w tablicy 7.3.

Wartości stałej C_θ i wykładników potęgowych a_θ, b_θ, u_θ do wzoru 7.10 na temperaturę skrawania przy wierceniu:

$$\theta = C_\theta \cdot v^{a_\theta} \cdot p^{u_\theta} \cdot D^{b_\theta} \cdot k_{hp}$$

Temperatura skrawania θ (°C), prędkość skrawania v (m/s), posuw p (mm/obr), średnica wiertła D (mm), k_{hp} - współczynnik uwzględniający zużycie ostrza.

Lp.	Materiał obrabiany	Ostrze		Parametry skrawania			C_θ	a_θ	u_θ	b_θ	Metoda pomiaru	Pozycja literatury
		Materiał	Zużycie hp mm	v m/s	p mm/obr	D mm						
1	Laminaty celulozowo-fenolowe getinaks III i tekstolit	P18	0,03	0,1 - -1,4	0,1 - -0,56	5 - - 20	472	0,28	0,14	0,1	elektroda wbudowana w materiał	[105]
2	Laminat szkło-fenolowy CT						614					
3	Płyty szkło-fenolowe	H03	0,03	0,8- -2,5	0,1- -0,4	10	380^{x}	$0,17^{x}$	$0,52^{x}$	-	obca termopara	wg [7]
							351^{xx}	$0,26^{xx}$	$0,16^{xx}$	-		

^{x} - temperatura w pobliżu naroża wiertła po drodze 50 obrotów

^{xx} - temperatura w pobliżu naroża wiertła po osiągnięciu głębokości wiercenia 23 mm.

Wartości współczynnika poprawkowego k_{hp} [105]:

Materiał obrabiany	h_p mm	0,03	0,1	0,15	0,2	0,4
Laminat celulozowo-fenolowy getinaks III	k_{hp}	1	1,2	1,4	1,6	1,7
Laminat szkło-fenolowy CT		1	1,13	1,2	1,26	1,42

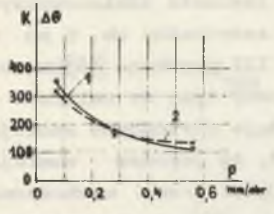
Inny charakter zależności podał M. Błaszczak [7], podobnie jak przy oporach skrawania, uzależniając temperaturę skrawania od posuwu w postaci funkcji wykładniczej:

$$\Theta = 352 \cdot v^{0,062} \cdot 2,78^{p} \quad (K). \tag{7.11}$$

Wzór ten odnosi się do wiercenia płyt szkło-fenolowych ostrzem z węglików spiekanych H20 i określa temperaturę mierzoną termoparą obcą, umieszczoną w odległości 0,6 mm od naroża wiertła na powierzchni przyłożenia po wykonaniu przez wiertło 50 obrotów w materiale obrabianym.

Chcąc porównać zależności uzyskane przez różnych badaczy, dokonano przeliczenia danych doświadczalnych M. Błaszczaka wg wzoru 7.10, umieszczając obliczone wartości w poz. 3 tablicy 7.3. Biorąc pod uwagę temperaturę określaną pomiarem na stałej głębokości otworu uzyskano bardzo bliskie wartości wykładników potęgowych dla podobnych tworzyw szkło-fenolowych. Wyższa wartość stałej C_Θ uzyskana przez Siemkę [105] wynika z różnic w metodach pomiaru temperatury. Z porównania wykładników wynika, że na temperaturę przy określonej głębokości wiercenia prędkość skrawania ma większy wpływ od posuwu, zaś na temperaturę określaną po jednakowej drodze naroża wiertła wpływ rozpatrywanych parametrów skrawania jest odwrotny.

Pomiary temperatury wewnętrznej powierzchni otworu dokonane przez Tsuedę [64] wykazały odwrotną zależność temperatury od posuwu (rys. 7.7). Przy mniejszych posuwach wzrost temperatury powierzchni obrobionej jest większy z uwagi na większą kumulację ciepła wywołanego tarciem łysinek wiertła o ściany otworu.



Rys. 7.7. Wpływ posuwu na przyrost temperatury wewnętrznej powierzchni otworu przy wierceniu bez chłodzenia laminatów: 1 - papierowego celulozowo-fenolowego, 2 - szkło-fenolowego [64]

8. JAKOŚĆ WYROBU

8.1. Dokładność wymiarów po obróbce

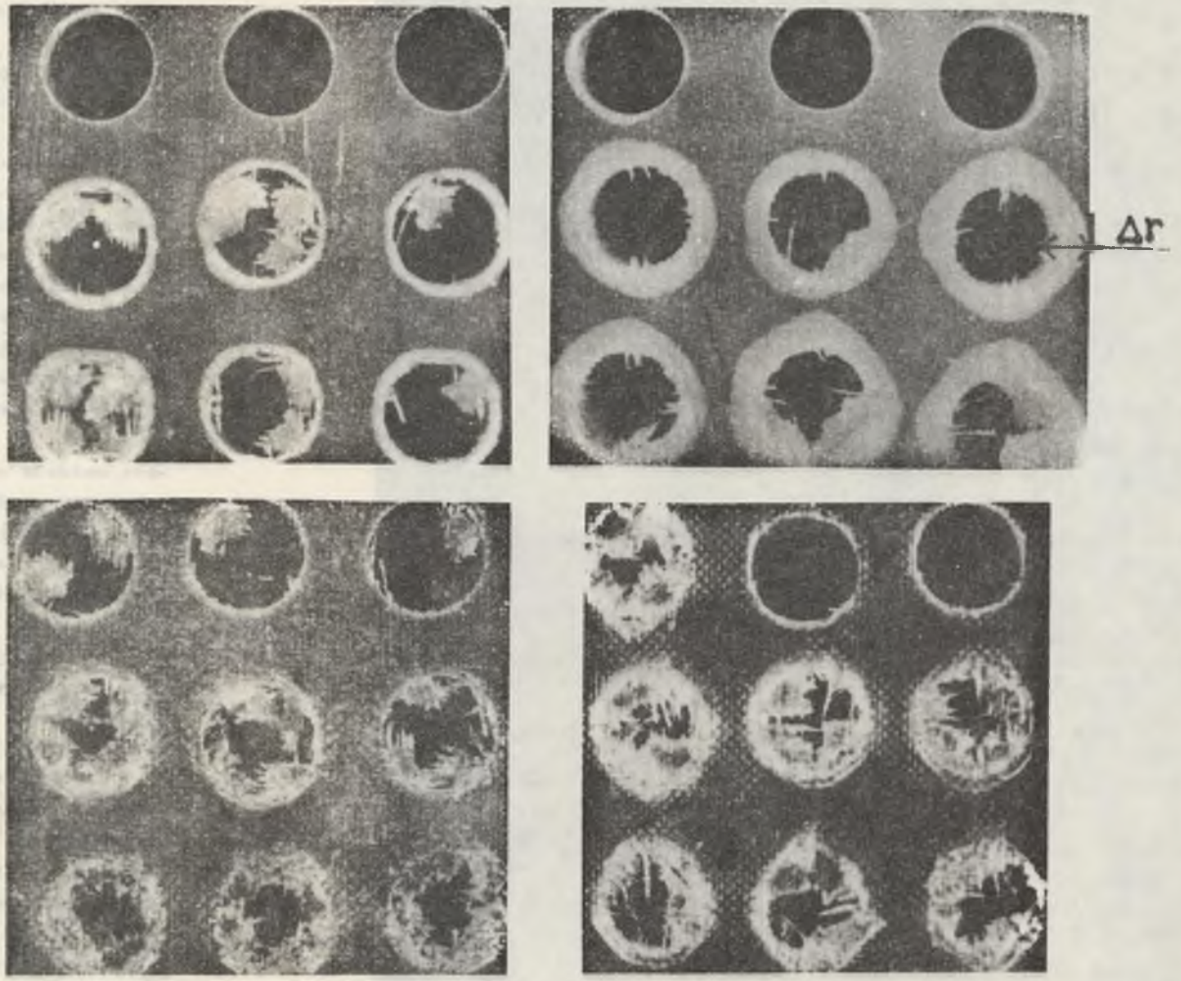
Podstawowym celem obróbki jest zapewnienie żądanej jakości wyrobu, dotyczącej zarówno cech geometrycznych, jak też własności użytkowych przedmiotu, a szczególnie jego warstwy wierzchniej. W przypadku obróbki tworzyw warstwowych zapewnienie wymaganych cech geometrycznych, określanych zwykle dokładnością wymiarów wyrobu, uwarunkowane jest głównie zachowaniem warunków obróbki niedopuszczających do większych odkształceń sprężystych przedmiotu. Z uwagi na dużą sprężystość tworzyw, wymaga to sztywnego mocowania przedmiotu przy obróbce oraz stosowania warunków skrawania, zapewniających możliwie małe wartości sił skrawania. Z tego względu przy obróbce wykańczającej stosowane są ostre narzędzia i małe przekroje warstwy skrawanej.

Własności lepkosprężyste tworzyw warstwowych powodują trudności z uzyskaniem dokładnych wymiarów przy obróbce narzędziami wymiarowymi. Przeprowadzone badania [15] wierconych otworów średnicy d = 9,5 mm wykazały, że na skutek nawrotu sprężystego następuje, po upływie czasu do 1 doby od obróbki, zmniejszanie się średnicy otworu, wynoszące dla różnych gatunków laminatów szkło-fenolowych 0,01 - 0,05 mm, zaś dla laminatu szkło-epoksydowego CT3 ϕ 0,005 - 0,02 mm. Przy toczeniu rowków szerokości ok. 5 mm w laminacie papierowym celulozowo-fenolowym getinaks III uzyskano [68] zmniejszenie szerokości 0,025 - 0,034 mm. Zaobserwowano przy tym, że zwiększanie zużycia ostrza w zakresie do $h_p \leqslant 0{,}3$ mm powoduje nieznaczne zmniejszanie się sprężystego nawrotu. Nie można wykluczyć, że powodem zmniejszania się wymiarów może być także pochłanianie wilgoci przez uszkodzoną warstwę wierzchnią powierzchni obrobionej, wywołujące pęcznienie materiału.

8.2. Warunki powstawania anomalii obróbkowych

Zapewnienie własności użytkowych materiału i jego warstwy wierzchniej polega w zasadzie na niedopuszczeniu do powstania anomalii obróbkowych.

Generalnie można przyjąć, że laminaty wykazują najmniejszą wytrzymałość na rozwarstwianie (zwaną również wytrzymałością sklejenia warstw) i jeśli w czasie skrawania wystąpią wystarczająco duże naprężenia rozciągające prostopadle do warstw zachodzi delaminacja. Może ona rozciągać się tylko w warstwie skrawanej albo rozprzestrzeniać się poza nią i wówczas



$h_{pn} = 0$

A $h_{pn} = 0{,}13$ mm

$h_{pn} = 0{,}2$ mm

$h_{pn} = 0$

B $h_{pn} = 0{,}13$ mm

$h_{pn} = 0{,}2$ mm

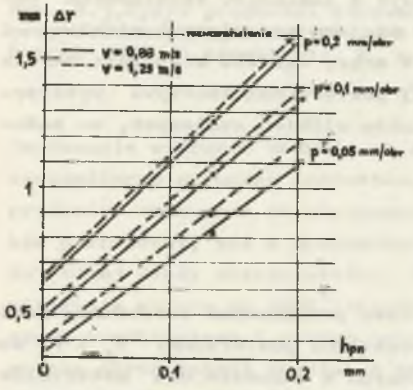
p = 0,05 mm /obr

p = 0,20 mm/obr

Rys. 8.1. Uszkodzenie czołowych powierzchni płyt od strony wyjścia wiertła w zależności od zużycia ostrza h_{pn} i posuwu p przy wierceniu laminatów: A) szkło-epoksydowego i b) szkło-fenolowego wiertłem o średnicy d=10 mm z prędkością skrawania v = 1,25 m/s

następuje uszkodzenie przedmiotu obrabianego. Należy więc eliminować takie warunki obróbki, które sprzyjają rozwarstwianiu.

Typową anomalią występującą przy wierceniu otworów prostopadle do laminacji jest złuszczenie, zwłóknienie lub zeszczerbienie krawędzi otworu, szczególnie od strony wyjścia wiertła. Przy pracy wiertłem o większym zużyciu występują także odłupania spodnich warstw laminatu. Wielkość uszkodzenia krawędzi otworu można określić przyrostem promienia Δr mierzonym na czołowej powierzchni płyty (rys. 8.1), którego wielkość zależna jest od stępienia ostrza h_p i posuwu p. Prędkość skrawania wywiera mniejszy wpływ na ten rodzaj anomalii, również średnica wiercenia ma istotnego znaczenia. Wpływ wymienionych czynników na wielkość uszkodzenia Δr przedstawiono na rys. 8.2. Przy wierceniu laminatów papierowych celulozowo-fenolowych ze stałą siłą posuwową uszkodzenia krawędzi otworu przy wyjściu wiertła rosną w miarę zwiększania siły posuwowej, zaś maleją w miarę zwiększania prędkości skrawania [64].



Rys. 8.2. Wpływ zużycia ostrza na powierzchni przyłożenia przy narożu wiertła h_{pn} na wielkość uszkodzenia powierzchni czołowej Δr przy wierceniu otworów o średnicy d = 10 mm w płytach szkło-fenolowych z różnymi posuwami p i prędkościami skrawania v

Przypalenia, będące efektem rozkładu i zwęglania żywicy oraz nośnika organicznego, pojawiają się w przypadku występowania odpowiednich wysokich temperatur przy skrawaniu. Najczęściej są one wynikiem wysokich prędkości skrawania i użycia znacznie stępionego ostrza, zaś w przypadku wiercenia zwykle zakleszczenia wiórów we wierconym otworze lub zbyt małego posuwu.

Na przykład, przy toczeniu laminatu szkło-epoksydowego przypalenia powierzchni obrobionej pojawiają się przy osiągnięciu prędkości skrawania v = 6 m/s (dla posuwu p = = 0,2 mm/obr., głębokości sskrawania g = 1,5 mm), zaś laminatu szkło-fenolowego przy v = 4 m/s, p = 0,4 mm/obr. i g = 1,5 mm. Przy przecinaniu piłą tarczową płyt szkło-fenolowych przypalenia powierzchni obrobionej występują przy pracy ostrym narzędziem z posuwem $p_z \geqslant 0{,}01$ mm/ostrze dopiero przy prędkościach skrawania powyżej $v > 30$ m/s, przy ostrzach zaś przytępionych już przy prędkościach skrawania rzędu v = 17 m/s. W praktyce przemysłowej przypalenia powierzchni obrobionej występują często przy cięciu z posuwem ręcznym w przypadku choćby chwilowego zatrzymania posuwu, co powoduje wydzielanie się dużych ilości ciepła tarcia.

