

Mgr inż. Agnieszka SKOCZYŁAS;
dr hab. inż. Kazimierz ZALESKI, prof. PL (Politechnika Lubelska):

FREZOWANIE CZOŁOWE STALI C45 PO CIĘCIU LASEREM NARZĘDZIAMI O OSTRZACH Z REGULARNEGO AZOTKU BORU

Streszczenie

Prezentowane wyniki badań frezowania czołowego – narzędziami o ostrzach z regularnego azotku boru – warstw charakteryzujących się prążkowaną strukturą, powstałych w procesie cięcia wiązką lasera. Poddano analizie składowe siły skrawania występujące podczas frezowania czołowego oraz chropowatość obrabianej powierzchni. W badaniach wykorzystano próbki ze stali C45. Głębokość skrawania była dobierana w takim zakresie, aby usunąć tylko część warstwy utwardzonej, która powstała w procesie cięcia wiązką laserową.

Słowa kluczowe: *frezowanie czołowe, cięcie laserem*

FACE MILLING OF C45 STEEL, WITH USED TOOLS CUBIC BORON NITRIDE AFTER LASER CUTTING

Abstract

The article presents the results of milling layers, characterized with a “stria” structure, formed during laser cutting. The process was conducted with blades made of cubic boron nitride. Surface roughness and components of the cutting force, occurring during face milling were analyzed. The C45 steel samples were used in the study. The depth of cut was selected in such a way as to remove only a part of the layer formed by cutting with a laser beam.

Keywords: *face milling, laser cutting*

FREZOWANIE CZOŁOWE STALI C45 PO CIĘCIU LASEREM NARZĘDZIAMI O OSTRZACH Z REGULARNEGO AZOTKU BORU

Agnieszka SKOCZYLAS¹, Kazimierz ZALESKI¹

1. WPROWADZENIE

Cięcie jest najczęściej pierwszą operacją, od której zaczyna się proces technologiczny wytwarzania danego elementu. Obecnie do procesu cięcia wykorzystywane są metody termiczne, do których należy zaliczyć cięcie laserem. Oddziaływanie wiązki lasera o dużej gęstości energii, w sposób ciągły lub impulsowy, powoduje powstanie niezgodności na powierzchni i krawędzi cięcia wycinanego elementu [6]. Niezgodności są to nieprawidłowości lub odchylenia od określonego kształtu lub położenia linii cięcia. Należy wyróżnić następujące grupy niezgodności: na krawędzi cięcia, na powierzchni cięcia, żużel, pęknięcia oraz inne niezgodności [11].

Następstwem procesu cięcia laserem jest powstanie strefy wpływu ciepła (SWC) w otoczeniu szczeliny cięcia. Strefa ta charakteryzuje się zróżnicowaną twardością oraz zmienioną strukturą w odniesieniu do materiału rodzimego. Struktura powstała w wyniku procesu cięcia laserem jest efektem procesu topnienia materiału i powtórnego krzepnięcia [5]. Zróżnicowana twardość może wynikać z różnej szybkości odprowadzenia ciepła [2]. W celu przeprowadzenia efektywnej obróbki wykończeniowej należy poznać właściwości tego obszaru i zastosować odpowiednią technologię. W czasie procesu cięcia wiązka lasera podczas zagłębiania się w materiał ulega odchyleniu od prostopadłości. Występowanie tego niepożądanego zjawiska powoduje zwiększenie nadatku na kolejne operacje technologiczne [4].

W wyniku oddziaływania na przedmiot przecinany koherentnej wiązki (źródła ciepła), dochodzi do zahartowania stref przykrawędziowych, dlatego też obróbkę frezowaniem utwardzonej warstwy można porównać do frezowania stali zahartowanej. W pracy [7] analizowano wpływ materiału ostrza narzędzi na wybrane właściwości

¹ Politechnika Lubelska, Wydział Mechaniczny, Katedra Podstaw Inżynierii Produkcji, ul. Nadbystrzycka 36, 20-618 Lublin

warstwy wierzchniej zahartowanej stali AISI A2. Narzędzia o ostrzach z regularnego azotku boru (CBN) pozwalają na uzyskanie powierzchni o mniejszej chropowatości, mniejszej ilości uszkodzeń oraz niższym przyroście twardości warstwy wierzchniej. Narzędzia wykonane z CBN, w porównaniu do narzędzi węglkowych, pozwalają na wydajniejszą obróbkę. Dla narzędzia z CBN przy $v_c = 470$ m/min uzyskano parametr chropowatości $S_a = 0,39 \mu\text{m}$, podczas gdy dla węglkowego narzędzia przy $v_c = 120$ m/min - $S_a = 0,58 \mu\text{m}$ [7].

