

*materiały cierne, kompozyty metalowe, cząstki ceramiczne,
ceramika techniczna, obróbka laserowa,
obróbka strumieniem wodno-ściernym*

Andrzej MAZURKIEWICZ¹

KSZTAŁTOWANIE WYROBÓW Z MATERIAŁÓW STOSOWANYCH SZCZEGÓLNIIE NA ELEMENTY CIERNE UKŁADÓW HAMULCOWYCH

Materiały stosowane na elementy cierne np. tarcze hamulcowe, należą do grupy materiałów stwarzających duże problemy podczas obróbki. Do tych materiałów należy zaliczyć kompozyty metalowe, ceramika, żeliwo. Nowoczesne technologie do których należy zaliczyć obróbkę laserową i obróbkę wodno-ścierną, pozwalają na wytwarzanie dowolnych kształtów z bardzo twardych materiałów z dużą efektywnością obróbki oraz dużą dokładnością.

FORMATION OF THE ARTICLES FROM MATERIALS APPLIED ON THE FRICTION ELEMENTS OF BRAKE GEAR

Materials applied on friction elements e.g. brake shields, belonging to the group of materials creating large problems during the processing. To these materials should be number metal composite, ceramics, cast iron. Modern technologies to which should be number laser processing and water-abrasive processing, are allowing to make any shapes from very hard materials with the large efficiency of the processing and large exactitude.

1. WSTĘP

Jednym z podstawowych podzespołów samochodowych z punktu widzenia zarówno bezpieczeństwa użytkowania, jak i ogólnego poziomu technicznego pojazdu jest układ hamulcowy.

Tarcze hamulcowe należą do bardzo odpowiedzialnych i najbardziej obciążonych elementów układu hamulcowego. Ich materiał, jakość i konstrukcja decydują w sposób zasadniczy o skuteczności działania hamulców. Niezależnie od typu skojarzenia, wszystkie materiały stosowane na elementy cierne układów hamulcowych powinny charakteryzować się między innymi:

- a) wysoką wartością współczynnika tarcia μ oraz dużą jego stabilnością;
- b) odpornością na zużycie w określonych warunkach pracy;
- c) dobrym przewodnictwem cieplnym;
- g) technologicznością konstrukcji i łatwością wykonania.

¹ Politechnika Radomska, amazurkiewicz@pr.radom.pl

Wymagania te mogą spełniać zbrojone dyspersyjnie metalowe materiały kompozytowe na bazie aluminium (MMC) używane głównie na skojarzenia cierne, pracujące w warunkach tarcia technicznie suchego. Ze względu na swoją budowę i wynikające możliwości sterowania właściwościami jest coraz częściej wykorzystywanym materiałem.

Innym stosowanym materiałem na tarcze hamulcowe jest różnego rodzaju żeliwo, przy jego wielu wadach jak: mała odporność na szoki cieplne, korozji tarczy hamulcowej (oraz utlenienia jej powierzchni), pęknięć tarczy hamulcowej, rowków na jej powierzchni roboczej, całkowitym zużyciem okładzin ciernych i zniszczeniem tarczy hamulcowej, pisków podczas hamowania, niskiej skuteczności hamulców oraz drgań elementów samochodu wymuszanych drganiami elementów układu hamulcowego.

W nowoczesnych samochodach coraz częściej stosowane są tarcze hamulcowe ceramiczne. Do produkcji hamulców ceramicznych stosowane są najczęściej węgliki krzemu, które są dodatkowo wzmacniane włóknami węglowymi. Węgliki krzemu są bardzo twardym, odpornym na ścieranie materiałem, którego struktura jest bardzo podobna do diamentu. Włókna węglowe natomiast wspomagają absorpcję przeróżnych naprężeń związanych z pracą hamulców (termicznych, mechanicznych). Dodatkowo węgliki krzemu chronią włókna węglowe przed kontaktem z powietrzem, a tym samym przed spalaniem (w wysokich temperaturach włókna węglowe uległyby spalaniu, jeżeli miałyby kontakt z tlenem). Taki kompozyt ma ponadto dobre przewodnictwo cieplne i dużą pojemność cieplną (absorbując dużo ciepła, ale szybko je odbiera i oddaje).

Do innych materiałów odpornych na ścieranie można zaliczyć różne rodzaje węglików spiekanych. Wymienione grupy materiałów charakteryzują się różnorodnymi właściwościami strukturalnymi, fizycznymi, mechanicznymi. To co ich łączy to znaczna twardość i tym samym trudności w procesie technologicznym wytwarzania. Niejednorodność struktury i właściwości składników budowy, szczególnie wyraźna w materiałach kompozytowych, stwarza często duże problemy z obróbką. Dobrym rozwiązaniem są nowoczesne technologie kształtowania materiałów twardych do których należą obróbka laserowa oraz strumieniem wodno-ściernym.