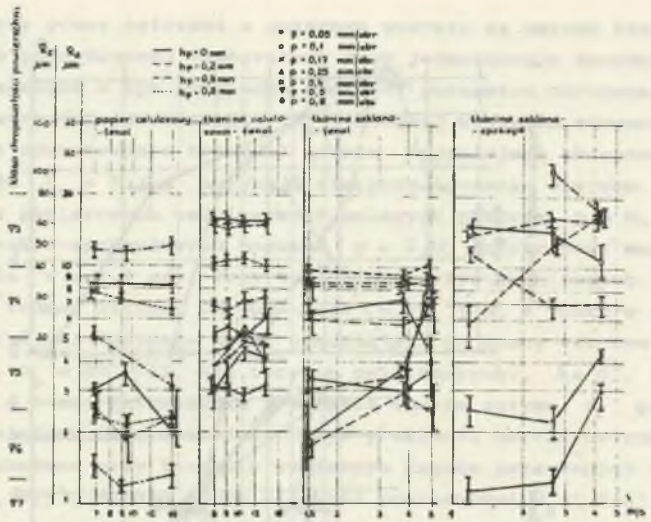
Powierzchnia obrobiona tworzyw warstwowych może posiadać zróżnicowaną fakturę, zależnie od gatunku tworzywa, kierunku ruchu głównego względem laminacji, kształtu krawędzi skrawającej oraz parametrów skrawania. Przy toczeniu wzdłużnym prętów prasowanych szkło-epoksydowych Epolan Se zaobserwowano w zakresie małych posuwów $p < 0,1$ mm, małych promieni zaokrąglenia naroża ostrza $r_\varepsilon < 1$ mm oraz wyższych prędkości skrawania występowanie zwłóknień w postaci "szczotek" zbudowanych z wystających włókien szklanych. Zwłóknienia obejmujące ponad 70% powierzchni obrobionej zaobserwowano również przy toczeniu krążków wyciętych z płyt szkło-epoksydowych ostrzem o promieniu zaokrąglenia naroża $r_\varepsilon = 1$ mm i zużyciu $h_p = 0,3$ mm z prędkością skrawania $v > 2,6$ m/s i posuwem $p = 0,05$ mm/obr oraz płyt szkło-fenolowych przy zużyciu $h_p = 0,2$ mm i prędkości $v > 3,5$ m/s z identycznie małym posuwem. Przy wzroście stępienia ostrza do $h_p = 0,3$ mm w powyższym przypadku toczenia płyt szkło-fenolowych pojawiają się na powierzchni obrobionej lokalne wyrwania, wynikłe głównie z wykruszenia żywicy.

Przy przecinaniu ostrą piłą tarczową płyt z laminatów tkaninowych powierzchnia obrobiona posiada wypukłości w miejscu przeciętych włókien i wgłębienia w miejscu wykruszonej żywicy. W miarę wzrostu stępienia naroża ostrza piły uwidaczniają się na obrobionej powierzchni tworzywa wystrzępienia w postaci bezładnie ułożonych odcinków włókien szklanych, co nadaje powierzchni fakturę zamszu.

8.3. Chropowatość powierzchni obrobionej

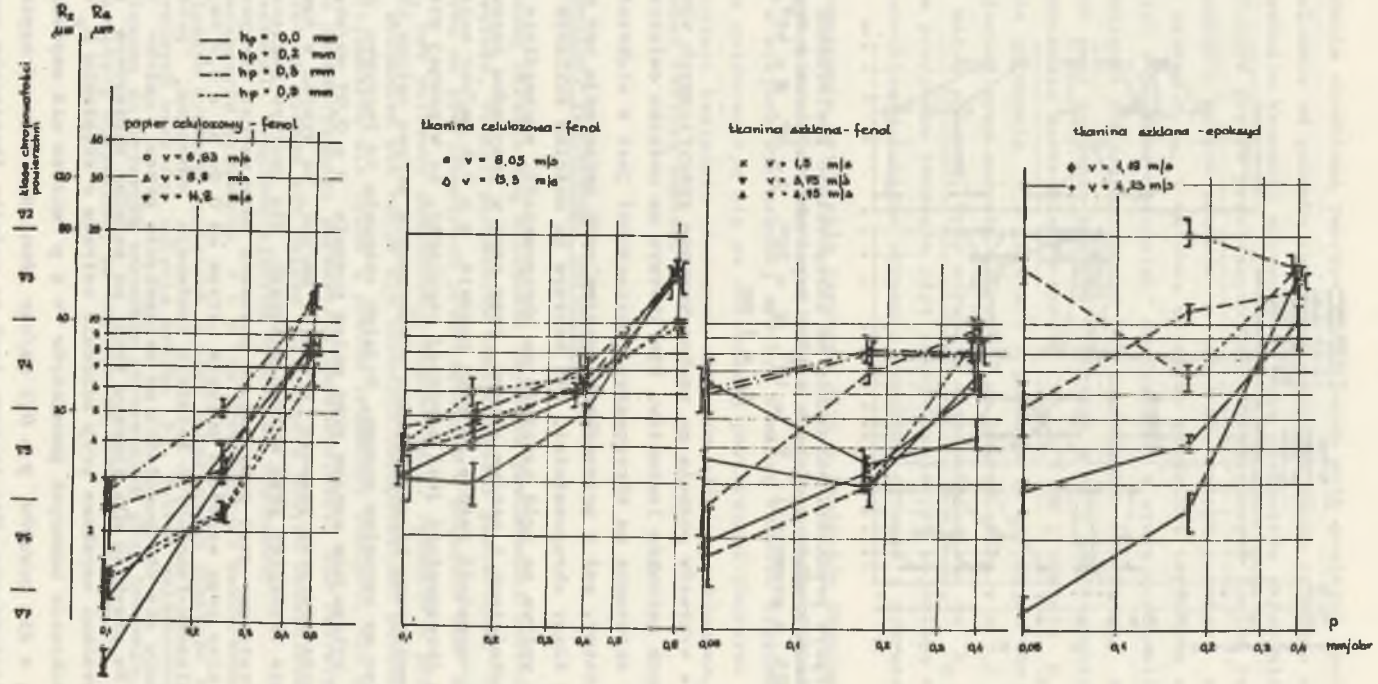
Ważną cechą określającą własności użytkowe powierzchni obrobionej jest jej chropowatość. Pomiar parametrów chropowatości powierzchni R_a i R_z dokonywany bywa na profilometrach przewidzianych w zasadzie dla materiałów metalowych, bez potrzeby dodatkowego wyposażenia. Jednakże w przypadku występowania zwłóknień nie udaje się określić chropowatości powierzchni za pomocą profilometrów nie tylko z powodu trudności pomiaru, ale głównie utraty sensu geometrycznego parametrów chropowatości. Dla tworzyw na nośnikach włóknistych wydaje się celowe opracowanie nowych wskaźników chropowatości powierzchni, uwzględniających specyfikę ich budowy.

Wpływ parametrów skrawania v i p na chropowatość powierzchni przy toczeniu wzdłużnym krążków wyciętych z płyt warstwowych pokazano na rys.8.3 i 8.4 dla różnych wartości zużycia ostrza h_p. Zakres zmienności parametrów ograniczono do typowych warunków stosowanych przy toczeniu, stosując ostrza o geometrii optymalnej ze względu na trwałość ostrza.



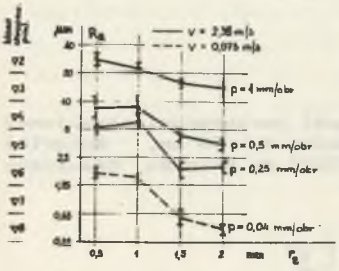
Rys. 8.3.Wpływ prędkości skrawania na chropowatość powierzchni obrobionej przy toczeniu krążków wyciętych z płyt warstwowych.Ostrze z węglików spiekanych H03 o geometrii: $\gamma_o = 10^o$, $\alpha_o = 20^o$, $\lambda = 0^o$, $\varkappa = 45^o$, $\varepsilon = 123^o$, $r_\varepsilon = 1$ mm

Porównanie wykresów pozwala na zaobserwowanie specyficznych własności poszczególnych gatunków laminatów. Dla tworzyw na nośniku celulozowym wpływ prędkości skrawania na chropowatość powierzchni jest w większości przypadków nieistotny, zaś w przypadkach maksymalnych zmian mają one wielkość rzędu jednej klasy chropowatości. Dla tworzyw na nośniku szklanym prędkość skrawania wpływa na ogół istotnie na chropowatość, szczególnie przy wyższych prędkościach i ostrym ostrzu, przy czym w przypadku posuwu $p < 0,2$ mm/obr chropowatość rośnie, a przy posuwie $p = 0,4$ mm/obr maleje. Wpływ posuwu na chropowatość jest bardziej regularny, co w pewnej mierze wynika ze stereometryczno-kinematycznego odwzorowania zarysu ostrza,chropowatość rośnie więc ze wzrostem posuwu. Wyjątek stanowią tu tworzywa na nośniku szklanym, wykazujące czasem przy małym posuwie $p = 0,05$ mm/obr chropowatość większą niż przy posuwie $p = 0,17$ mm/obr, co wynika z tendencji do powstawania zwłóknień przy małych posuwach. Dla tworzyw szkło-epoksydowych charakterystyczny jest przy małych posuwach duży wzrost chropowatości rzędu dwóch klas przy wzroście zużycia ostrza od 0 do $h_p = 0,2$ mm. Dla tworzyw celulozowo-fenolowych istnieje tendencja odwrotna, polegająca na zmniejszaniu się chropowatości po osiągnięciu przez ostrze określonego zużycia. Na przykład dla tworzyw tych na nośniku papierowym chropowatości powierzchni uzyskane przy toczeniu ostrzem o stępieniu $h_p = 0,5$ mm są w całym zakresie badanych parametrów v i p niższe niż uzyskane przy $h_p = 0,3$ mm, a dla posuwów $p > 0,2$ mm/obr również niższe od uzyskanych ostrzem niestępionym. Dla tworzyw tych na nośniku tkaninowym powyższa zależność zachodzi dopiero przy posuwach $p > 0,5$ mm/obr. Przyczyną zagładzania



Rys. 8.4. Wpływ posuwu na chropowatość powierzchni obrobionej przy toczeniu krążków wyciętych z płyt warstwowych. Ostrze z węglików spiekanych H03 o geometrii: $\gamma_o = 10^o$, $\alpha_o = 20^o$, $\lambda = 0^o$, $\varkappa = 45^o$, $\varepsilon = 123^o$, $r_\varepsilon = 1$ mm

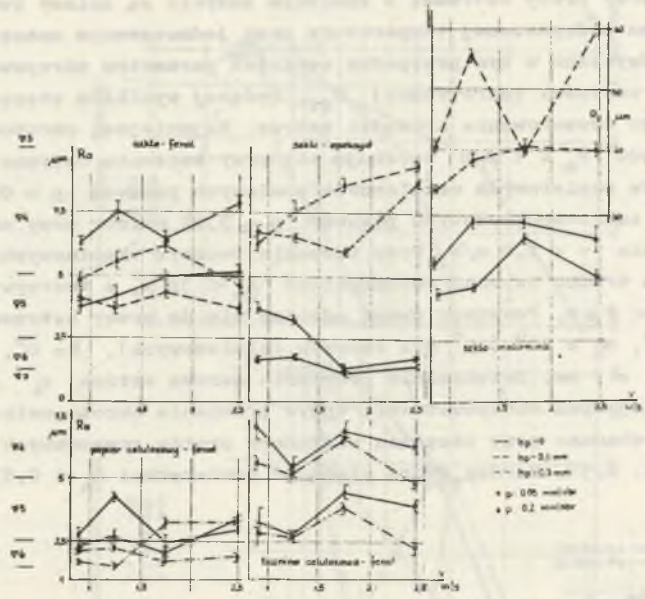
powierzchni przy pracy ostrzami o znacznym zużyciu są zmiany tworzywa wywołane wpływem podwyższonej temperatury przy jednoczesnym znacznym nacisku ostrza. Uzyskane w tym przypadku wartości parametru chropowatości R_z są niższe od wartości teoretycznej R_{zt}, będącej wynikiem stereometryczno-kinematycznego odwzorowania krawędzi ostrza. Najmniejszą chropowatość powierzchni rzędu $R_a = 1\ \mu m$ uzyskuje się przy toczeniu ostrzem niestępionym tworzyw papierowych celulozowo-fenolowych posuwem $p = 0,1$ mm/obr. oraz tworzyw szkło-epoksydowych posuwem $p = 0,05$ mm/obr przy małej prędkości skrawania $v = 1,2$ m/s. Przy toczeniu tworzyw tkaninowych celulozowo-fenolowych trudno uzyskać chropowatość $R_a < 3\mu m$, a tworzyw szkło-fenolowych $R_a < 2\mu m$. Powyższe uwagi odnoszą się do pracy ostrzem o geometrii $\gamma_o = 0^o$, $\alpha_o = 20^o$ (25° dla tworzyw celulozowych), $\lambda = 0^o$, $\varkappa = 45^o$, $\varepsilon = 123^o$, $r_\varepsilon = 1$ mm. Zwiększenie promienia naroża ostrza r_ε pozwala na uzyskanie mniejszych chropowatości. Wpływ promienia naroża ostrza r_ε na chropowatość zbadano przy toczeniu wzdłużnym prętów prasowanych szkło-epoksydowych (rys. 8.5). Bardzo dobrą gładkość powierzchni $R_a < 0,63\mu m$ uzy-



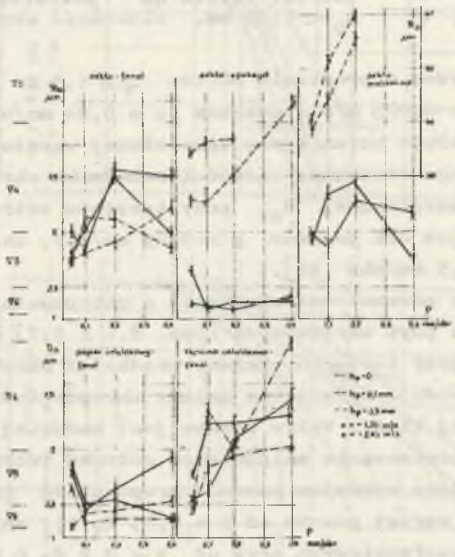
Rys. 8.5. Wpływ promienia naroża ostrza na chropowatość powierzchni przy toczeniu prętów prasowanych szkło-epoksydowych Epolan Se ostrzem z węglików spiekanych H10. Geometria ostrza: $\gamma_o = 5^o$, $\alpha_o = 15^o$, $\lambda = 0^o$, $\varkappa = 45^o$, $\varepsilon = 120^o$. Zużycie ostrza na powierzchni przyłożenia $h_p < 0,02$ mm. Głębokość skrawania $g = 1$ mm

skano przy pracy ostrzem o promieniu naroża $r_\varepsilon \geq 1,5$ mm z bardzo małą prędkością skrawania $v = 0,073$ m/s i posuwem $p = 0,04$ mm/ostrze. Wysoka sprężystość tworzywa wywołuje cofanie się wgniecionej warstwy wierzchniej za ostrzem, w wyniku czego otrzymane wartości wskaźnika chropowatości R_z są niższe od wartości teoretycznej R_{zt} przy toczeniu ostrzem o promieniu naroża $r_\varepsilon = 0,5$ mm już dla posuwów $p \geq 0,25$ mm/obr, zaś przy promieniu $r_\varepsilon = 2$ mm dla $p \geq 0,5$ mm/obr [28].