Amin i inni [1] zauważyli, że największy wpływ na jakość powierzchni stali hartowanej poddanej obróbce frezowaniem ma posuw na ostrze, prędkość skrawania oraz wstępne podgrzewanie przedmiotu obrabianego. Wstępne podgrzanie materiału obrabianego pozwoliło na uzyskanie parametru chropowatości R_a o wartości poniżej $0,4 \mu\text{m}$, co odpowiada jakości powierzchni po szlifowaniu. Badania prowadzone w pracy [9] wykazały, że najkorzystniejsze wyniki jakościowe uzyskano podczas obróbki z dużymi wartościami prędkości skrawania i głębokości, stosując równocześnie niskie wartości posuwu na ostrze.

Siła skrawania, jako użytkowy wskaźnik skrawalności, pozwala na identyfikację procesu obróbkowego. W pracy [10] analizowano wpływ szerokości frezowania na poszczególne składowe siły całkowitej F w procesie frezowania obwodowego stali zahartowanej. Zauważono wzrost składowej posuwowej F_f oraz składowej normalnej do siły posuwowej F_{fN} wraz ze wzrostem szerokości frezowania a_e . Uzyskane wyniki badań są zbieżne z rezultatami przedstawionymi w pracy [8]. C. K. Toh zauważył, że wraz ze wzrostem głębokości skrawania generowane są wyższe obciążenia termiczne, co prowadzi do zużycia narzędzia w wyniku szoku termicznego. Konsekwencją zużycia narzędzia jest wzrost sił. Składowa normalna do siły posuwowej F_{fN} jest najbardziej „wrażliwa” na zużycie narzędzia.

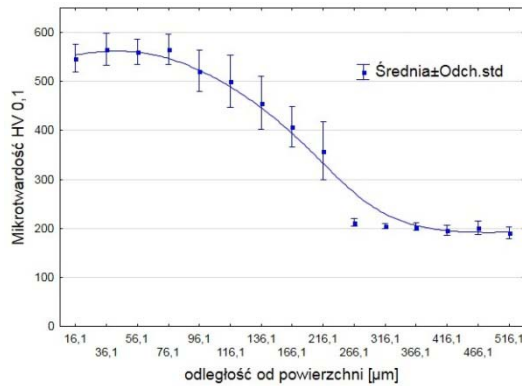
Jak już wspomniano, warstwa wierzchnia przedmiotów wycinanych laserem charakteryzuje się większą twardością w stosunku do materiału rdzenia. Jednocześnie stan powierzchni wycinanych elementów jest, na ogół, niezadawalający, co wiąże się z potrzebą przeprowadzenia obróbki wykończeniowej. Podjęto badania nad frezowaniem wykończeniowym powierzchni po cięciu laserem za pomocą frezów składanych z płytkami o ostrzach z CBN, dobierając głębokość skrawania w taki sposób, aby usunąć tylko część warstwy utwardzonej.

2. CEL PRACY

Celem określenia grubości warstwy, jaka może być usunięta w procesie frezowania przeprowadzono pomiary mikrotwardości na zglądach poprzecznych próbek po cięciu laserem. Pomiary mikrotwardości wykonano metodą Vickersa za pomocą mikrotwardościomierza Leco LM 700AT przy masie obciążnika równej $= 100$ g (HV 0,1). Rezultaty tych badań przedstawiono na rysunku 1. Szerokość warstwy utwardzonej po procesie cięcia laserem wynosi ponad $300 \mu\text{m}$. W wyniku cięcia laserem mikrotwardość warstwy wierzchniej w strefie przykrawędziowej wzrasta ponad dwukrotnie, następnie powoli spada aby osiągnąć wartość mikrotwardości rdzenia.