2. MATERIAŁY STOSOWANE NA ELEMENTY CIERNE

Dość perspektywicznym materiałem na elementy cierne jest kompozyt zbrojony dyspersyjnie o osnowie stopów aluminium, zawierające fazę zbrojącą w postaci cząsteczek węgla krzemu SiC, tlenku glinu Al_2O_3 lub popiołów lotnych [1]. Zastosowanie kompozytu wpływa na zmniejszenia masy pojazdu, wyeliminowania niebezpieczeństwa powstawania mikropęknięć w efekcie zmęczenia cieplnego, a nawet gwałtownego zniszczenia (rozpadu) tarczy hamulcowej pod wpływem powtarzających się szoków cieplnych. Dodatkową zaletą kompozytów aluminiowych (jak każdego innych kompozytów metalowych) jest możliwość sterowania ich przewodnością cieplną w wyniku optymalizacji udziału objętościowego, kształtu, rozmiarów i rozmieszczenia fazy zbrojącej przy jednoczesnym 3-krotnym wzroście efektywności odprowadzenia ciepła [2].

Porównanie właściwości różnych materiałów kompozytowych mogących znaleźć zastosowanie do produkcji tarcz hamulcowych przedstawiono w tabeli 1.

Tab. 1. Wybrane właściwości materiałów kompozytowych na tarcze hamulcowe [3]

Stop osnowy Wyszcze- gólnienie	4040 (Al-Si)	7033 (Al- Zn)	7027 (Al-Zn)	F3S.20S (Al-Si)	Żeliwo szare
Faza zbrojąca	SiC	Al ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiC	-
Udział objętościo- wy fazy zbrojącej, %	30	25	38	20	-
Metoda wytwarzania	Odle- wanie do form piasko- wych	Odle- wanie do form piasko- wych	Techno- logia preform (infiltra- cja)	Odle- wanie kokilo- we	Odlewa- nie do form piasko- wych
Gęstość, g/cm ³	2,89	2,80	2,88	2,77	6,9÷7,4
Wytrzymałość na rozciąganie, MPa	225	180	220	220	100÷400
Moduł Younga GPa	127	100	137	100	80÷150
Współczynnik rozszerzalności cieplnej, µm/mK	14,8	18,0	14,5	17,5	9,0÷11,0
Przewodność ciepl- na, W/mK	156	130	95	150	50
Ciepło właściwe J/kgK	820	830	830	820	460÷840
Maksymalna tem- peratura pracy, °C	480	480	540	300	800

Do drugiej ważnej grupy materiałów na elementy cierne należy ceramika, odróżniająca się swoimi właściwościami od kompozytów (MMC). Charakteryzuje ją:

- wysoka twardość, odporność na ścieranie i kruchość;
- wysoka temperatura topnienia;
- znaczna odporność chemiczna (korozyjna);
- odporność na działanie wysokich temperatur (zachowanie właściwości mechanicznych);
- właściwości mechaniczne trudniejsze do przewidzenia niż dla metali.

Do tej grupy materiałów należy zaliczyć ceramikę tlenkową np. Al₂O₃, oraz ceramikę techniczną beztlenową (węgliki, azotki, borki, diament).

Najważniejsze materiały ceramiki technicznej beztlenowej to: SiC, Si₃N, BN, posiadające:

- bardzo wysoką twardość (BN – najwyższą) i odporność na ścieranie;
- wysoką odporność na ścieranie;
- wysoką w wytrzymałość i odporność na korozję także w wysokich temperaturach (powyżej 1300°C);
- niski współczynnik tarcia;
- bardzo wysoką przewodność cieplną (SiC do 5x większą niż Al₂O₃);
- BN – bardzo mała przewodność cieplna.

Porównanie twardości, jako ważnego wskaźnika odporności materiału na ścieranie przedstawiono w tabeli 2.

Tab. 2. Porównanie twardości materiałów odpornych na ścieranie [4]

Minerał / materiał	Wzór chemiczny	Twardość wg Mohsa	Twardość kN/mm ²
Korund	α Al ₂ O ₃	9	21.00
Diamant	C	10	70
Azotek boru	β BN		45 -48
Węglik boru	B ₄ C		37 -43
Węglik krzemu	β SiC		23 -26
Porcelana, szkło			20 -23
Stal nierdzewna			13 -14

3. KSZTALTOWANIE WYROBÓW Z MATERIAŁÓW NA ELEMENTY CIERNE

3.1. Obróbka laserowa, jakość obróbki

Cięcie laserowe jest szeroko stosowaną metodą obróbki. Zakres materiałów poddających się temu rodzajowi cięcia jest bardzo szeroki. Obejmuje on stale węglowe i stopowe, stopy metali nieżelaznych, a także materiały niemetaliczne (tworzywa sztuczne, drewno i jego pochodne, różnego rodzaju ceramikę itd.). Wśród stopów metali nieżelaznych liczne zastosowania mają stopy aluminium. Są one jednak trudne w obróbce z powodu ich znacznej refleksyjności i wysokiego przewodnictwa cieplnego.