Zależności między parametrami skrawania a chropowatością powierzchni otworu przy wierceniu płyt warstwowych (rys. 8.6 i 8.7) mają ogólnie podobny charakter jak przy toczeniu. Zmiany prędkości skrawania w zakresie $v = 0,8 - 2,4$ m/s powodują niewielkie zmiany chropowatości nie przekraczające w zasadzie jednej klasy. Wpływ posuwu jest bardziej istotny, przy czym występują tu duże zróżnicowania zależnie od gatunku tworzywa i stanu zużycia ostrza. Na ogół ze wzrostem posuwu chropowatość rośnie; odwrotny wpływ jednak wywiera wzrost posuwu od $p = 0,05$ do 0,1 mm/obr dla tworzyw papierowych celulozowo-fenolowych oraz od $p = 0,2$ do 0,4 mm/obr dla tworzyw szkło-melaminowych i szkło-fenolowych przy pracy ostrzem niestępionym. Bardzo charakterystyczny jest wpływ zużycia ostrza na chropowatość.



Rys. 8.6. Wpływ prędkość skrawania na chropowatość powierzchni obrobionej przy wierceniu płyt warstwowych. Wiertło o średnicy d = 10 mm, materiał ostrza: H03 dla laminatów na nośniku szklanym, SW18 na nośniku celulozowym



Rys. 8.7. Wpływ posuwu na chropowartość powierzchni obrobionej przy wierceniu płyt warstwowych. Wiertło o średnicy d = 10 mm, materiał ostrza:H03 dla laminatów na nośniku szklanym, SW 18 dla laminatów na nośniku celulozowym

Dla tworzyw z żywicą fenolową na ogół praca ostrzem stępionym powoduje uzyskanie mniejszych chropowatości (tzw. efekt zagładzania), zaś dla tworzyw z żywicą epoksydową i melaminową wiertło o stępieniu naroża ostrza h_{pn} = 0,1 mm wywołuje chropowatość o średnio 2 klasy wyższą od wiertła ostrego.

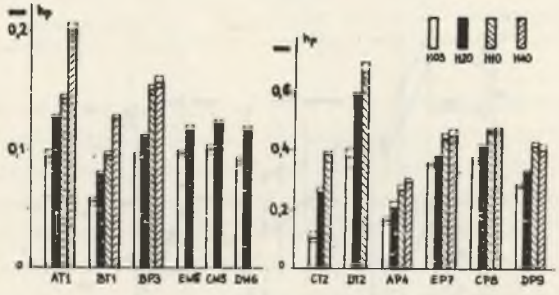
Obserwowany wpływ zużycia ostrza na jakość wyrobu sugeruje dokonania wyboru takiego kryterium zużycia, które uniemożliwiłoby powstanie anomalii obróbkowych.

9. ZALECANE WARUNKI SKRAWANIA

Dla celów praktycznych niezbędne jest określenie zalecanych warunków skrawania przez podanie materiału ostrza, jego geometrii, kryterium zużycia oraz zależności okresu trwałości ostrza od parametrów skrawania i ich granicznych wartości.

9.1. Materiał ostrza

Z rozważań nad procesem zużywania się ostrza wynika, że najbardziej odporne na zużycie są węgliki spiekane grupy H, odznaczające się wysoką twardością i odpornością na ścieranie oraz lepszą przewodnością cieplną od węglików grupy S. Powinny one posiadać jak najmniej fazy wiążącej (kobaltu) i możliwie jak najdrobniejsze ziarna węglików wolframu. Ze spieków krajowych cechom takim odpowiadają węgliki gatunku H03 wykazujące najlepsze własnośoi skrawane (rys. 9.1), zaś ze spieków radzieckich BK3M i BK2 [98].



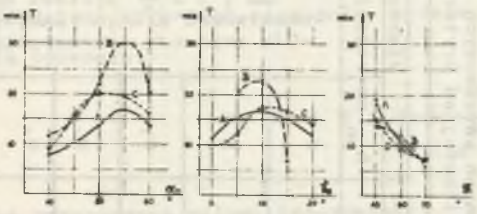
Rys. 9.1. Porównanie zużycia ostrzy z różnych gatunków węglików spiekanych przy toczeniu (T), przecinaniu piłą tarczową (P) i wierceniu (W) tworzyw warstwowych:

A - płyty papierowe celulozowo-fenolowe, B - płyty tkaninowe celulozowo-fenolowe, C - płyty tkaninowe szkło-fenolowe, D - płyty tkaninowe szkło-epoksydowe, E - płyty tkaninowe szkło-melaminowe.

Parametry skrawania:

1 - v = 8,05 m/s, p = 0,09 mm/obr, g = 1,5 mm, t = 15 min,
2 - v = 5,2 m/s, p = 0,09 mm/obr, g = 1 mm, t = 4 min,
3 - v = 49,3 m/s, p_z = 0,048 mm/ostrze, w = 20,5 mm, t = 15,5 min,
4 - v = 30,5 m/s, p_z = 0,079 mm/ostrze, w = 22 mm, t = 16 min,
5 - v = 1,24 m/s, p = 0,2 mm/obr, d = 10 mm, t = 18,5 min,
6 - v = 1,24 m/s, p = 0,2 mm/obr, d = 10 mm, t = 15,8 min,
7 - v = 16,7 m/s, p_z = 0,078 mm/ostrze, w = 19 mm, t = 18 min,
8 - v = 16,3 m/s, p_z = 0,12 mm/ostrze, w = 22 mm, t = 19 min,
9 - v = 19,4 m/s, p_z = 0,066 mm/ostrze, w = 23 mm, t = 13,9 min.

9.2. Geometria ostrza



Rys. 9.2. Wpływ kątów ostrza z węglików spiekanych H03 na trwałość ostrza T przy toczeniu tworzyw warstwowych. A - płyty papierowe celulozowo-fenolowe; v = 8,05 m/s, p = 0,17 mm/obr., g = 2 mm, h_p = 0,13 (α_o, $\varkappa$), 0,17(γ_o)mm B - płyty tkaninowe celulozowo-fenolowe; v = 8,05 m/s, p = 0,17 mm/obr., g = 2 mm, h_p = 0,08 (α_o), 0,1(γ_o), 0,12 ($\varkappa$) mm. C - płyty tkaninowe szkło-fenolowe; v = 3,5 m/s, p = 0,17 mm/obr. g = 1 mm, h_p = 0,1($\varkappa$), 0,12(α_o, γ_o)mm

Optymalna geometria ostrza winna zapewniać prawidłowe warunki tworzenia wióra i dobrą jakość powierzchni obrobionej przy równoczesnym minimalnym zużyciu ostrza. Wpływ kątów ostrza na proces skrawania omówiono w rozdziale 4. Jako korzystne przy skrawaniu tworzyw warstwowych możnaby przyjąć małe wartości kąta natarcia, możliwie duży kąt przyłożenia, zerowy kąt pochylenia krawędzi skrawającej i kąt przystawienia ok. 45°. Przykład wpływu kątów ostrza na jego zużycie przedstawiono na rys. 9.2. Ponieważ wartości kątów, odpowiadających minimum zużycia ostrza, znajdują się w zakresach korzystnych z uwagi na proces tworzenia wióra i jakość powierzchni obrobionej przyjęto je jako zalecane (tabl. 9.1).

9.3. Kryterium zużycia ostrza

Przy skrawaniu tworzyw sztucznych warstwowych przebieg zużycia ostrza wykazuje tylko 2 okresy: wstępnego i normalnego zużycia, brak jest natomiast okresu końcowego przyspieszonego zużycia, gdyż wcześniej następuje destrukcja tworzywa. Z tego względu należy przyjąć technologiczne kryterium zużycia ostrza o wartości zapewniającej uzyskanie dobrej jakości wyrobu. Jako parametr zużycia ustalono wysokość staroia ostrza na powierzchni przyłożenia h_p. Dla wierteł wartość ta określana jest na narożu ostrza h_{pn}. Dla pił tarczowych wartość h_{pn} jest średnią arytmetyczną zużycia obu naroży ostrza, zaś h_{ps} określana jest w środkowym odcinku krawędzi skrawającej; jako parametr kryterialny przyjęto, zależnie od gatunku tworzywa, wartość h_{pn} względnie $h_{pn} + h_{ps}$. Zalecane wartości kryterium zużycia ostrzy zestawiono w tablicy 9.2, podając rodzaj anomalii obróbkowych występujących w przypadku pracy ostrzem stępionym powyżej kryterium.

Tablica 9.1

Zalecana geometria ostrzy przy skrawaniu krajowych tworzyw sztucznych warstwowych

Materiał obrabiany	Noże tokarskie							Piły tarczowe						Wiertła				
	Mat. ostrza	γ_o°	α_o°	λ°	$\varkappa^\circ$	ε°	r_ε mm	Mat. ostrza	γ_o°	α_o°	λ°	$\varkappa^\circ$	ε°	Mat. ostrza	γ_o°	α_o°	$2\varkappa^\circ$	ω°
płyty: papierowe i tkaninowe celulozowo-fenolowe	H03	10	20	0	45	123	1	H03	5	20	0	90	87	SW7M SW18	10	22	120	30
płyty tkaninowe: szkło-fenolowe, szkło-epoksydowe i szkło-melaminowe	H03	10	25	0	45	123	1	H03	5	20	0	90	87	H03	10	22	120	30

Tablica 9.2

Zalecane wartości kryterium stępienia ostrzy przy skrawaniu krajowych tworzyw sztucznych warstwowych oraz rodzaje anomalii obróbkowych powstających przy pracy narzędziem stępionym o wartości większej od kryterium

Lp.	Materiał obrabiany	Sposób obróbki					
		toczenie		przecinanie piłą tarczową		wiercenie	
		h_p mm	rodzaj anomalii	h_p mm	rodzaj anomalii	h_{pn} mm	rodzaj anomalii
1	płyty papierowe celulozowo-fenolowe	0,3 0,5	odłupania przypalenia	h_{pn} 0,3	odłupania przy krawędzi	0,3	Złuszczenia krawędzi wyjściowej otworu przekraczają wartość $\Delta r = 1$ mm
2	płyty tkaninowe celulozowo-fenolowe	0,2 0,3	zwłóknienia (wystrzępienia) przypalenia	h_{pn} 0,3	zwłóknienia (wystrzępienia) przy krawędzi	0,3	
3	płyty tkaninowe szkło-fenolowe	0,2	zwłóknienia (wystrzępienia)	$h_{pn}+h_{ps}$ 0,5	rozwarstwienia	0,1	
4	płyty tkaninowe szkło-epoksydowe	0,2	zwłóknienia (wystrzępienia)	$h_{pn}+h_{ps}$ 0,5	rozwarstwienia	0,1	
5	płyty tkaninowe szkło-melaminowe	-	-	h_{pn} 0,5	przypalenia na powierzchni obrobionej	0,1	

9.4. Okres trwałości ostrza

Zależność okresu trwałości ostrza od parametrów skrawania, ustalona dla przyjętego kryterium stępienia, wyraża się ogólnie stosowanymi wzorami:

dla toczenia:

$$T = \frac{C_T}{v^{s} \cdot g^{e_T} \cdot p^{u_T}}, \tag{9.1}$$

dla przecinania piłami tarczowymi:

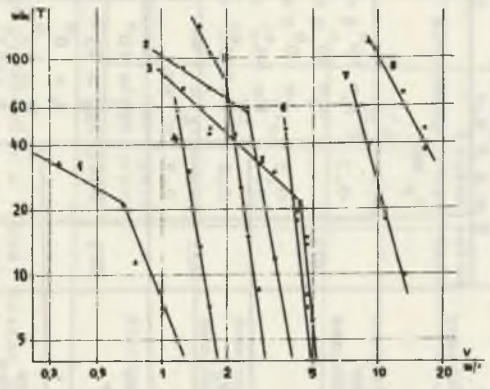
$$T = \frac{C_T}{v^{s} \cdot p_z^{u_T} \cdot w^{e_T}}, \tag{9.2}$$

dla wiercenia:

$$T = \frac{C_T \cdot d^{a_T}}{v^{s} \cdot p^{u_T}}. \tag{9.3}$$

Wartości stałych i wykładników do tych wzorów zestawiono w tablicach 9.3 do 9.5.

W układzie podwójnie logarytmicznym zależności okresu trwałości ostrza od poszczególnych parametrów skrawania przedstawiają linie proste. Dla toczenia niektórych tworzyw warstwowych na nośniku szklanym występuje charakterystyczne załamanie prostych (rys. 9.3), związane z jakościową zmia-



Rys. 9.3. Wpływ prędkości skrawania na okres trwałości ostrza przy toczeniu: 1 - laminat tkaninowy szkło kwarcowe - żywica fenolowo-silikonowa ТЭ-9ф [98], 2 - płyty szkło-epoksydowe, 3 - płyty szkło-fenolowe, 4 - laminat szkło-epoksydowo-fenolowy Эф-32-301 [98], 5 - laminat zwijany szkło-fenolowy АГ-4С [98], 6 - laminat zwijany szkło-epoksydowy 33-18С [98], 7 - płyty papierowe celulozowo-fenolowe, 8 - płyty tkaninowe celulozowo-fenolowe. Warunki obróbki: 1,4,5,6 - ostrze ВК3М, h_p = 0,17 mm, g = 1,5 mm, p = 0,21 mm/obr., 2,3,7,8 - ostrze Н03, h_p = 0,2 (2,3,8), 0,3 (7) mm, g = = 1,5 mm, p = 0,17 mm/obr.

Wartości stałej C_T i wykładników s, e_T i u_T do wzoru 9.1 na okres trwałości ostrza przy toczeniu:

$$T = \frac{C_T}{v^{s} \cdot g^{e_T} \cdot p^{u_T}}$$

T - okres trwałości ostrza (min), v - prędkość skrawania (m/s), g - głębokość skrawania (mm), p - posuw (mm/obr).

Lp.	Materiał obrabiany	Ostrze: materiał	Ostrze: zużycie h_p mm	Ostrze: geometria	Zakres parametrów: v m/s	Zakres parametrów: g mm	Zakres parametrów: p mm/obr	C_T	s	e_T	u_T
1	płyty papierowe celulozowo-fenolowe	H03	0,3	γ_o= 10°, α_o= 20°, λ= 0°, $\varkappa$= 45°, ε=123°, r_ε = 1 mm	7,5 - -13,3	1 - - 3	0,1 - -0,6	$5,84.10^4$	3,55 ±0,22	0	0,31 ±0,07
			0,5					$1,55 . 10^5$	3,55 ±0,29	0	0,41 ±0,08
2	płyty tkaninowe celulozowo-fenolowe	H03	0,2		9,2 - -16,6	1 - - 3	0,1 - -0,6	$5,4 . 10^3$	1,89 ±0,45	0	0,29 ±0,16
			0,3					$1,04 . 10^5$	2,65 ±0,39	0	0,35 ±0,14
3	płyty tkaninowe szkło-fenolowe	H03	0,2	γ_o = 10°, α_o = 25°, λ = 0°, $\varkappa$ = 45°, ε =123°, r_ε = 1 mm	1-4,37	1 - - 3	0,1 - -0,5	32,5	0,94 ±0,11	0,47 ±0,11	0,66 ±0,11
					4,37-5			$4,53 . 10^6$	8,98 ±1,34	0,42 ±0,19	0,63 ±0,18
4	płyty tkaninowe szkło-epoksydowe	H03	0,2		1,25- -2,5	1 - -3,5	0,1 - -0,42	10,9	0,77 ±0,25	1,8 ±0,22	1,71 ±0,14
					-2,5- -3,3			551	5,15 ±0,82	1,48 ±0,34	1,68 ±0,24

Wartości przedziałów ufności wykładników obliczono dla poziomu ufności 0,95.