Przeprowadzone badania potwierdzają słuszność przyjętej koncepcji doboru głębokości skrawania.

Celem badań była ocena wpływu parametrów frezowania próbek ze stali C45 wycinanych laserem na siły skrawania oraz chropowatość powierzchni obrabianej.



Rys. 1. Rozkład mikrotwardości stali C45 po cięciu laserem

3. METODYKA BADAŃ

Badania przeprowadzono na próbkach prostopadłościennych o wymiarach 5 mm x 8 mm x 100 mm ze stali C45, które wykonano przy użyciu wycinarki laserowej LASER Amada 3000 W, stosując parametry standardowe. Jako gaz roboczy został wykorzystany tlen. Celem redukcji stanu naprężeń, wprowadzonych przez obróbkę poprzedzającą cięcie laserem, arkusz blachy poddano wyżarzaniu ujednorodniającemu w temperaturze 860 °C i czasie 30 minut.

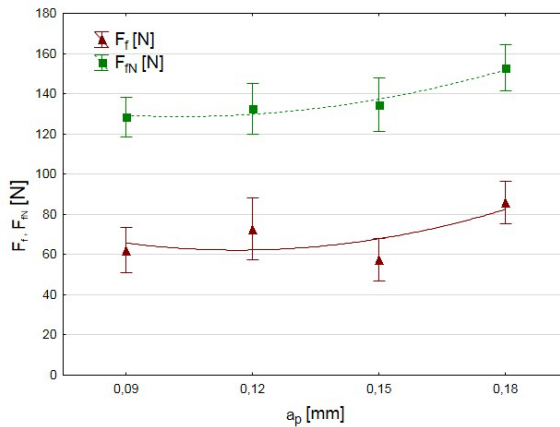
Proces frezowania czołowego został przeprowadzony na pionowym centrum FV – 580a, znajdującym się w Katedrze Podstaw Inżynierii Produkcji Politechniki Lubelskiej. Jako narzędzie użyto frez dwuostrzowy firmy Seco (oznaczenie R217.21-1820.0-R100.2A) o średnicy 20 mm z płytkami CBN (218.19-100T-MD08-LF, CBN 200). Podczas frezowania została zastosowana ciecz chłodząco-smarująca Mobil Cut. Badane próbki były zamocowane w imadle, w taki sposób, aby powierzchnia obrabiana zajmowała położenia prostopadłe do osi wrzeciona obrabiarki. Imadło było posadowione na stole obrabiarki. Wybór odmiany frezowania wynikał z kształtu płytki skrawającej, była to płytka trygonalna. Proces frezowania został zrealizowany dla następujących zakresów parametrów: prędkość skrawania $v_c = 102 \div 222$ m/min, głębokość skrawania $a_p = 0,09 \div 0,18$ mm, posuw na ostrze $f_z = 0,05 \div 0,17$ mm/ostrze.

Pomiary chropowatości powierzchni i topografii wykonano za pomocą urządzenia T8000RC 120-140 firmy Hommel – Etamic. Pomiary zostały wykonane w kierunku prostopadłym do śladów obróbkowych. Powierzchnia po cięciu laserem charakteryzuje się obecnością dwóch stref o zróżnicowanej chropowatości, dlatego też pomiary dokonano w strefie wejścia i w strefie wyjścia promienia lasera. Taki sam schemat przyjęto dla próbek frezowanych.

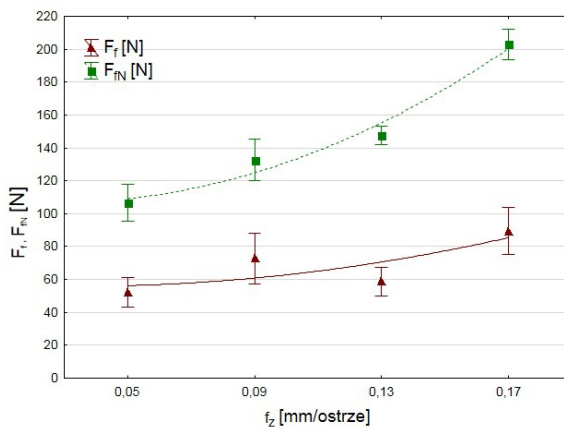
Podczas procesu frezowania dokonano pomiaru składowych sił skrawania F_x , F_y , F_z przy wykorzystaniu siłomierza 9257B firmy Kistler. Składowa F_x odpowiada składowej posuwowej F_f , natomiast F_y odpowiada składowej normalnej do siły posuwowej F_{fN} , a składowa F_z to siła bierna F_p .