W procesie cięcia laserem decydujące znaczenie ma rodzaj zastosowanego gazu (tabela 3). W początkowych latach do laserowej obróbki materiałów stosowany był przede wszystkim tlen, który przy niskich mocach pierwszych urządzeń laserowych stanowił źródło dodatkowej energii dla procesu. Zachodząca reakcja dostarcza 40% energii potrzebnej do procesu, dlatego 60% dostarczyć musi promień laserowy. Ciśnienie tlenu tnącego przy cięciu tego typu stali nie przekracza 6 bar. Cięcie wysokociśnieniowe z zastosowaniem tlenu do 20 bar stosowane jest dla takich materiałów jak brąz. Zastosowanie tlenu pozwalało więc na uzyskiwanie wyższej prędkości przecinania i cięcie materiałów o większej grubości. Jednakże wraz z rosnącą grubością materiału prędkość przecinania gwałtownie zaczęła spadać i dla danej mocy lasera, począwszy od pewnej grubości materiału, stała się ona równie niska jak przy cięciu tradycyjną technologią acetylenowo-tlenową.

Cięcie metali reaktywnych, takich jak np. tytan wykonuje się przy pomocy gazu obojętnego jakim jest argon. Zastosowanie innych gazów procesowych może powodować reakcje chemiczne, w których następnie może dojść do zmian w strukturze elementu.

Gdy do cięcia stosujemy gaz obojętny np. azot, cała energia musi pochodzić od promienia laserowego. Wymagana jest więc większa moc urządzeń. Taką metodę stosujemy do laserowego wycinania elementów w stali wysokostopowej. Tutaj materiał jest topiony przez promień lasera i wydmuchiwany przez strumień gazu obojętnego. Ciśnienie

gazu tnącego jest zdecydowanie większe niż przy cięciu tlenem. Ciśnienie azotu wynosi 5-25 bar. Konsekwencją większego ciśnienia jest też większe zużycie gazu.

Parametry strumienia gazów wywierają obok parametrów wiązki i prędkości posuwu wiązki laserowej zasadniczy wpływ na proces cięcia. Prawidłowy przebieg wycinania laserowego zapewniają odpowiednia czystość i właściwe ciśnienie gazu oraz właściwy stan i ustawienie dyszy.

Wspomniane powyżej zależności pomiędzy rodzajem i czystością gazów tnących a prędkością cięcia oraz jakością przeciętej powierzchni stanowią podstawowy powód, dla którego sprężone powietrze wykorzystuje się niemal wyłącznie do cięcia materiałów niemetalicznych, w szczególności tworzyw sztucznych, kompozytów, ceramiki i tkanin.

Zanieczyszczenia w mieszance gazów laserowych mogą obniżać sprawność lasera przez zmniejszenie mocy, destabilizację wyładowań elektrycznych lub zwiększenie zużycia gazów technologicznych podczas cięcia laserowego. Ponadto zanieczyszczenia oddziałują na optykę urządzenia, tworząc osady na chłodzonych elementach optyki, powodując ich zmatowienie. W rezultacie większa część wiązki światła laserowego jest absorbowana przez optykę, która ulega przyspieszonemu zużyciu. Wymagane są częste przeglądy i naprawy elementów optycznych plotera laserowego. Najgroźniejszymi zanieczyszczeniami są para wodna i węglowodory.

Zanieczyszczenia mieszanki laserowej pochodzą nie tylko z zanieczyszczonej butli, mogą również dostawać się ze źle zaprojektowanej i wykonanej instalacji zasilającej. Dlatego niezwykle istotny jest dobór właściwych urządzeń i materiałów, z których wykonuje się sieci gazowe zasilające lasery. Zagadnienie czystości dotyczy także gazów technologicznych. Stopień czystości tlenu czy azotu wpływa przede wszystkim na szybkość procesu technologicznego wycinania laserowego oraz na jakość – wynik zabiegu (czystość i stan krawędzi po cięciu, czystość i wygląd spoiny itp.).

Zależnie od parametrów lasera posiada on różne możliwości [5]:

- grubości materiałów obrabianych i ciętych: stal do 25 mm, stal szlachetna do 16 mm, aluminium do 12 mm (aluminium i jego stopy cechuje wysoka refleksyjność oraz przewodność cieplna, które znacznie utrudniają cięcie laserem), brąz, miedź: do 8 mm, tytan: do 4 mm;
- dokładność cięcia poniżej 0,1 mm w zależności od grubości materiału;
- wysoka możliwość dostosowawcza także przy skomplikowanych geometriach cięcia i obróbki.