Wartości stałej C_T i wykładników s, e_T, u_T do wzoru 9.2 na trwałość ostrza przy przecinaniu płyt piłami tarczowymi o średnicy D = 250 - 400 mm

$$T = \frac{C_T}{v^{s} \cdot w^{e_T} \cdot p_z^{u_T}}$$

T - okres trwałości ostrza (min), v - prędkość skrawania (m/s), w - grubość płyt (mm), p_z - posuw na ostrze (mm/ostrze).

Lp.	Materiał obrabiany	Ostrze: materiał	Ostrze: zużycie h_p mm	Ostrze: geometria	Zakres parametrów: v m/s	Zakres parametrów: p_z mm/ostrze	Zakres parametrów: w mm	C_T	s	e_T	u_T
1.	płyty papierowe celulozowo-fenolowe	H03	h_{pn} 0,3	$\gamma_o = 5^o$ $\alpha_o = 20^o$ $\lambda = 0^o$ $\varkappa = 90^o$ $\varepsilon = 87^o$	20 - 50	0,03 -0,12	8 - -40	$1,65.10^6$	2,07 ±0,65	1,67 ±0,39	0,75 ±0,34
							40 - -100	$1,66.10^5$	2,07 ±0,65	1,05	0,75 ±0,34
2.	płyty tkaninowe celulozowo-fenolowe	H03	h_{pn} 0,3		20 - 50	0,03 -0,12	8 - -40	$7,94.10^6$	2,07 ±0,65	1,67 ±0,39	0,75 ±0,34
							40 - -100	$7,97.10^5$	2,07 ±0,65	1,05	0,75 ±0,34
3.	płyty tkaninowe szkło-fenolowe	H03	h_{pn}+ h_{ps} 0,5	jw.	10 - 25	0,03 -0,12	8 - -100	$3,36.10^6$	2,94 ±0,43	1,83 ±0,24	1,28 ±0,21
4.	płyty tkaninowe szkło-epoksydowe	H03	h_{pn}+ h_{ps} 0,5	jw.	15 - 30	0,03 -0,12	8 - -100	$6,22.10^7$	3,76 ±0,89	2,23 ±0,56	1,81 ±0,65
5.	płyty tkaninowe szkło-melaminowe	H03	h_{pn} 0,5	jw.	10 - 20	0,03 -0,12	8 - -100	$2,26.10^8$	4,61 ±0,71	2,28 ±0,32	1,64 ±0,12

Wartości przedziałów ufności wykładników obliczono dla poziomu ufności 0,9.

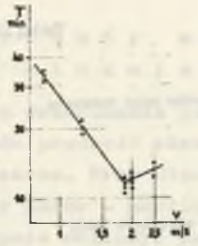
Tablica 9.5

Wartości stałej C_T i wykładników potęgowych s, a_T,, u_T do wzoru 9.3 na okres trwałości ostrza przy wiercenia

$$T = \frac{C_T \cdot d^{a_T}}{v^{\frac{1}{s}} \cdot p^{u_T}}$$

T - okres trwałości ostrza (min), d - średnica wiertła (mm), v - prędkość skrawania (m/s), p - posuw (mm/obr)

Lp.	Materiał obrabiany	Ostrze			Zakres parametrów			C_T	s	a_T	u_T	Poz. lit.
		materiał	zużycie h_p mm	geometria	d mm	v m/s	p mm/obr.					
1.	płyty papierowe celulozowo-fenolowe	SW7M SW18	0,3	$\gamma_o = 10^o$ $\alpha_o = 22^o$ $2\varkappa = 120^o$ $\omega = 30^o$	5-20	0,5--1	0,05--0,3	1300	1,6	0,3	0,26	
2.	płyty tkaninowe celulozowo-fenolowe	SW7M SW18	0,3		5-20	0,5--1	0,05--0,3	2760	1,6	0,3	0,26	
3.	płyty tkaninowe szkło-fenolowe	H03	0,1	jw.	5-20	0,5--1,75	0,05--0,2	1995	1,42	0,33	0,28	
					10	1,75--2,43	0,2	9,63	-0,345	-	-	[7]
4.	płyty tkaninowe szkło-epoksydowe	H03	0,1	jw.	5-20	0,5--1,25	0,05--0,2	597	1,14	0,36	0,32	
5.	płyty tkaninowe szkło-melaminowe	H03	0,1	jw.	5-20	0,5--1,25	0,05--0,2	1285	1,24	0,32	0,3	



Rys. 9.4. Wpływ prędkości skrawania na okres trwałości ostrza z węglików spiekanych H03 przy wierceniu płyt szkło-fenolowych z posuwem p= = 0,2 mm/obr., wiertłem o średnicy d = 10 mm [7]

nę warunków tworzenia wióra i tarcia na powierzchni przyłożenia ostrza. Dla wiercenia płyt szkło-fenolowych uzyskał M. Błaszczak [7] minimum funkcji T = f(v) przy prędkości skrawania v = 1,75 m/s (rys. 9.4). Wynikający z tego wzrost okresu trwałości ostrza w miarę wzrostu prędkości skrawania w zakresie v = 1,75 - 2,43 m/s, zachodzący jednocześnie ze zmniejszaniem się momentu skrawania, można tłumaczyć postępującą destrukcją termiczną tworzywa wewnątrz otworu i zmianą warunków tarcia wiertła. Rekomendacja tego zakresu prędkości skrawania do praktycznego stosowania wymaga jednak uprzedniego przeprowadzenia dodatkowych badań nad jakością uzyskiwanych otworów.

9.5. Dobór parametrów skrawania

9.5.1. Dobór warunków skrawania dla toczenia

Przy doborze warunków skrawania należy kierować się nie tylko zapewnieniem zalecanego okresu trwałości ostrza narzędzia, lecz przede wszystkim należy ograniczyć się do takich wartości parametrów skrawania (głównie posuwu i prędkości skrawania), które wykluczają powstawania niepożądanych anomalii obróbkowych.

Dla toczenia największy wpływ na okres trwałości ostrza wywiera prędkość skrawania, następnie posuw, a najmniejszy głębokość skrawania. Jedynym wyjątkiem jest toczenie tworzyw szkło-epoksydowych z prędkością $v < 2,5$ m/s, gdzie kolejność wpływu parametrów skrawania na okres trwałości ostrza jest odwrotna. Pomijając ten szczególny przypadek, chcąc uzyskać względnie wysoką wydajność przy niskim koszcie obróbki, należy dobierać parametry skrawania w kolejności: 1 - głębokość skrawania - możliwie dużą (w granicach naddatku na obróbkę), 2 - posuw możliwie duży (ale nie przekraczający wartości granicznych z uwagi na jakość wyrobu), 3 - prędkość skrawania dla określonego zalecanego okresu trwałości ostrza. Przy doborze okresowej prędkości skrawania wykorzystuje się transformację wzoru (9.1) w postaci:

$$v = \frac{C_v}{T^{\frac{1}{m}} \cdot g^{e_v} \cdot p^{u_v}}. \qquad (9.4)$$

Wartości stałej C_v i wykładników m, e_v, u_v do tego wzoru zestawiono w tablicy 9.6.

Tablica 9,6

Wartości stałej C_v i wykładników m, e_v i u_v do wzoru 9.4 na prędkość skrawania przy toczeniu

$$v = \frac{C_v}{T^m \cdot s^{e_v} \cdot p^{u_v}}$$

v - prędkość skrawania (m/s), T - okres trwałości ostrza (min), s - głębokość skrawania (mm), p - posuw (mm/obr).

Lp.	Materiał obrabiany	Ostrze: materiał	Ostrze: zużycie h_p mm	Ostrze: geometria $\gamma_o^\circ - \alpha_o^\circ - \lambda^\circ$ $\varkappa^\circ - b^\circ - r_\varepsilon$ mm	Zakres parametrów: v m/s	s mm	p mm/obr	C_v	m	e_v	u_v	Poz. lit.
1.	płyty papierowe celulozowo-fenolowe	HOJ	0,3	10 - 20-0 45 -123-1	7,5- -13,3	1 - - 3	0,1 - -0,6	21,7	0,28	0	0,09	
			0,5					27,9	0,28	0	0,12	
2.	laminat papierowy celulozowo-fenolowy getinaks	HK8	-	10-20-0 45-123-3	1,2- 2,5	1 - - 3	0,2- -0,6	393	1,13	0,9	0,9	[69]
					2,5- -8,3			94	0,8	0,55	0,55	
3.	laminat papierowy celulozowo-fenolowy getinaks III	HK8	0,4	10-20-0 -45-120-3	3 - -10	1 - -5	0,16- -1	50	0,8	0,15	0,4	[105]
4.	płyty tkaninowe celulozowo-fenolowe	HOJ	0,2	10-20-0 45-123-1	9,2- -16,6	1 - -3	0,1 -0,6	95,1	0,53	0	0,15	
			0,3					77	0,38	0	0,13	
5.	laminat tkaninowy celulozowo-fenolowy tekstolit XT	HK6	-	8-20-0 45-120-4	-	1 - - 3	0,1 - -0,5	42	0,56	0,7	0,1	[105]
		P18	-	10-20-0 45-120-4				18,3	0,46	0,64	0,1	
		HK8	-	10-20-0 45-90-1	-	0,2- - 1	0,1- -0,3	44,2	1,02	0,55	0,44	
6.	płyty tkaninowe szkło - fenolowe	HOJ	0,2	10-25-0 45-123-1	1 - -4,37	1 - - 3	0,1 - -0,5	40	1,06	0,5	0,7	
					4,37- - 5			5,4	0,11	0,05	0,07	
7.	laminat tkaninowy szkło-fenolowy CT	HK2	0,6	5-25-0 45-120-2	3,33- - 5	0,5- -1	0,1- -0,21	7,93	0,18	0,02	0,09	[99]
						1-3	0,21- -0,5	3,11	0,18	0,09	0,66	
8.	laminat tkaninowy szkło-fenolowy ϕH	HK2	0,6	10-10-0 45-120-2	2,5 - -4,3	1-4	0,1- -0,5	3,77	0,11	0,19	0,42	[99]
9.	laminat tkaninowy szkło-fenolowo-silikonowy CK-9 ϕ	HK2	0,6	0-20-0 45-120-2	1,67- -2,5	1-4	0,1- -0,4	3,48	0,23	0,22	0,29	[99]
10.	płyty tkaninowe szkło-epoksydowe	HOJ	0,2	10-25-0 45-123-1	1,25- -2,5	1 - -3,5	0,1- -0,42	22,3	1,3	2,34	2,22	
					2,5- -3,3			3,32	0,19	0,29	0,33	
11.	laminat tkaninowy zwijany szkło-epoksydowy 27-6JC	HK2	0,6	5-25-0 45-120-2	3,33- - 5	0,5- - 2	0.1- -0,2	7,27	0,35	0,32	0,46	[99]
						1-3	0,21- -0,4	3,1	0,35	0,32	1	

9.5.2. Dobór warunków skrawania dla przecinania

Dla przecinania piłami tarczowymi największy wpływ na trwałość ostrza posiada prędkość skrawania, następnie grubość płyty, a najmniejszy posuw na ostrze. Przy cięciu grubość płyty jest narzucona z góry, dobierać więc należy posuw - możliwie jak największy dopuszczalny (ok. 0,1 mm/ostrze), a następnie obliczyć prędkość skrawania dla zalecanego okresu trwałości ostrza wg wzoru:

$$v = \frac{C_v}{T^m \cdot w^{e_v} \cdot p_z^{u_v}}. \qquad (9.5)$$

Wartości stałej C_v i wykładników m, e_v, u_v do powyższego wzoru zestawiono w tablicy 9.7.

9.5.3. Dobór warunków skrawania dla wiercenia

Dla wiercenia największy wpływ na trwałość ostrza wywiera prędkość skrawania, zaś wpływ posuwu i średnicy wiertła jest prawie równy. Przy wierceniu średnica jest najczęściej z góry określona, dobiera się więc posuw możliwie jak największy dopuszczalny - i oblicza prędkość skrawania dla zalecanego okresu trwałości ostrza wg wzoru:

$$v = \frac{C_v \cdot d^{a_v}}{T^m \cdot p^{u_v}}. \qquad (9.6)$$

Wartości stałej C_v i wykładników a_v, m, u_v do tego wzoru podane są w tablicy 9.8.

W tablicach 9-6 do 9-8 zestawiono dla porównania dane odnoszące się do tworzyw radzieckich o podobnych komponentach do krajowych. Zalecana geometria ostrzy wykazuje dużą zgodność, również zalecane zakresy posuwów i głębokości skrawania są podobne; wyraźniejsze różnice występują natomiast w zalecanych prędkościach skrawania. Zupełnie jednak różnią się stałe i wykładniki do wzorów na prędkość skrawania, świadcząc o braku podobieństwa w zależnościach między parametrami skrawania a okresem trwałości ostrza. Wynika to zarówno z innych własności skrawnych radzieckich materiałów narzędziowych i przyjętych nieraz innych wartości kryterium stępienia ostrza, jak też innej skrawalności nominalnie podobnych tworzyw. Porównanie to wskazuje wyraźnie na niecelowość korzystania z zagranicznych źródeł przy doborze warunków skrawania dla tworzyw krajowych.

Tablica 9.7

Wartości stałej C_v i wykładników potęgowych m, e_v, u_v do wzoru 9-5 na prędkość skrawania przy przecinaniu płyt piłami tarczowymi o średnicy D = 250-400 mm

$$v = \frac{C_T}{T^m \cdot w^{e_v} \cdot p_z^{u_v}}$$

v - prędkość skrawania (m/s), T - okres trwałości ostrza (min), w - grubość płyty (mm), p_z - posuw (mm/ostrze)

Lp.	Materiał obrabiany	Ostrze: materiał	Ostrze: zużycie h_p mm	Ostrze: geometria	Zakres parametrów: v m/s	Zakres parametrów: p_z mm/ostrze	Zakres parametrów: w mm	C_v	m	e_v	u_v	Poz. lit.
1.	płyty papierowe celulozowo-fenolowe	H03	h_{pn} 0,3	γ_o = 5° α_o = 20° λ = 0° $\varkappa$ = 90° ε = 87°	20 - -50	0,03- -0,12	8-40	1000	0,48	0,81	0,36	
							40-100	331	0,48	0,51	0,36	
2.	laminat papierowy celulozowo-fenolowy getinaks	BK4	-	γ_o = 3° α_o = 18° λ = 15° $\varkappa$ = 86° ε =91,5°	2,5- -8,3	0,05- 1	5-30	$4,15.10^5$	1,8	0,68	0,47	[105]
					8,3- -15			165	0,5	0,19	0,13	
3.	płyty tkaninowe celulozowo-fenolowe	H03	h_{pn} 0,3	γ_o = 5° α_o = 20° λ = 0° $\varkappa$ = 90° ε = 87°	20- -50	0,03- -0,12	3-40	2106	0,48	0,81	0,36	
							40-100	695	0,48	0,51	0,36	
4.	płyty tkaninowe szkło-fenolowe	H03	h_{pn} + h_{ps} 0,5	jw.	10- -25	0,03- -0,12	8-100	163	0,34	0,62	0,43	
5.	płyty tkaninowe szkło-fenolowe Rezotekst S	H20	h_{pn} 0,5	γ_o = 5° α_o = 20° λ = 0° $\varkappa$ = 90° ε = 88°	6- -40	0,02- -0,12	10-25	29,3	0,16	0,4	0,25	
6.	płyty tkaninowe szkło-epoksydowe	H03	h_{pn} + h_{ps} 0,5	γ_o = 5° α_o = 20° λ = 0° $\varkappa$ = 90° ε = 87°	15- -30	0,03- -0,12	8-100	117	0,27	0,6	0,48	
7.	płyty tkaninowe szkło-melaminowe	H03	h_{pn} 0,5	jw.	10- -20	0,03- -0,12	8-100	64,3	0,22	0,5	0,36	

UWAGA: Dla poz. 2 średnica piły tarczowej D = 145 - 300 mm, szerokość B = 6 - 8 mm.