Tab. 3. Gazy stosowane do cięcia laserowe [5]

Rodzaj	Rodzaj ciętego materiału
Powietrze	aluminium, tworzywo sztuczne, drewno, materiały kompozytowe, tlenek glinu, szkło, guma, kwarc,
Tlen	stale węglowe, stale niskostopowe, stale odporne na korozję, miedź,
Azot	stale odporne na korozję, aluminium, stopy niklu,
Argon	stale specjalne, wysokostopowe i stopy niklu, aluminium i stopy tytan, aluminium, tantal, cyrkon,

Cięcie, o ile nie rozpoczyna się z krawędzi materiału, poprzedzone jest zawsze drążeniem. Aby w procesie cięcia i wykonywania otworów doprowadzić do lokalnej zmiany fazy materiału wymagane są gęstości mocy wiązki w zakresie $10^6 - 10^8 \text{ W/cm}^2$. Przy tak dużych gęstościach mocy przyrost generowanego ciepła w punkcie na powierzchni materiału nie może być zbilansowany jego ubytkiem na drodze kondukcji w głąb materiału co powoduje gwałtowne ogrzewanie się materiału. W zależności od rodzaju ciętego materiału znaczne nagrzanie jego powierzchni prowadzi do zmiany stanu skupienia materiału na drodze różnych procesów fizycznych z pojawieniem się przemieszczających się w głąb materiału powierzchni międzyfazowych. Z tego względu w przypadku cięcia ceramiki czy metali stosuje się odpowiednie techniki cięcia.

Z uwagi na kruchość materiałów ceramicznych do ich oddzielenia po prostej linii wystarcza wykonanie ciągłej rysy lub szeregu wgłębień na powierzchni materiału i następnie wykonaniu odpowiednich zabiegów mechanicznych. Tę własność ceramiki wykorzystuje się do nacinania laserowego (scribing). Technika ta polega na wykonaniu przy pomocy działającej impulsowo wiązki laserowej szeregu wgłębień ułożonych prostoliniowo. W przypadku, gdy wymagane jest cięcie profilowe, stosuje się ciągłe cięcie na wskroś doprowadzając przedmiot ceramiczny do temperatury topnienia i wydmuchując stopiony materiał ze szczeliny cięcia.

Podstawowe parametry cięcia laserowego to :

- jakość wiązki laserowej;

Cięcie i wykonywanie otworów wymaga rozkładu modalnego mocy wiązki. Rozkład ten umożliwia zogniskowanie wiązki do najmniejszych możliwych średnic. Ponadto wymagana jest duża stabilność parametrów wiązki. Najlepsze parametry wiązki zapewniają lasery CO_2 o powolnym przepływie wzdłużnym.

- rodzaj i parametry gazu towarzyszącego procesowi cięcia (tabela 3);

Ciśnienie gazu tnącego zależy od rodzaju ciętego materiału i jego grubości i mieści się w granicach od kilku kPa do 800 kPa.. Przy cięciu laserowym dąży się do możliwie najwęższej i jednorodnej szczeliny cięcia, co z kolei narzuca konieczność stosowania dysz gazowych o małej średnicy i utrzymywania dokładnej odległości dysz od ciętego przedmiotu. Np. zbyt duża odległość dysz od przedmiotu powoduje powstanie zbyt rozszerzonego strumienia gazu a przez to mniej efektywnego w usuwaniu metalu w dolnych regionach szczeliny cięcia. Z tego względu używa się dysz z pojemnościowym układem śledzenia odległości.

- długość ogniska elementów skupiających (ogniskowa);

Ogniskowa decyduje o średnicy i głębokości ogniska wiązki. Im większa jest ogniskowa tym większa jest średnica wiązki w ognisku i głębokość ogniska. Przy większej głębokości ogniska uzyskuje się prostsze cięte krawędzie. Przy cięciu metali o grubości powyżej 10 mm zalecana jest długość ogniskowej 200-250 mm. Dla materiałów o grubości od 0.25 do 10 mm stosuje się przeważnie ogniskową o długości 125 mm, a dla materiałów o mniejszej grubości ogniskową o długości 65 mm.

- prędkość cięcia;

Dla danej mocy wiązki laserowej i rodzaju ciętego materiału, prędkość cięcia jest odwrotnie proporcjonalna do grubości materiału. Istnieje określona gęstością mocy wiązki

grubość materiału, której nie można przeciąć przy nawet najmniejszej prędkości cięcia. Przy cięciu z tlenem (prze/, wypalanie) prędkość optymalna zależy od składu chemicznego materiałów na osnowie żelaza. Zbyt mała prędkość w stosunku do prędkości optymalnej uszkadza cięte krawędzie. Nadmierna prędkość cięcia prowadzi początkowo do gromadzenia się nacieków metalu i żużla przy dolnej krawędzi, a ostatecznie do braku przecięcia na całej grubości [4, 5].

3.2. Obróbka strumieniem AWJ, jakość obróbki

Technologia przecinania materiałów strumieniem wody pod bardzo wysokim ciśnieniem z dodatkiem ścierniwa, jest obecnie najnowocześniejszą i najszybciej się rozwijającą technologią cięcia i kształtowania dla prawie wszystkich materiałów metalowych i niemetalowych (niezależnie od ich rodzaju i grubości) w wielu branżach technicznych.

Wykorzystuje ona skoncentrowaną energię wąskiego strumienia czystej wody sprężonej do roboczego ciśnienia rzędu 4.000 bar (słup wody o wysokości 40 km). Czysta woda, wypływając z głowicy tnącej (ciśnienie wody spada do zera), osiąga bardzo dużą prędkość (ok. 1.000 m/sek) i wyzwolona energia kinetyczna wody skoncentrowana na małej powierzchni przecina materiał. Rolę ostrza tnącego pełni wypływający z głowicy tnącej pod wysokim ciśnieniem wąski strumień czystej wody lub wody ze ścierniwem. W przypadku abrazywnego przecinania twardych materiałów woda jest tylko nośnikiem piasku granatu, który przecina materiał ostrymi krawędziami ziaren.

Zależnie od parametrów urządzenia, posiada ono różne możliwości:

- dokładność cięcia poniżej 0,1 mm jest możliwa w zależności od materiału;
- żadnych zmian termicznych obrabianych materiałów (rozhartowanie);
- możliwość obróbki materiałów do grubości 200 mm;
- powierzchnia bez zarysowań i gładkie kanty cięcia;
- żadnych deformacji materiału w obszarze cięcia;
- możliwe wykonywanie elementów o niewielkich rozmiarach z wysoką jakością;
- od termicznych metod cięcia (laser, plazma) odróżnia ją możliwość przecinania blach ułożonych w pakiety.

Materiały przecinane są relatywnie szybko, a czas cięcia zależy od: twardości i grubości materiału, skomplikowania i długości linii cięcia, otworów i żądanej jakości powierzchni, parametrów technicznych urządzenia. Na jakość cięcia ma wpływ grubość materiału, szybkość cięcia i stopień zużycia części głowicy tnącej (dysza wodna i rurka fokusująca). Im grubszy materiał, tym strumień wody szybciej traci energię kinetyczną i aby utrzymać żadaną jakość cięcia, prędkość przesuwu głowicy tnącej jest mniejsza.

Orientacyjne porównanie prędkości cięcia blachy St37-2 o grubości 20 mm dla różnych technologii (cięcie wodą przy ciśnieniu 3.400 bar). Plazma - 1 m/min, Laser - 0,7 m/min, Palnik - 0,6 m/min, Woda - 0,1 m/min przedstawia tabela 4.

Tab. 4. Maksymalne prędkości cięcia AWJ w zależności od grubości i rodzaju materiału [6]

Materiał	IM*	5 mm	10 mm	15 mm	20 mm	25 mm	30 mm	50 mm	100 mm
Stal narzędziowa	2,61	678	370	236	169	128	102	48	18
Stal stopowa ss 304 (0H18N9)	3,19	833	454	290	208	159	125	60	22
Stal stopowa ss 17-7 (1H18N9)	3,34	872	475	303	217	166	131	63	23
Tytan	4,15	1,083	590	377	270	206	163	78	28
Aluminium	8,62	2,250	1,226	782	561	427	339	162	59
Granit	11,4	2,974	1,621	1,035	741	565	448	214	78
Włókno węglowe, tworzywa wielowarstwowe	15,01	3,915	2,135	1,363	975	744	590	281	103
Szkło	16,54	4,315	2,352	1,502	1,075	820	650	310	113
Marmur	17,91	4,672	2,547	1,626	1,164	888	704	336	123
Szkło organiczne - pleksiglas	18,8	4,904	2,674	1,707	1,222	932	739	352	129
Włókno szklane	22,8	5,948	3,243	2,070	1,482	1,131	896	427	156
Kevlar	23,75	6,195	3,378	2,156	1,543	1,178	934	445	163
Grafit	31	8,087	4,409	2,815	2,015	1,538	1,219	581	213
Ceramika	34	8,869	4,835	3,087	2,210	1,686	1,337	637	233

Prędkości cięcia (wg. Flow) w mm/min w zależności od materiału i grubości *IM - index materiałowy (podatność na obróbkę mechaniczną)

Dane orientacyjne w technologii abrazywnej, maksymalne (100%) prędkości cięcia (przy zastosowaniu maksymalnego ciśnienia pompy wodnej, wydatku wody i ilości ścierniwa). Dla normalnej prędkości cięcia stosuje się wskaźnik 80%, dla dobrej jakości cięcia wskaźnik 60% lub 40% a dla bardzo dobrej jakości cięcia 20%.