Tablica 9.8

Wartości stałej C_v i wykładników potęgowych a_v, m, u_v do wzoru 9.6 na prędkość skrawania przy wierceniu

$$v = \frac{C_v \cdot d^{a_v}}{T^{m} \cdot p^{u_v}}$$

v – prędkość skrawania (m/s), d – średnica wiertła (mm), T – okres trwałości ostrza (min), p – posuw (mm/obr)

Lp.	Materiał obrabiany	Ostrze: materiał	Ostrze: zużycie h_p mm	Ostrze: geometria	Zakres parametrów: d mm	Zakres parametrów: v m/s	Zakres parametrów: p mm/obr	C_v	m	a_v	u_v	Poz. lit.
1.	płyty papierowe celulozowo-fenolowe	SW7M SW18	0,3	$\gamma_o = 10^o$ $\alpha_o = 22^o$ $2\varkappa = 120^o$ $\omega = 30^o$	5–20	0,5–1	0,05–0,3	1,42	0,62	0,186	0,161	
2.	laminat papierowy celulozowo-fenolowy getinaks	P18	–	$\alpha = 20^o$ $2\varkappa = 90^o$	5–20	0,5–0,8	0,1–0,4	0,5	0,34	0,3	0,1	[119]
		P18	0,15	$\alpha_o = 25^o$ $2\varkappa = 90^o$	–	0,6–0,8	0,1–0,6	1,13	1,15	1,26	0,46	[105]
		BK8				1,3–1,7	0,1–0,6	57	1,2	0,78	0,43	
3.	płyty tkaninowe celulozowo-fenolowe	SW7M SW18	0,3	$\gamma_o = 10^o$ $\alpha_o = 22^o$ $2\varkappa = 120^o$ $\omega = 30^o$	5–20	0,5–1	0,05–0,3	2,32	0,62	0,186	0,161	
4.	laminat papierowy celulozowo-fenolowy tekstolit[x]	P18	–	$\alpha_o = 16^o$ $2\varkappa = 70^o$	5–20	0,67–0,83	0,1–0,4	0,8	0,45	0,3	0,27	[119]
5.	płyty tkaninowe szkło-fenolowe	HO3	0,1	$\gamma_o = 10^o$ $\alpha_o = 22^o$ $2\varkappa = 120^o$	5–20	0,5–1,75	0,05–0,2	3,35	0,7	0,23	0,2	
6.	laminat tkaninowy szkło-fenolowy CT	BK8	0,15	$\gamma_o = 10^o$ $\alpha_o = 20^o$ $2\varkappa = 90^o$	–	0,5–1,2	0,1–0,6	3,03	0,9	0,9	0,37	[105]
		P18			5–25	0,25–0,83	0,1–0,6	0,23	0,66	0,8	0,34	
7.	laminat tkaninowy zwijany szkło-fenolowy AG-4C	BK8	0,25	$\gamma_o = 10^o$ $\alpha_o = 20^o$ $2\varkappa = 70^o$	5–20	0,5–1,3	0,06–0,2	2,2	0,8	0,73	0,43	[15]
		P18	0,15	$\gamma_o = 12^o$ $\alpha_o = 20^o$ $2\varkappa = 70^o$	5–20	0,15–0,8	0,08–0,25	0,23	0,56	0,63	0,32	
8.	płyty tkaninowe szkło-epoksydowe	HO3	0,1	$\gamma_o = 10^o$ $\alpha_o = 20^o$ $2\varkappa = 120^o$	5–20	0,5–1,25	0,05–0,2	4,62	0,88	0,32	0,28	
9.	laminat tkaninowy szkło-epoksydowy CT3Φ	BK8	0,15	$\gamma_o = 15^o$ $\alpha_o = 30^o$ $2\varkappa = 90^o$	5–20	0,5–1,33	0,08–0,25	1,8	1,16	1,24	0,98	[15]
10.	płyty tkaninowe szkło-melaminowe	HO3	0,1	$\gamma_o = 10^o$ $\alpha_o = 20^o$ $2\varkappa = 120^o$	5–20	0,5–1,25	0,05–0,2	5,5	0,81	0,26	0,24	

x) UWAGA: Wg Siemki i in. [105] ważne są wzory podane przez nich dla getinaksu poz. 2, przy zastosowaniu mnożnika 1,3 dla ostrzy ze stali szybkotnącej P18 i mnożnika 1,2 dla ostrzy z węglików spiekanych BK8.

10. SKRAWALNOŚĆ TWORZYW SZTUCZNYCH WARSTWOWYCH

Porównanie kilku materiałów pod względem ich skrawalności polega na porównaniu konkretnych wskaźników skrawalności, określonych w identycznych warunkach obróbki. Trzeba jednak zauważyć, że dla praktyki bardziej celowe może być porównanie wskaźników skrawalności różnych tworzyw ustalonych nie w jednakowych warunkach, lecz dla wartości kryterialnych parametrów (np. zużycia ostrza h_p), odmiennych dla rozmaitych tworzyw. Oceniając skrawalność materiałów w aspekcie różnych wskaźników wygodnie posługiwać się wartościami względnymi. Przyjmując jedno z tworzyw jako materiał odniesienia "0", wartości względnych wskaźników skrawalności innych tworzyw "i" określa się ze wzorów:

dla wskaźnika okresowej prędkości skrawania:

$$k_{v_{Ti}} = \frac{v_{Ti}}{v_{To}}, \tag{10.1}$$

dla wskaźnika oporów skrawania:

$$k_{Pi} = \frac{P_o}{P_i}, \tag{10.2}$$

$$k_{Ni} = \frac{N_o}{N_i}, \tag{10.3}$$

$$k_{Mi} = \frac{M_o}{M_i}, \tag{10.4}$$

dla wskaźnika chropowatości powierzchni:

$$k_{Ri} = \frac{R_o}{R_i}, \tag{10.5}$$

dla wskaźnika temperatury skrawania:

$$k_{\theta i} = \frac{\theta_o}{\theta_i}. \tag{10.6}$$

Jeżeli względny wskaźnik skrawalności $k > 1$, to materiał ten ma lepszą skrawalność niż materiał odniesienia, zaś jeśli $k < 1$, to ma gorszą. Jako materiał odniesienia dla badanych płyt laminatowych krajowej produkcji przyjęto tworzywo szkło-fenolowe.

Tablica 10.1

Średnie wartości wskaźników skrawalności krajowych tworzyw sztucznych warstwowych

Sposób obróbki	Wskaźnik skrawalności	Rodzaj obrabianej płyty					Parametry obróbki
		papierowe		tkaninowe			
		celulozowo-fenolowe			szkło-epoksydowe	szkło-melaminowe	
Przecinanie piłą tarczową D = 350 mm ostrze HOJ	V_{240} m/s	17	34	10,5	13,1	8,1	w = 30 mm p_z = 0,1 mm/ostrze h_{pn} = 0,5 mm
	V_{240} m/s	10,5	22	8,3	11,0	8,1	w = 30 mm p_z = 0,1 mm/ostrze h_p = kryterium (wg tabl.9.2)
	N kW	0,55	0,80	0,60	0,83	0,48	v = 10,5 m/s w = 23 mm p_z = 0,054 mm/ostrze h_p = 0,1 mm, z = 78
Wiercenie ostrze HOJ a) SW 18	V_{20} m/s	1,38 b 0,48 ab	4,18 b 1,1 ab	1,17 -	1,3 -	1,57 -	p = 0,1mm/obr D = 10 mm h_{pn} = 0,1 mm b) h_{pn} = 0,3 mm
	P_z N	234 ab	1491 ab	140	217	118	v = 0,9 m/s p = 0,1 mm/obr D = 10 mm h_{pn} = 0,1 mm b) h_{pn} = 0,3 mm c) h_p = 0
	M Nm	0,38 ab	1,49 ab	0,14	0,22	0,12	
	Ra µm	1,42 ab	4,16 ab	3,90	6,38	13,3	
	Ra µm	1,98 ac	2,86 ac	4,46 c	1,92 c	9,4 c	
	ϑ K	-	-	430	445	-	v = 1,25 m/s D = 10 mm p = 0,2 mm/obr
Toczenie ostrzą HOJ	V_{60} m/s	6,5	13,5	1,57	2,3	-	p = 0,17 mm/obr g = 1,5 mm h_p = 0,2 mm
	V_{15} m/s	9,17	24,0	4,58	3,67	-	
	P_z N	120 a	48 b	84 c	160 c	-	a) v = 11,7 m/s b) v = 17 m/s v = 2,8 m/s h_p = 0,5 mm c) h_p = 0,2 mm p = 0,2 mm/obr g = 2 mm
	ϑ K	-	307	391	576	-	v = 2,5 m/s g = 1,5 mm p = 0,21 mm/obr h_p = 0,07 mm l = 0,75 mm d) h_p = 0,11 mm d) l = 2,4 mm
					rury tkaninowe szkło-epoksydowe 511 d	rury tkaninowe szkło-silikonowe 480 d	

Porównanie różnych wskaźników skrawalności krajowych laminatów, zestawionych dla wartości bezwzględnych w tablicy 10.1 i względnych na rysunku 10.1, pozwala na wyciągnięcie ciekawych wniosków. Najlepszą skrawalność z uwagi na wskaźnik okresowej prędkości skrawania k_{vT} wykazują - niezależnie od rodzaju obróbki - tworzywa fenolowe z wypełniaczem celulozowym, szczególnie z nośnikiem w postaci tkaniny. W przeciwieństwie do nich, tworzywa na nośniku szklanym mają gorszą skrawalność, przy czym wpływ żywicy jest przy każdym sposobie obróbki inny. Porównując trzy gatunki laminatów szklanych z żywicami: fenolową (F), epoksydową (E) i melaminową (M) kolejność w miarę malejących wskaźników skrawalności k_{vT} jest następująca:

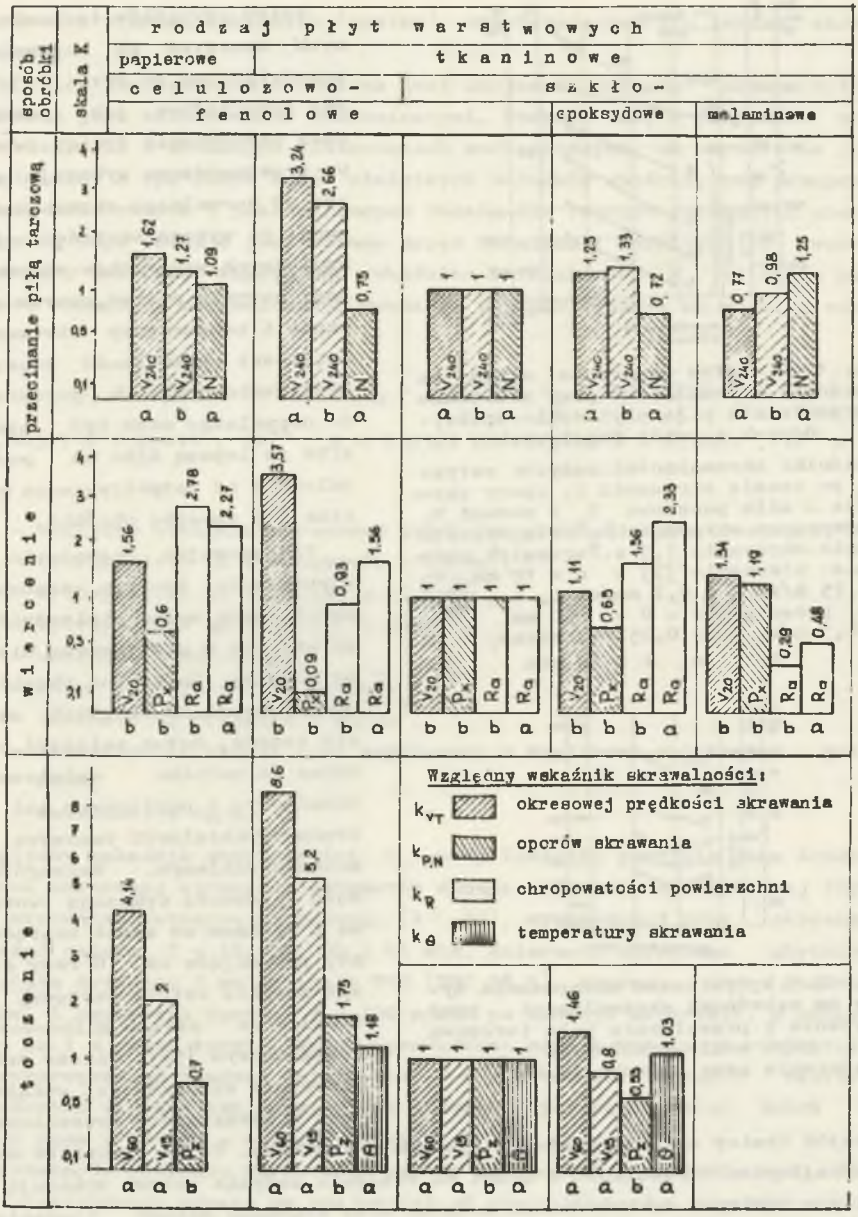
- przy przecinaniu piłą tarczową $E > F > M$,
- przy wierceniu $M > E > F$,
- przy toczeniu - dla T = 60 min $E > F$,
  i dla T = 15 min $F > E$.

Całkiem odmiennie kształtują się zależności przy rozpatrywaniu względnego wskaźnika oporów skrawania. Dla tworzyw na nośniku szklanym niezależnie od sposobu obróbki kolejność jest stała: $M > F > E$, zaś dla tworzyw na nośniku celulozowym sposób obróbki ma znaczenie decydujące. Odnosi się to szczególnie do tworzywa tkaninowego celulozowo-fenolowego, które przy wierceniu wykazuje zdecydowanie najniższą wartość wskaźnika k_p ze wszystkich porównywanych materiałów, zaś przy toczeniu najwyższą.

Pod względem wskaźnika chropowatości powierzchni k_R najlepszą skrawalnością przy wierceniu odznaczają się tworzywa papierowe celulozowo-fenolowe i tkaninowe szkło-epoksydowe, najgorszą zaś szkło-melaminowe.