4. WYBÓR METODY OBRÓBKİ, WADY I ZALETY

O wyborze metody cięcia materiału decyduje wiele czynników. Wycinania elementów w technologii laserowej, ma swoje ograniczenia ale również i korzyści związane z łatwością cięcia oraz możliwością automatyzacji procesu. Metoda ta nie jest jednak jedyną technologią cięcia. Stanowi bezpośrednią konkurencję dla takich procesów, jak cięcie strumieniem wodno-ściernym, cięcie plazmowe czy tlenowe. W rezultacie rozwoju różnych technologii, wszystkie sposoby obróbki pozwalają na uzyskiwanie coraz lepszych jakościowo finalnych elementów (tabela 5).

Tab. 5. Porównanie różnych technologii cięcia [7]

Parametry	strumień wody	druk	laser	plazma	palnik tlenowy
Grubość materiału	++	++	-	+	++
Asortyment materiału	++	-	+	-	--
Jakość cięcia	+	++	+	-	-
Prędkość cięcia	+	--	++	+	+
Uniwersalność	++	-	--	+	-
Dokładność cięcia	++	++	+	-	--
Obróbka na gotowo	+	++	-	-	--
Ekologiczność	+	-	-	-	--
Elastyczność zastosowania	++	-	+	--	-
Czas obróbki	+	--	+	-	-

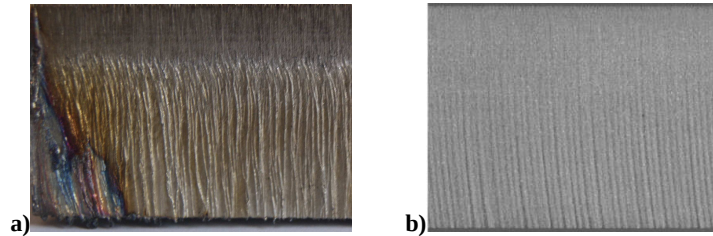
Oznaczenia: ++ bardzo dobra, + dobra, - dostateczna, -- zła

Proces cięcia laserowego zdeterminowany jest kilkoma czynnikami związanymi z konstrukcją maszyny, parametrami procesu, rodzajem ciętego materiału czy parametrami samego lasera.

Każdy laser obok swoich niewątpliwych pozytywnych właściwości może posiadać również pewne ograniczenia. Do najważniejszych zaliczyć można m.in. ograniczoną moc urządzenia. Pociąga to za sobą ograniczenie co do grubości ciętego materiału przy zachowaniu dobrej jakości. Aby uzyskiwać dobre rezultaty jakościowe, laser powinien posiadać odpowiedni zapas mocy.

W związku z tym, że w procesie cięcia laserowego mamy do czynienia z wydzielaniem ciepła należy spodziewać się, że może ono mieć wpływ na element obrabiany. W szczególności w przypadku, gdy promień lasera przez dłuższy okres pracuje na małej lokalnej powierzchni, może nastąpić odkształcenie elementów (przy cieńszych elementach) lub w przypadku grubszych materiałów lokalne utwardzenie powierzchniowe. Uniknięcie odkształcenia umożliwia znaczny wzrost prędkości kinematycznych w procesie obróbki, zmniejszając tym samym czas oddziaływania promienia na określony element. Zwiększona prędkość wycinania wymaga jednak szczególnej kontroli procesu cięcia, ze względu na jakość powierzchni obróbki.

Uwzględnienie energii oddziaływania na kształtowany materiał pozwala na otrzymanie powierzchni o określonej jakości (rys. 1).



Rys.1. Próbkę wyglądu powierzchni cięcia twardej stali wysokostopowej o grubości 25mm wyciętej: a)laserem, b)strumieniem wodno-ściernym [8]

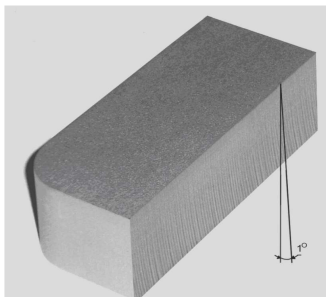
O jakości przecinania strumieniem wodno-ściernym decyduje wiele parametrów procesu jak: ciśnienie pompy, średnica dyszy, odległość wylotu dyszy od powierzchni przedmiotu, ilości i granulacji dodawanego ścierniwa, prędkość posuwu oraz grubość przedmiotu. Szerokość przecięcia zależy od średnicy dyszy, wynoszącej $0,15 \div 0,20$ mm, jej odległość i od powierzchni przecinanego materiału oraz prędkości posuwu. W zależności od tych parametrów szerokość przecięcia waha się od 0,5 do 1,5 mm.

Wąski strumień wody tworzy szczelinę cięcia o szerokości od ok. 0,5 mm przy cięciu czystą wodą do 1,5 mm przy cięciu wodą ze ścierniwem, przy której są zachowane tolerancje cięcia zgodne z normą DIN 7168. Materiały o grubości do 30 mm przecinane są z tolerancją $\pm 0,1$ mm, 30 - 60 mm z tolerancją $\pm 0,2$ mm, ze wzrostem grubości materiału tolerancja wykonania rośnie.

Na chropowatość powierzchni przecięcia duży wpływ wywierają prędkość posuwu, ciśnienie strumienia cieczy oraz grubość przecinanego materiału. Chropowatość powierzchni cięcia: standard ($V=60-80\%$ V_{max}) - $R_z=16$, cięcie wysokiej jakości ($V=20-40\%$ V_{max}) - $R_z=10$, cięcie bardzo wysokiej jakości - $R_z=6,3$. Przy zastosowaniu specjalnego oprzyrządowania można osiągnąć dokładność wykonania części poniżej $\pm 0,05$ mm przy grubości 20-50mm i chropowatość powierzchni o parametrze R_a rzędu 1,5 μm .

Pozycjonowanie głowicy tnącej wynosi ± 0.03 mm/m, powtarzalność ± 0.01 mm. Można wycinać detale o promieniu cięcia 1mm i otwory o średnicy powyżej 1mm. Można wycinać wyroby o skomplikowanych kształtach, bez błędów katowych krawędzi cięcia i z ostrymi narożnikami, szczególnie przy grubych blachach, z nachylonymi krawędziami, o małych promieniach krzywizn, bez konieczności wstępnego nawiercania i w znacznie krótszym czasie, osiągając przy tym wyższe dokładności części [6].

Podczas skrawania strumieniem wodno-ściernym, gdy skupiona wiązka uderza w powierzchnie następuje rozbieżność jej spójności. Wiązka poniżej górnej powierzchni zaczyna się rozpraszać powodując zniekształcenie powierzchni obrabianej w powstają niekorzystne odchyłki i dokładność wykonania spada. Wraz ze wzrostem grubości materiału obrabianego odchyłki również rosną. Odchyłkę tą nazywa się „stożkiem”. Powierzchnia przecięcia nie jest prostopadła do powierzchni czołowej, gdyż strumień odkształca się przy styku z przedmiotem obrabianym wywołując błędy kształtu (rys. 2).



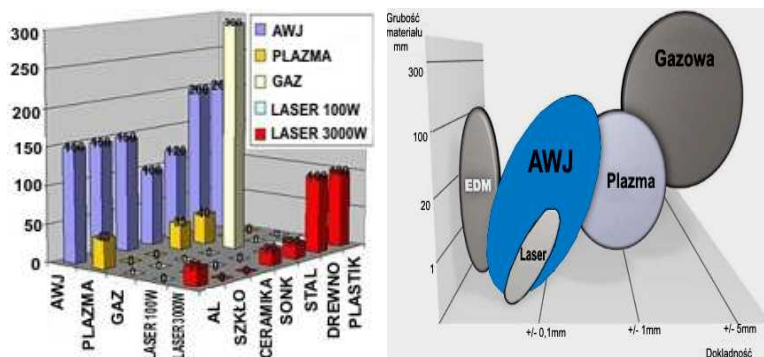
Rys. 2. Przedmiot ze stali wysokostopowej o grubości 25 mm przecięty strumieniem wodno-ściernym. Kąt odchylenia powierzchni cięcia około 1° [9]

Kształtowanie ceramiki strumieniem wodno-ściernym odbywa się z szybkością w dużym stopniu zależną od rodzaju i właściwości ceramiki. Bardzo twardą ceramikę obrabia się dość powoli i przy zastosowaniu specjalnych materiałów ściernych.

Mniejszym problemem jest obróbka kompozytów, która w dużym stopniu przypomina obróbkę włókno szklane. Abradżety są w stanie obrabiać takie materiały nie pozostawiając zadziorów i nie strzępiąc warstw materiału, jednocześnie zachowując lepszą jakość krawędzi.

Metoda obróbki strumieniem wodno-ściernym jest zalecana do kształtowania tytanu, który jest trudno obrabiać konwencjonalnie jak też laserem za względu na podatność tytanu na strefę wpływu ciepła wytwarzaną przez laser [10].

Wybór określonej metody obróbki powiązana jest z cechami charakterystycznymi technologii, oraz określonymi możliwościami (rys. 3).