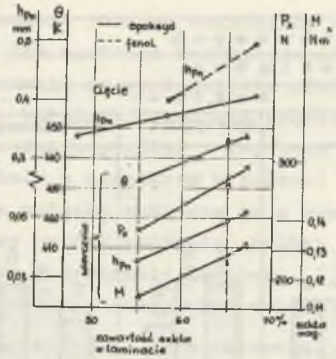
Oceniając łącznie zestawione wskaźniki skrawalności przy trzech zbadanych sposobach obróbki (np. metodą punktowania kolejnych miejsc) można stwierdzić, że najlepszą skrawalnością odznaczają się tworzywa celulozowo-fenolowe, pośrednią szkło-melaminowe i szkło-epoksydowe, najgorszą zaś szkło-fenolowe. Rozpatrując korelację pomiędzy różnymi wskaźnikami skrawalności obserwuje się, że tworzywa mające wysokie względne wskaźniki okresowej prędkości skrawania mają niskie względne wskaźniki oporów skrawania i na odwrót. Jest to wręcz przeciwnie niż w przypadku skrawalności żeliw i stali. Wytłumaczeniem tego faktu może być tylko przebieg procesu tworzenia wióra i ścierne działanie nośnika na ostrze narzędzia; przy większych oporach skrawania ma miejsce oddzielanie wióra raczej związanego, przy niższych zaś oporach zwykle wpierw ulega rozkruszeniu żywica, dopuszczając do większego kontaktu sprężystego nośnika (głównie szklanego) z ostrzem.

Wpływ ilościowy jednego z czynników konstytucyjnych tworzywa na jego skrawalność pokazano przykładowo na rys. 10.2. Wraz ze wzrostem zawartości włókna szklanego skrawalność się pogarsza, gdyż rosną wartości bezwzględnych wskaźników skrawalności: zużycia ostrza, oporów skrawania i temperatury skrawania.



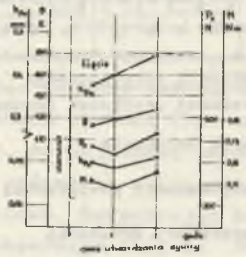
Rys. 10.1. Porównanie względnych wskaźników skrawalności krajowych tworzyw sztucznych warstwowych obliczonych względem tworzywa szkło-fenolowego

a - wskaźniki ustalone w jednakowych warunkach, b - wskaźniki ustalone dla wysokości starcia na powierzchni przyłożenia h_p równej kryterium zużycia. Parametry obróbki przy jakich określano wskaźniki wg tablicy 10.1



Rys. 10.2. Wpływ zawartości szkła na wskaźniki skrawalności przy wierceniu i przecinaniu piłą płyt szkło-epoksydowych i szkło-fenolowych

Wskaźniki skrawalności: zużycie ostrza h_{Pn} po czasie skrawania t, opory skrawania - siła poosiowa P_x i moment M, temperatura skrawania Θ_+ osiągnięta po czasie skrawania 1,3 s. Parametry skrawania: wiercenie [7] - d = 10 mm, v = = 1,25 m/s, p = 0,2 mm/obr., t = 12,9 min, przecinanie - D = 350 mm, v = = 24,3 m/s, p_z = 0,05 mm/ostrze, w = = 12 mm, t = 19 min



Rys. 10.3. Wpływ czasu utwardzania żywicy na wskaźniki skrawalności przy wierceniu i przecinaniu piłą tarczową płyt szkło-fenolowych
Objaśnienia przy rysunku 10.2.

Wpływ czynników technologicznych tworzywa na skrawalność przedstawiono na rys. 10.3, biorąc przykładowo jako parametr czas utwardzania żywicy. Tworzywo przetwardzone wykazuje gorszą od normalnego skrawalność z uwagi na wyższe wartości bezwzględnych wskaźników skrawalności: zużycia ostrza, oporów skrawania i temperatury skrawania, natomiast skrawalność tworzywa niedotwardzonego w porównaniu do normalnego może być uznana albo za lepszą albo za gorszą zależnie od rozpatrywanego wskaźnika lub sposobu obróbki.

Podsumowując rozważania o skrawalności tworzyw sztucznych warstwowych można stwierdzić, że zależy ona w podstawowej mierze od nośnika. Do dobrze obrabialnych z uwagi na wskaźnik zużycia ostrza, można zaliczyć tworzywa na nośniku celulozowym tkaninowym i papierowym, zaś do trudnoobrabialnych tworzywa na nośniku szklanym. Szczególnie dużą ścierność wykazują tworzywa z włóknem ze szkła kwarcowego, powodujące ok. 10 razy szybsze zużycie ostrzy narzędzi od tworzyw ze szkłem glino-borokrzemianowym [98]. Dalsze zróżnicowanie skrawalności związane jest z zawartością procentową i rodzajem żywicy oraz technologią wykonania laminatu. Wśród laminatów szklanych najlepszą skrawalność z uwagi na wskaźnik zużycia ostrza wykazują laminaty o niższych zawartościach nośnika oraz wykonane metodą kontaktową lub nawijaniem, w przeciwieństwie do prasowanych pod wysokim ciśnieniem. Wśród tych ostatnich gorszą skrawalność wykazują tworzywa epoksydowe i fenolowo-formaldehydowe, zaś lepszą melaminowe i epoksydowo-fenolowe. Kierunek orientacji włókien nośnika nie ma znaczącego wpływu na skrawalność laminatu, za wyjątkiem anizotropowych tworzyw wykonywanych na nośniku w po-

staci pasm z włókien szklanych (roving), odznaczających się lepszą skrawalnością.

Dla celów praktycznych korzystna jest znajomość związku skrawalności tworzywa z jego własnościami mechanicznymi. Pozwala ona, w przypadku nowych materiałów o zbadanych własnościach mechanicznych, na określenie ich skrawalności, a tym samym dobór właściwych warunków obróbki, bez przeprowadzania kosztownych i pracochłonnych badań. Dla tworzyw sztucznych pierwszą próbą tego rodzaju jest podany przez Rudniewa i Korolewa [98] wzór, określający zależność względnego wskaźnika skrawalności k_v od ośmiu parametrów własności mechanicznych dwunastu różnych tworzyw na nośniku szklanym:

$$k_v = 0{,}559 - 0{,}000118\ R_M - 0{,}000326\ R_g - 0{,}000817\ R_c + \\ + 0{,}00397\ U + 0{,}410 \cdot 10^{-5} \cdot E + 0{,}0368\ HB + 2{,}406\ f - 0{,}0869 \cdot 10^{3}\ m, \quad (10.7)$$

gdzie:

k_v - względny wskaźnik okresowej prędkości skrawania przy toczeniu,
R_M - wytrzymałość na rozciąganie w kG/cm^2,
R_g - wytrzymałość na zginanie w kG/cm^2,
R_c - wytrzymałość na ścinanie w kG/cm^2,
U - udarność w $kG.cm/cm^2$,
E - moduł sprężystości w kG/cm^2,
HB - twardość wg Brinella w kG/mm^2,
f - współczynnik tarcia przy współpracy z węglikami spiekanymi gat. BK3M,
m - ścierność w mg/m.

Względny wskaźnik skrawalności k_v przy toczeniu przyjęto jako średni stosunek okresowej szybkości skrawania danego materiału do okresowej szybkości skrawania tworzywa wzorcowego (AT-4C), wyznaczonej przy okresach trwałości ostrza T = 10, 20, 30 i 45 min. Ścierność określano ubytkiem masy pręta średnicy 2 mm ze stali P18 (HRC 58,5), trącego przy nacisku 3 kG/mm^2 i szybkości tarcia v = 100 m/min po badanym materiale, w odniesieniu do 1 m drogi tarcia. Wzór wyprowadzono metodą korelacji wielokrotnej, wykorzystując zbadane zależności T-v dla dwunastu różnych tworzyw wzmocnionych włóknem szklanym, w tym siedmiu w postaci tkaniny, dwóch w postaci pasm i trzech - ciętych włókien.

Przydatność podanego wzoru 10.7 wydaje się jednak problematyczna. Dla celów praktycznych wymaga on znajomości aż ośmiu własności mechanicznych tworzywa, w tym dość kłopotliwej do mierzenia ścierności. Analiza wpływu poszczególnych czynników na skrawalność na podstawie współczynników regresji w tym wzorze doprowadza do sprzecznych wniosków z wynikami podobnej analizy, jaką można przeprowadzić w oparciu o przedstawione przez tych samych autorów [98] zależności wyprowadzone na drodze korelacji dwuczynnikowej. Różnice występują nie tylko w wartościach współczynników, ale rów-

nież połowa znaków jest przeciwna, co wyklucza także poznawczą wartość tej zależności. Tak więc należy stwierdzić, że zagadnienie uzależnienia wskaźników skrawalności tworzyw warstwowych od ich własności mechanicznych jest nadal otwarte.

11. WNIOSKI

Wnioski szczegółowe dotyczące kolejno rozpatrywanych zagadnień zostały ujęte w odpowiednich rozdziałach rozprawy.
Poniżej przedstawiono wnioski o znaczeniu ogólniejszym.

1. Tworzywa sztuczne warstwowe można uznać za materiały dość dobrze obrabialne pod warunkiem zastosowania właściwych materiałów narzędziowych i zachowania określonych przedziałów parametrów skrawania. Przekroczenie tych przedziałów może spowodować zarówno gwałtowne pogorszenie jakości obrabianego przedmiotu jak też nagły wzrost intensywności zużycia ostrza. Wynika to ze zmian jakościowych zachodzących w procesie skrawania.

2. Proces tworzenia wióra uzależniony jest zarówno od własności komponentów tworzywa i ich wzajemnego wiązania, jak też wartości parametrów skrawania. Szczególnie istotny jest efekt skali określający stosunek wielkości przekroju warstwy skrawanej do grubości pojedynczej warstwy laminatu oraz kierunek wektora prędkości skrawania względem kierunku laminacji. Dzięki temu mogą powstawać - zależnie od warunków obróbki - rozmaite rodzaje wiórów od ciągłych ścinanych do odłupywanych i pylistych.

3. Nagłe zmiany jakościowe obserwowane w procesie skrawania są wynikiem zjawisk chemicznych i fizycznych, zachodzących w tworzywie pod wpływem temperatury skrawania. Sprzyja temu niski współczynnik przewodzenia ciepła tworzyw warstwowych. Przy skrawaniu laminatów na nośniku szklanym zachodzi w przypadku przekroczenia określonej temperatury obnażanie włókien szklanych wskutek wykruszania lub rozmiękczenia żywicy. Może to być główną przyczyną nagłego wzrostu intensywności zużycia ostrza.

4. Charakterystyczną cechą tworzyw sztucznych warstwowych przy rozpatrywaniu ich wskaźników skrawalności jest to, że tworzywa dobrze skrawalne z uwagi na wskaźnik okresowej prędkości skrawania są jednocześnie źle skrawalne z uwagi na wskaźnik oporów skrawania i na odwrót. Decydującym o skrawalności czynnikiem konstytucyjnym tworzywa jest nośnik; laminaty na nośniku celulozowym są ogólnie lepiej skrawalne od szklanych. Wraz ze wzrostem zawartości nośnika - szczególnie nieorganicznego - skrawalność się pogarsza.

5. Własności warstwy wierzchniej ukonstytuowanej w procesie skrawania uzależnione są od sposobu tworzenia wióra oraz tarcia zachodzącego na

powierzchni stykającej się z powierzchnią przyłożenia ostrza. Tarcie to, wywołane m.in. dużą sprężystością tworzyw, powoduje wzrost temperatury cienkiej przypowierzchniowej warstwy zmieniając jej właściwości. Wynikiem tego może być różny wpływ zużycia ostrza h_p na chropowatość powierzchni obrobionej, np. przy tworzywach epoksydowych i melaminowych na nośniku szklanym zachodzi wzrost chropowatości powierzchni w miarę powiększania się zużycia ostrza, zaś przy tworzywach celulozowo-fenolowych i szkło-fenolowych zazwyczaj na odwrót.

6. Przedstawione zależności między parametrami skrawania a okresem trwałości ostrzy, oporami i temperaturą skrawania oraz jakością warstwy wierzchniej pozwalają na dobór racjonalnych warunków obróbki krajowych tworzyw sztucznych warstwowych przy toczeniu, wierceniu i przecinaniu piłą tarczową.

7. Postuluje się prowadzenie dalszych badań w zakresie obróbki wiórowej tworzyw sztucznych warstwowych. Jako przykład tematyki można wymienić:

   a) badania nad zastosowaniem materiałów narzędziowych supertwardych przy obróbce tworzyw na nośniku szklanym i azbestowym,

   b) rozszerzenie omówionych w rozprawie badań na inne rodzaje obróbki jak np. frezowanie,

   c) pogłębienie badań nad zależnością własności warstwy wierzchniej od warunków obróbki celem umożliwienia sterowanego kształtowania tych własności,

   d) badanie związków między własnościami mechanicznymi tworzyw a wskaźnikami ich skrawalności.

LITERATURA

[1] Andrejewskaja G.D.: Wysokoprocznyje orientirowanyje stiekłopłastiki. Nauka, Moskwa, 1966.

[2] Barron L.H.: Sawing and machining glass-reinforced plastics with diamond-coated tools. Modern Plastics, Plastics technology, t.3, 1957, nr 6, s. 467-472.

[3] Beyer W., Schaab H.: Glasfaserverstärkte Kunststoffe. Carl Hanser Verl. München, 1969.

[4] Bezborodko M.D., Winogradow G.W., Szabarow Ł.I.: Trienije i iznos płastikow pri wysokich kontaktnych napriażenijach. Płasticzeskije Massy, 1962, nr 5, s. 53-57.

[5] Bielankin F.P., Jacenko W.F., Dybienko G.I.: Procznost i deformatiwnost słoistych płastikow. Naukowa Dumka, Kijew, 1964.

[6] Bishop J.T.: Laminated plastics and fiber - American Machinist, t.105, 1961, nr 4, s. 123-125 i nr 5, s. 99.

[7] Błaszczak M.: Skrawalność w zakresie wiercenia tworzyw sztucznych wzmocnionych tkaniną szklaną. Praca doktorska, Politechnika Śląska, Gliwice, 1971.

[8] Bogdanow W.M.: Wlijanie rieżimow riezanija i gieometrii instrumienta na szerochowatost płastmassowych powierchnostniej. Wiestn.masz.1970, nr 10, s. 70-72.

[9] Böhme H.: Die Ermittlung fertigungsgerechter Arbeitsbedingungen beim Bohren von Kunststoffen mit Spiralbohrer. Industrie Anzeiger 1961, nr 99, s. 24-27.

[10] Bracychin E.A. i in.: Piererabotka płasticzeskich mass w izdelia. Moskwa, 1966, s. 324-343.

[11] Broś J.: Podstawy doboru nowych materiałów na niektóre elementy ślizgowe maszyn w świetle badań technologicznych. ZN Pol. Krak. Nr 6, Mechanika, z. 19, Kraków, 1965.

[12] Broś J.: Współczynniki tarcia i zużycia fenolowych tworzyw wzmocnionych. ZN Pol. Krak. Zesz.Specj. nr 2, Kraków 1966, s. 153-173.

[13] Broś J.: Badania wpływu twardośoi czopa stalowego na pracę pary łożyskowej tworzywo sztuczne - stal. Seminarium Sekcji Tarcia, Smarowania i Zużycia KBM PAN na temat: "Tarcie i zużycie tworzyw sztucznych". WAT, Warszawa, 1967, s. VIII/1-17.

[14] Bul W.S., Awtokratowa N.D.: Tiepłofiziczeskije swojstwa armirowanych kompozicij. Płast. Massy, 1968, nr 2, s. 35-37.

[15] Bułowskij P.I., Pietrowa N.A.: Mechaniczeskaja obrabotka stiekłopłastikow. Lenizdat, Leningrad, 1969.

[16] Bursa J., Oskędra K.: Laminaty poliestrowo-szklane, metody produkcji prętów, rur i kształtowników. Przegląd Mech. 1960, nr 19, s.589-592.

[17] Cartyon B.: Machining of plastics - Plastics tooling and manufacturing handbook ASTME - Engelwood Cliffs N.J. 1965, s. 219-229.

[18] Corten H.T.: Fracture mechanics of composites. Fracture, t. VII, Academic press, New York/London 1972, s. 676-770.

[19] Corten H.T.: Reinforced plastics, SPE Reinhold Publ. Corp. New York, 1965.

[20] Czudnowskij A.R., Kestelman Ja.N., Achmaczet Ł.C.: Izgotowlenije i obrabotka detalej iz płastmass. Moskwa, 1967, s. 33-46.

[21] Danieljan A.M.: Tiepłota i iznos instrumienta w processie riezanija. Maszgiz, Moskwa, 1954.

[22] Darlewski J.: Skrawalność tworzyw sztucznych. Mechanik 1962, nr 9, s. 508-511.

[23] Darlewski J.: Badania wpływu warunków skrawania na zużycie ostrza, temperaturę skrawania i siły przy przecinaniu tworzyw fenolowo-formaldehydowych wzmocnionych tkaniną szklaną. Praca doktorska, Politechnika Śląska, Gliwice, 1964.

[24] Darlewski J.: Obróbka skrawaniem konstrukcyjnych tworzyw sztucznych. Mechanik 1964, nr 4, s. 210-214.

[25] Darlewski J.: Pomiar temperatury skrawania tworzyw sztucznych metodą noża składanego. Mechanik 1966, nr 4, s. 194-196.

[26] Darlewski J.: Badania wpływu warunków skrawania na temperaturę skrawania przy toczeniu Rezotekstu S. ZN Pol. Śl., Mechanika nr 27, Gliwice, 1967, s. 73-83.

[27] Darlewski J.: Zużycie ostrza z węglików spiekanych przy skrawaniu tworzyw fenolowo-formaldehydowych wzmocnionych tkaniną szklaną. Zagadnienia tarcia, zużycia i smarowania, z. 2, PAN, 1967, s. 149-156.

[28] Darlewski J.: Wpływ niektórych parametrów obróbki na chropowatość powierzchni przy toczeniu laminatów epoksydowo-szklanych. ZN Pol. Śl. Mechanika, z. 41, Gliwice, 1969, s. 143-153.

[29] Darlewski J.: Wpływ zużycia ostrza na siły skrawania przy toczeniu niektórych tworzyw sztucznych warstwowych. Obróbka materiałów niemetalowych. RTN-SIMP-NOT Rzeszów, 1970, s. 29-36.

[30] Darlewski J.: Beitrag zur spangebenden Bearbeitung von glasfaserverstärkten Epoxyharzschichtpressstoffen. AMT, DTH, Lyngby 1972.

[31] Darlewski J.: Analiza sił tarcia działających na powierzchni przyłożenia ostrza przy swobodnym skrawaniu tworzywa epoksydowego wzmocnionego tkaniną szklaną. IV Konferencja Postępy w Teorii i technice obróbki materiałów. IOS-PAN-SIMP, Kraków, 1973.

[32] Darlewski J., Błaszczak M., Czech M.: Wiercenie tworzyw sztucznych warstwowych. Normatywy technologiczne. MPM-Wema, Warszawa, 1973.

[33] Darlewski J., Błaszczak M., Molerus P., Bukalski A.: Materiały źródłowe do opracowania normatywów doboru warunków skrawania przy wierceniu tworzyw sztucznych warstwowych. Politechnika Śląska, Katedra Technologii Budowy Maszyn, Gliwice, 1971, praca nieopublikowana.

[34] Darlewski J., Molerus P.: Przecinanie tworzyw sztucznych warstwowych piłami tarczowymi. Normatywy technologiczne. MPM-Wema, Warszawa, 1972.

[35] Darlewski J., Molerus P., Bukalski A.: Materiały źródłowe do opracowania normatywów doboru warunków skrawania przy cięciu piłą tarczową tworzyw sztucznych warstwowych. Politechnika Śląska, Katedra Technologii Budowy Maszyn, Gliwice, 1970 - praca nieopublikowana.

[36] Darlewski J., Słupik H.: Toczenie tworzyw sztucznych warstwowych. Normatywy technologiczne. MPM-Wema, Warszawa, 1973.

[37] Darlewski J., Słupik H., Bukalski A. i in.: Materiały źródłowe do opracowania normatywów doboru warunków skrawania przy toczeniu tworzyw sztucznych warstwowych. Politechnika Śląska, Instytut Budowy Maszyn, Gliwice, 1972 - praca nieopublikowana.

[38] Darlewski J., Günther U.: Analiza procesu powstawania wióra w materiałach kompozycyjnych na przykładzie toczenia rur zwijanych szkło-epoksydowych. Postępy technologii maszyn i urządzeń, PAN (w druku).

[39] Doderer P.: Zerspannungsuntersuchungen on geschichteten Kunstharz-Pressstoffen. Dissertation, TU Dresden, 1942.

[40] Dreier H.: Einfluss von Zeit und Temperatur auf die mechanischen Eigenschafte duroplastischen Kunststoffe. Werkstatt und Betrieb, 102, 1962, nr 4, s. 231-244.

[41] Drożżin W.I.: Issliedowanije processa friezierowanija słoistych płastmass. Praca kandydacka. Charkowski Politechniczny Instytut, Charków, 1964.

[42] Drożżin W.I.: O kontaktie powierchnosti instrumienta z płastmassoj pri riezanii. Riezanije i instrumient, Ch.G.U. - Charków, 1970, z.2.

[43] Drożżin W.I., Krawczenko Ł.S.: Iznasziwanije prikromocznych uczastkow swierła pri obrabotkie płastmass. Riezanije i instrumient,Ch.G.U, Charków, 1972, z.12.

[44] Dhelhare G.A.: How to machine laminated plastics. The tool and manufacturing engineer, t. 50, 1963, nr 4, s. 99-102.

[45] Fabrication of decorative laminates. British Plastics, 1952 March., s. 90-98.

[46] Ferchland H.: Ein Beitrag zum Problem der Bearbeitung von Kunstharz-Hartpapier und Hartgewebe auf der Kreissäge. Dissertation, T.H. Dresden, 1934.

[47] Frerichmann B.J.: Ermittlung fertigungsgerechter Arbeitbedingungen und Untersuchung des Zerspannungs-verhaltens beim Drehen thermoplastischer Kunststoffe. Dissertation, T.H. Aachen, 1966.

[48] Gaube E., Kausch H.: Bruchteorien bei der industriellen Anwendung von Thermoplasten und glasfaserverstärkten Kunststoffen. Kunststoffe,t.63, 1973, nr 6, s. 391-397.

[49] Graesser E.C.: How to machine glass-base laminated plastic. Tooling and Production Magazine 1958, nr 10, s. 56-58.

[50] Günther U.: Interpretation und Erfassung des Werkzeugverschleisserhaltens beim Drehen des glasfaserverstärkten Duromers Cevausit 57 mit Wendeschneidplatten. Dr-Ing. Dissertation, TU Dresden, 1974.

[51] Hagen H.: Glasfaserverstärkte Kunststoffe. Wyd. 2, Berlin,1961,s.396-404.

[52] Hasegawa Y., Hanasaki S.: Rheological study of the action of the abrasive reinforcement on the tool wear. Bull. JSME, t.12, 1969,nr 51, s. 610-615.

[53] Hasegawa Y., Hanasaki S., Kita H., Kitamura Y.: Effect of the cutting fluid on the tool wear. Bull. JSME, t. 12, 1969, nr 51, s. 616-621.

[54] Hendrick R.W.: Cutting and trimming of plastics with the panel saw. Modern Plastics, Plastics Technology, 1957, nr 2, s. 105-107.

[55] Hübner K.: Internationale Tagung über GFK und Epoxidharze. Berlin - Adlershof, 1965.

[56] Isajew A.I.: Obrabotka riezanijem konstrukcjonnych płastmass.Maszgiz, Moskwa, 1944.

[57] Jegorow S.W.: Siły riezania pri obrabotkie konstrukcjonnych płastmass - w: Obrabotka metałłow i płastmass riezanijem - Maszgiz. Moskwa,1955, s. 35 - 44,

[58] Jegorow S.W., Kuznecowa A.W.: Racjonalnoje frezerowanije tekstolita i stiekłotekstolita. Wiestnik maszinostrojenia 1953, nr 10, s.41-44.

[59] Jerszow J.M., Mordwin A.P.: Izgotowlenije rezb na detalach iz stiekłopłastika. Maszinostrojenije, Leningrad, 1969.

[60] Kaczmarek J.: Untersuchung des Einflusses der Schneidenabrundung auf die Verfestigung der Oberflächenschicht. CIRP Annalen, t.13, 1966, s. 139-145.

[61] Kaczmarek J.: Podstawy obróbki wiórowej, ściernej i erozyjnej. WNT, Warszawa, 1970.

[62] Kaczmarek J., Przybylski L., Wójtowicz Cz.: Nazwy i oznaczenia wybranych wielkości z zakresu toczenia w układzie czterojęzycznym.PAN, Sekcja Technologii Maszyn, 1971.

[63] Katalog Tworzyw Sztucznych: Zjednoczenie Przemysłu Tworzyw Sztucznych "ERG" WKC, Warszawa, 1975.

[64] Kobayashi A.: Machining of plastics. Mc Grew Hill, New York, 1967.

[65] Kobayashi A.: Machinability of Plastics - CIRP Annalen, t.XIV,1967, nr 4, s. 491-495.

[66] Kobayashi A., Saito K.: On the cutting mechanism of plastics.Observations of chip formation. CIRP Ann. t. XI, 1962/63, nr 2, s. 82-90.

[67] Kolman R., Sikora R.: Obróbka skrawaniem tworzyw sztucznych.WNT,Warszawa, 1967.

[68] Kolman R., Sikora R., Przybylski W.: Anomalie przedmiotów z tworzyw sztucznych obrobionych skrawaniem. Mechanik 1966, nr 4, s. 203-206.

[69] Konowałowa N.I.: Niekotoryje woprosy obrabotki toczeniem słoistych płasticzeskich mass. Praca kandydacka. Uralski Politechniczny Instytut im. Kirowa, Świerdłowsk, 1954.

[70] Konowałowa N.I.: Tiepłowyje jawlenija pri riezanii słoistych płastmass. Trudy UPI im. Kirowa, t. 80, Świerdłowsk, 1959, s. 85-91.

[71] Korolew A.A.: Issliedowanije obrabatywajemosti stiekłopłastikow pri toczenii. Praca kandydacka, MAMI, Moskwa, 1966.

[72] Krekeler K.: Zerspannbarkeit der metallischen und nichtmetallischen Werkstoffe, Berlin, 1951.

[73] Królikowski W.: SPE-Journal, 20, 1964, str. 1031-1035, Plaste u.Kautschuk, 1962, nr 9, s. 389-391.

[74] Krywult B.: Badania wpływu niektórych parametrów technologicznych przetwórstwa na własności mechaniczne laminatów z żywic poliestrowych wzmocnionych jednokierunkowo włóknem szklanym (rowingiem). Praca doktorska, Politechnika Śląska, Gliwice, 1972.

[75] Li P.Z., Łukowienko T.M., Jakubowicz E.I. i in.: Issliedowanije koefficijenta liniejnogo rasszirienija stiekłopłastikow. Płast. Massy, 1962, nr 11, s. 36-40.

[76] Łarin M.N., Ignatow B.A.: Friezierowanije płastmass tekstolita i getinaksa. Sbornik trudow MMI nr 4, Maszgiz, Moskwa, 1952.

[77] Łosiew B.I., Putincew G.W., Strelcow K.W.: Obrabotka i otdiełka detalej iz płastmass. Leningrad, 1966, Lenizdat.

[78] Mc Abee E., Chmura M.: Effects of rate on the mechanical properties of glass reinforced polyester. SPE Journal, 19, 1963, s. 376-378.

[79] Małkin A.J., Rudniew A.W., Korolew A.A.: Mechaniczeskaja obrabotka stiekłopłastikow (w: Obrabotka płastmass w maszinostrojenii), Nauka, Moskwa, 1968, s. 73-85.

[80] Maranchik J., Williams R.: Machining plastics - Modern Plastics Encyclopedia, 1968, s. 982-987.

[81] Minikes F.: Machining laminates. Modern Plastics Encyclopedia, 1955, s. 658-662.

[82] Mirzojew R.G.: Płastmassowyje detali maszyn i priborow. Moskwa,1965.

[83] Mizeri A.A.: K woprosu riezanija płastmass, primieniajemych w tekstylnom maszinostrojenii; autoreferat dysertacji, MTI, Moskwa, 1946.

[84] Molerus P.: Skrawalność tworzyw sztucznych warstwowych przy cięciu piłą tarczową. Rozprawa doktorska, Politechnika Śląska, Gliwice, 1971.

[85] Mołczanow Ju.M.: Fiziczeskije i mechaniczeskije swojstwa stiekłopłastikow. Zinatne, Ryga, 1969.

[86] Muller G.J.: High pressure industrial laminates. Modern Plastics Encyclopedia 1970-71, Mc Graw Hill, New York, s. 282-288.

[87] Ogibałow P.M., Suworowa Ju.W.: Mechanika armirowanych płastikow. MGU, Moskwa,1965.

[88] Oleesky S., Mohr G.: Handbook of reinforced plastics of the SPI. Reinhold Publ. Corp. New York 1964, str. 381-386,

[89] Pietrowa N.A.: Mechaniczeskaja obrabotka stiekłopłastikow. ŁDNTP, Leningrad, 1965.

[90] Pietrowa N.A., Pietrow Ju.W.: Niekotoryje osobiennosti procesa riezanija i instrumient dla mechaniczeskoj obrabotki stiekłopłastikow s razlicznymi widami napołnitelej. Obrabotka riezanijem trudnoobrabatywajemych matieriałow. ŁDNTP, Leningrad, 1970, s. 42-52.

[91] Place S.W.: Electrical Manufact. 1954, nr 4, s. 95, wg (85).

[92] Rabinowicz A.Ł.: Wwiedienije w mechaniku armirowanych polimierow. Nauka, Moskwa, 1970.

[93] Rabinowicz A.Ł., Turazjan A.W.: Wlijanije skorosti deformacji na wieliczinu dieformacji i procznost orientirowannych stiekłopłastikow. DAN ZSRR, 1963, t. 148, nr 6.

[94] Reznikow A.N.: Tiepłofiziczeskije rasczety i eksperimenty pri riezanii mietałłow i płastmass. Wiestnik maszinostrojenija, 1963,nr 11 s. 29-34,

[95] Romanowski S.: Własności wytrzymałościowe laminatów na osnowie tkaniny szklanej przy różnych parametrach temperatury i prędkości zrywania. Praca doktorska, Lublin, 1973.

[96] Rosen B.W., Dow N.F.: Mechanics of failure of fibrous composites. Fracture, t. VII, Academic press, New York/London, 1972, s. 612-675.

[97] Rudniew A.W., Dobyczyna A.P.: Toczenie cwietnych spławow i stiekłotekstolita ałmaznym rezcom. Stanki i instrumient 1961, nr 10, s.27-30.

[98] Rudniew A.W., Korolew A.A.: Obrabotka riezaniem stiekłopłastikow.Maszinostrojenije, Moskwa, 1969.