Rys. 3. Grubość i dokładność cięcia różnymi sposobami [7]

Kształtowanie laserowe charakteryzuje:

- przede wszystkim duża precyzja cięcia, duża dokładność i dobra jakość cięcia;
- szeroki zakres materiałów poddających się procesowi cięcia laserowego: od metali niestopowych i wysokostopowych po tworzywa sztuczne, szkło oraz drewno i ceramikę;
- wycinanie laserowe przebiega bezstykowo, nie występuje zjawisko zużywania narzędzi, nie są potrzebne nakłady na ich przygotowywanie i przezbrajanie;

- nie trzeba określać ekonomicznej wielkości partii (możliwość wycinania zarówno jednej sztuki elementu jak i kilku tysięcy);
- bardzo szybka produkcja z cienkich, nie odblaskowych materiałów, takich jak cienka blacha stalowa;
- dokładność do $\pm 0.001''$ (± 0.025 mm) lub większa w przypadku cienkich materiałów;
- duży koszt inwestycyjny;
- ze względów jakościowych ograniczona jest grubość ciętej blachy.

Kształtowanie strumieniem wodno-ściernym charakteryzuje:

- kształtowanie części do znacznie większych grubości niż laser i praktycznie z każdego materiału, utrzymując tolerancje rzędu $\pm 0.003''$ do $\pm 0.005''$ (± 0.08 do ± 0.1 mm);
- może obrabiać odblaskowe, przewodzące i grubsze materiały takie jak stal nierdzewna i aluminium, miedź i mosiądz. możliwość cięcia twardych materiałów o dużej grubości;
- tnie bez topienia, zapewniając gładką, jednolitą powierzchnię o bardzo małych zadziórach czy wypaleniach;
- brak strefy wpływu ciepła, co może eliminować potrzebę operacji wtórnych w celu usunięcia i powoduje, że konwencjonalne operacje wtórne, takie jak rozwiercanie czy gwintowanie stają się łatwiejsze do wykonania;
- wysoka jakość ciętych krawędzi - nie ma ostrych krawędzi, zadziórów.

5. PODSUMOWANIE

Wybór technologii obróbki materiałów twardych jest zależny od wielu czynników, wymaga uwzględnienia:

- właściwości mechanicznych oraz niektórych właściwości fizycznych materiału obrabianego, co wynika z różnej budowy materiałów kompozytowych, ceramicznych czy metalowych;
- wymaganych dokładności wymiaru, jakości powierzchni, wielkości wyrobu;
- skłonności materiału do zmian struktury i właściwości w przypadku wystąpienia strefy cieplnej i zastosowania w takim przypadku do kształtowania materiału strumienia wodno-ściernego;
- odpowiednich parametrów technologii, pamiętając, że chropowatość powierzchni jako główny czynnik charakteryzujący obróbkę, podczas przecinania grubszych materiałów jest zróżnicowany z wysokością i jest szczególnie istotny przy większych wartościach posuwu. Jednak obniżanie wartości posuwu tylko do pewnych granic skutecznie obniża chropowatość wydłużając czas obróbki.

4. BIBLIOGRAFIA

- [1] Sobczak J., Wojciechowski A.: Tendencje rozwojowe metalowych materiałów kompozytowych w budowie samochodu, Skrypt ITS, Warszawa 1999, 29.
- [2] Wojciechowski A., Pietrzak K., Sobczak J.: Ocena własności tribologicznych Kompozytowych tarcz hamulcowych. KOMPOZYTY (COMPOSITES) 2(2002)4.

- [3] Wojciechowski A., Sobczak J.: Badanie odporności na zużycie aluminiowych materiałów kompozytowych przeznaczonych na tarcze hamulcowe. KOMPOZYTY (COMPOSITES) 1(2001)2.
- [4] Dobrzański L., A.: Metaloznawstwo z podstawami nauki o materiałach. WNT, Warszawa 1998.
- [5] Brzozowski A.: Jakość warstwy wierzchnie blach ciętych laserowo. Wydawnictwo Stal & Nowe Technologie nr: 3-4.
- [6] Stryjecki A.: Nowoczesne wycinarki wodne w branży metalowej. BIURO BRANŻOWE WATERJET - STAL Metale & Nowe Technologie, NR 5-6/2008.
- [7] http://www.4metal.pl/firmy/biuro-branzowe-waterjet/?artykul_id=13171
- [8] Mazurkiewicz A.: Technologie specjalne kształtowania materiałów. Wyd. PR, Radom 2009.
- [9] Mazurkiewicz A.: Czynniki wpływające na błąd kształtu i chropowatość powierzchni stali po cięciu strumieniem wodno-ściernym. Inżynieria materiałowa, nr 6/166, 2008.
- [10] <http://www.jetsystem.pl>