[99] Rudniew A.W., Sztucznyj B.P.: Obrabotka toczenijem stiekłotekstolitow, WNII, Moskwa, 1963.

[100] Rudniew A.W., Sztucznyj B.P.: Optymalnaja konstrukcja instrumienta i riežimy toczenia niemietaliczeskich materiałow tipa stiekłotekstolita. Stanki i instrumient 1963, nr 11, s. 23-25.

[101] Schaaf W., Hahnemann A.: Verarbeitung von Plasten. VEB D.V.f.GI,Leipzig, 1968.

[102] Schallbroch H., Doderer P.: Zerspanbarkeit von Schichtpressstoffen. Zeitschrift d.VDI, t. 93, 5/1951, s. 97-103.

[103] Schwarz H., Schlegel H.: Metallkleben und glasfaserverstärkte Kunststoffe in der Technik. Halle 1961, Verlag Technik, s. 136-137.

[104] Siemko M.F., Baskakow I.C., Drożżin W.I., Kaczer W.A. - Mechaniczeskaja obrabotka płastmass - frezerowanije. Maszinostrojenije, Moskwa, 1965.

[105] Siemko M.F., Sustan G.K., Drożżin W.I.: Obrabotka riezanijem elektroizolacjonnych materiałow. Energia, Moskwa, 1974.

[106] Silk T.R.: How to machine laminated plastics - Iron Age, t. 181, 1958, nr 18, s. 77-80.

[107] Słupik H.: Skrawalność tworzyw sztucznych warstwowych w zakresie toczenia. Rozprawa doktorska, Politechnika Śląska, Gliwice, 1976.

[108] Soroczyszyn A.G.: Stiekłopłastiki, Moskwa, 1964, s. 134-136.

[109] Spur G., Khare M.: Analyse der Scherwinkelbeziehungen beim ortogonalem Zerspannvorgang. Zeitschrift für Wirtschaftliche Fertigung, t. 65, 1970, nr 6, s. 269-272.

[110] Spur G., Zug G.: Beitrag zur Untersuchung des Zerspannverhaltens von Polyamid beim Drehen. CIRP Annalen, t. 18, 1970, nr 3, s. 397-404.

[111] Spur G., Zug G.: Oberflächengüte und Werkzeugverschleiss beim Drehen von glasfaser - und graphithaltigen Polyamid. Werkstoffen, ZWF, t. 66, 1971, nr 2, s. 47-51.

[112] Spur G., Zug G.: Untersuchung der Spanentstehungszone beim Drehen von thermoplastischen Kunststoffen, ZWF, t. 66, 1971, nr 3, s.110 - - 114.

[113] Szlenskij O,F.: Tiepłowyje swojstwa stiekłopłastikow. Chimija, Moskwa, 1973.

[114] Szlenskij O.F., Barskij Ju.P., Piczugin N.P.: Opriedielenije tiepłojemkosti i tiepłoprowodnosti płastmass w processe termodestrukcji. Płast. massy, 1964, nr 1, s. 62-64.

[115] Szałun G.B.: Proizwodstwo izdelij iz słoistych płastikow. Chimija, Moskwa, 1975.

[116] Szaszkow A.G., Tiukajew W.I.: Tiepłofiziczeskije swojstwa razłagajuszczczychsia matieriałow pri wysokich tiemperaturach.Nauka i technika, Mińsk, 1975.

[117] Sztucznyj B.P.: Issliedowanije niekotorych woprosow processa riezanija stiekłopłastikow. Praca kandydacka. MAMI, Moskwa, 1964.

[118] Sztucznyj B.P.: Mechaniczeskaja obrabotka niemetaliczeskich materiałow na osnowie stiekłowołokna. Wiestnik maszinostrojenia, 1966, nr 1, s. 38-51.

[119] Sztucznyj B.P.: Obrabotka płastmass riezanijem. Maszinostrojenije, Moskwa, 1974.

[120] Tarnopolski Ju.M. (red.) i in.: Metody staticzeskich ispitanij armirowanych płastikow. Zinatne, Riga, 1972,

[121] Terentiew I.S.: Obrabotka płastmass - primieniajennych w maszinostrojenii. Moskwa, 1965, s. 95-134.

[122] Tichomirow R.A., Nikołajew W.I.: Mechaniczeskaja obrabotka płastmass. Maszinostrojenije, Leningrad, 1975.

[123] Tsueda H., Hasegawa Y., Hanasaki S.: On the tool wear in the intermittent cutting of the reinforced plastics. Bull. JSME, t. 12,1969, nr 51, s. 601-609.

[124] Wadaczkorija W.I.: Issliedowanije obrabatywajemosti płastmass riezanijem. Izdat. GPI, Tbilisi, 1969.

[125] Walczak K.: Wpływ parametrów technologicznych przetwórstwa na własności rur ciśnieniowych poliestrowo-szklanych. Rozprawa doktorska, Politechnika Śląska, Gliwice, 1975.

[126] Ward J.M.: Mechaniczne własności polimerów jako tworzyw konstrukcyjnych. PWN, Warszawa, 1975.

[127] Wason R.A.: How to machine plastics. Tool Engineer, t. 37, 1956, nr 10, s. 111-120.

[128] Wende A., Moebes W., Marten H.: Glasfaserverstärkte Plaste. VEB D.V.f.GI, Leipzig, 1969.

[129] Werner H.: Betrachtungen zur Einführung des Hartmetall-Kreissäge - blatts für Plastbearbeitung. Plaste und Kautschuk, t. 14,1967, nr 7, s. 499-501.

[130] White R.B.: Fabricating reinforced plastics. Modern Plastics, 1951, April, s. 103-114.

[131] Winkler A., Jähnke H.: Untersuchung der Zerspannung von glasfaserverstärkten Epoxidharz. Plaste u. Kautschuk, t. 15, 1968, nr 12, s. 910-917.

[132] Zickel H.: Das spanabhebende Bearbeiten der Kunststoffe. Carl Hanser Verlag, München, 1963.

[133] Zoriew N.N.: Woprosy miechaniki riezanija mietałłow. Maszgiz, Moskwa, 1956.

[134] Zvonar V., Novy K.: Obrabeni varstvenych hmot ztužených s sklo-textilem. Strojirenstvi 1956, nr 12, s. 837-838.

[135] Żukow A.M., Wjałuchina C.D.: Mechaniczeskije swojstwa stiekłopłastika pri komnatnoj temperature. Inżeniernyj żurnał, 1962, t. 2, nr 4, s. 330.

S t r e s z c z e n i e

W pracy przedstawiono wyniki badań prowadzonych przez autora ze współpracownikami na Politechnice Śląskiej w Gliwicach i skonfrontowano je z opublikowanymi badaniami zagranicznymi. Z obszernego zbioru zagadnień związanych z obróbką wiórową tworzyw sztucznych warstwowych wybrano te, które pozwalają na lepsze poznanie procesu skrawania i stwarzają podstawy do optymalizacji obróbki tych materiałów w przemyśle. Ze sposobów obróbki przyjęto - jako najczęściej stosowane - toczenie, wiercenie i przecinanie piłami tarczowymi. Z tworzyw wybrano najbardziej rozpowszechnione laminaty na nośnikach celulozowych i szklanych z żywicami fenolowo-formaldehydową, epoksydową i melaminową. Przegląd literatury uzupełniono tabelarycznym zestawieniem, pozwalającym na ocenę poszczególnych publikacji dotyczących określonych tworzyw i sposobów obróbki.

Proces skrawania rozpatrzono w oparciu o złożoną budowę laminatów i ich własności fizyczne i chemiczne. Uwzględniono tu również wpływ kierunku wektora prędkości skrawania względem uwarstwienia tworzywa i efekt skali, określający stosunek wielkości przekroju warstwy skrawanej do grubości warstwy laminatu. Określono wpływ warunków skrawania na rodzaj wiórów.

Badania zużycia ostrzy z węglików spiekanych metali pokazały charakterystyczne dla tej obróbki zróżnicowanie stępienia w zależności od warunków skrawania. Omówiono też mechanizm zużycia ostrza, uwzględniając przy tym stan powierzchni skrawania tworzywa trącej o powierzchnię przyłożenia ostrza.

Badania sił skrawania wykazały istotne znaczenie sił składowych działających na powierzchni przyłożenia ostrza, wynikające z dużej sprężystości tworzyw warstwowych. Miarą tego znaczenia jest stosunek sił $P_y : P_z$, który wyraźnie wzrasta w miarę zużywania się ostrza na powierzchni przyłożenia. Podano również wyniki prób określenia współczynnika tarcia na powierzchni przyłożenia oraz wzory empiryczne na składowe siły skrawania w zależności od parametrów skrawania.

Badania temperatury skrawania pozwoliły ustalić, jak wpływa na nią zużycie ostrza oraz parametry skrawania. Omówiono również zagadnienia jakości przedmiotu obrobionego, zwracając uwagę na zakresy parametrów obróbki sprzyjające powstawaniu anomalii obróbkowych. Pokazano także wpływ zużycia ostrza i parametrów skrawania na chropowatość powierzchni obrobionej.

Dla celów praktycznych podano zalecane warunki skrawania jak materiał i geometrię ostrzy, kryterium zużycia ostrza oraz zasady doboru parametrów skrawania w oparciu o wyznaczone empiryczne zależności między okresem trwałości ostrza a parametrami skrawania. Rozpatrzono również wskaźniki skrawalności badanych tworzyw, porównując zarówno wpływ żywicy jak i nośnika na skrawalność.

ИЗБРАННЫЕ ВОПРОСЫ ОБРАБОТКИ РЕЗАНИЕМ СЛОИСТЫХ ПЛАСТМАСС

Р е з ю м е

В работе представлены результаты исследований, проведённых автором в коллективе с сотрудниками в Политехническом институте в Гливицах и сравнения их с опубликованными зарубежными исследованиями. Из обширного множества вопросов связанных с обработкой резанием слоистых пластмасс были выбраны те, которые дают возможность ближе ознакомиться с вопросом резки и дают основание для оптимизации обработки этих материалов в промышленности. Из всех методов обработки было выбрано, как чаще всего применяемое, точение, сверление и разрезание дисковыми пилами. Из пластмасс были избраны распространённые ламинаты на целлюлозных и стеклянных носителях со смолами: феноло-формальдегидной, эпоксидной и меламиновой. Обзор литературы был дополнен табельной сводкой, позволяющей произвести оценку отдельных публикаций касающихся определённых пластмасс и способов обработки.

Процесс резки был рассмотрен при учете сложного строения ламинатов и их физических и химических свойств. Здесь тоже учитывалось влияние направления вектора скорости резки по отношению к слоистости пластмассы и эффект масштаба, определяющий соотношение величины сечения срезаемого слоя к толщине слоя пластмассы. Было определено влияние условий резания на тип стружки.

Исследование износа режущей кромки из твёрдого сплава дали характеристические для данной обработки различия притупления в зависимости от условий резки. Описывается также механизм износа режущей кромки при учёте состояния обрабатываемой поверхности пластмассы трущейся по задней грани инструмента.

Испытания усилий резания показали существенное значение составляющий усилий действующих на задней поверхности режущей кромки инструмента, следующее из большой упругости слоистых пластмасс. Мерилом этого значения является соотношение усилий $P_y : P_z$, которое заметно возрастает по мере износа режущей кромки со стороны задней грани. Производятся также результаты испытаний для определения коэффициента трения на задней грани и эмпирические формулы для расчета составляющих усилий резки в зависимости от режимов резания.

Исследования температуры резания дали возможность определить каким образом на неё влияет износ кромки и режимы резания. Описан тоже вопрос качества обработанной детали, при обращении внимания на пределы параметров обработки способствующие возникновению неправильностей при резании. Представлено также влияние износа режущей кромки и режимов резания на чистоту обработанной поверхности.

Для практических целей даются, рекомендуемые режимы резания как материал и геометрия режущей кромки, критерий износа режущей кромки и принципы подбора режимов резания на основании определённых эмпирических зависимостей между временем работы режущей кромки и режимами резания. Рассмотрены тоже показатели обрабатываемости резанием исследуемых пластмасс сравнивая, как влияние смолы, так и носителя на обрабатываемость резанием.

SELECTED PROBLEMS OF MACHINING OF LAMINATED PLASTICS

S u m m a r y

Here are presented the results of researches led by author together with collaborators at Silesian Politechnical Institute in Gliwice and compared with foreign publications. The chosen problems connected with machining of laminated plastics are these, which permit to recognize the cutting process and give basis for industrial machining optimization. The most frequently used cutting ways of all possible is chosen turning, drilling and circular sawing. As the most spread plastics are selected cellulose - and glass-based laminates with phenol formaldehyde, epoxy and melamine resins. The literature review is supplied with tabelaric comparation permitting to value each publication concerning definite plastics and machining ways.

The cutting process inquiring is based on complex structure and physical and chemical properties of laminates. The influence of cutting speed vector direction to lamination and scale effect, definiting area of the undeformed chip section to laminate layer thickness proportion is also taken into consideration. The influence of cutting conditions on the chips kind is also definited.

The researches of wear of sintered carbide tools showed characteristic differentiation of blunting which depends on cutting conditions. The mechanism of tool wear is presented with taking into consideration the state of cut surface rubbing flank of wedge.

The cutting forces researches showed substantial meaning of component forces working on the flank arising from great elasticity of laminates. The measure of this meaning is proportion $P_y : P_z$, which distinctly arise with flank wear. The results of experiences of friction coefficient definition on flank and empiric formulas for cutting forces components depending on cutting conditions are also presented.

The cutting temperature researches allowed to define the influence of tool wear and cutting conditions on this temperature. The problems of workpiece quality are also showed, paying attention to cutting parameters ranges favourabling damage of machined surface. The influence of tool waer and cutting conditions on surface roughness is presented too.

For praxis are given recommended machining conditions as tool material, tool geometry, criterion of tool wear and principles of choise of cutting conditions. The last are leant upon definite empiric formulas for tool life depending on cutting conditions. The machinability data with comparison of resin and reinforcement influence on this are also presented.

BIBLIOTEKA GŁÓWNA
Politechniki Śląskiej
P 3361/77/61

WYDAWNICTWA NAUKOWE I DYDAKTYCZNE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ MOŻNA NABYĆ W NASTĘPUJĄCYCH PLACÓWKACH:

Gliwice — Księgarnia Techniczna, ul. M. Strzody 14b;
Gliwice — Punkt sprzedaży Studenckiej Spółdzielni Pracy, ul. Wrocławska 4/6;
Katowice — Księgarnia nr 004, ul. Warszawska 11;
Katowice — Księgarnia nr 015, ul. Żwirki i Wigury 33;
Bytom — Księgarnia nr 048, pl. Kościuszki 4;
Chorzów — Księgarnia nr 063, ul. Wolności 22;
Dąbrowa Górnicza — Księgarnia nr 081, ul. ZBoWiD-u 2;
Rybnik — Księgarnia nr 126, Rynek 1;
Sosnowiec — Księgarnia nr 181, ul. Zwycięstwa 7;
Zabrze — Księgarnia nr 230, ul. Wolności 288;
Zawiercie — Księgarnia nr 250, ul. 3 Maja 11;
Warszawa — Ośrodek Rozpowszechniania Wydawnictw PAN, Pałac Kultury i Nauki.

Wszystkie wydawnictwa naukowe i dydaktyczne zamawiać można poprzez Składnicę Księgarską w Warszawie, ul. Mazowiecka 9.