4. WYNIKI

Przed przystąpieniem do prób frezowania zostały dokonane pomiary chropowatości powierzchni po cięciu laserem. Parametr R_a dla strefy wejścia wiązki lasera wynosił $4,45 \mu\text{m}$ natomiast dla strefy wyjścia $6,32 \mu\text{m}$. Różnica chropowatości spowodowana jest występowaniem w strefie wyjścia prążków krzywoliniowych, powstających wskutek odchylenia od zamierzonego toru przemieszczającej się wiązki lasera.



Rys. 2. Siły F_f i F_{fN} w funkcji głębokości skrawania a_p ($f_z = 0,09 \text{ mm/ostre}$, $v_c = 142 \text{ m/min}$)

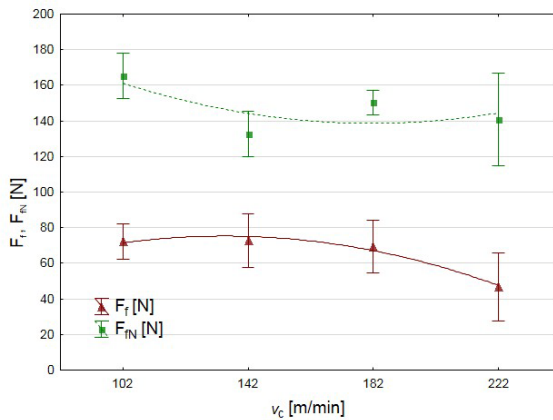


Rys. 3. Siły F_f i F_{fN} w funkcji posuwu na ostre f_z ($a_p = 0,12 \text{ mm}$, $v_c = 142 \text{ m/min}$)

Na rys. 2 i 3 przedstawiono wpływ głębokości skrawania oraz posuwu na ostrze na siły skrawania. Zarówno wzrost głębokości skrawania jak i posuw na ostrze powoduje zwiększenie pola przekroju poprzecznego warstwy skrawanej, co powinno wpłynąć na wzrost sił skrawania.

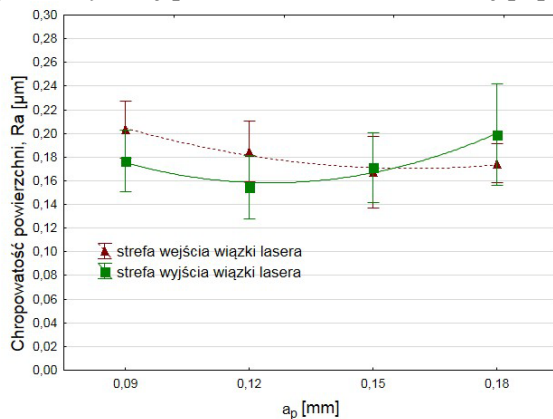
Z przedstawionych wykresów wynika, że w zakresie małych wartości parametrów a_p i f_z wpływ ten jest mało widoczny, co prawdopodobnie związane jest z dużymi odkształceniami sprężystymi materiału obrabianego.

Wzrost prędkości skrawania v_c (rys. 4) powoduje zmniejszenie składowych sił. Składowa posuwowa F_f jest bardziej „czuła na zmiany” warunków obróbki. Zaistniałe zjawisko można przypisać procesowi termicznego wyżarzania materiału obrabianego, które ma miejsce dla większych wartości prędkości skrawania, spowodowane wyższą temperaturą w strefie obróbkowej [3].



Rys. 4. Siły F_f i F_{IN} w funkcji prędkości skrawania v_c ($a_p = 0,12$ mm, $f_z = 0,09$ mm/ostrze)

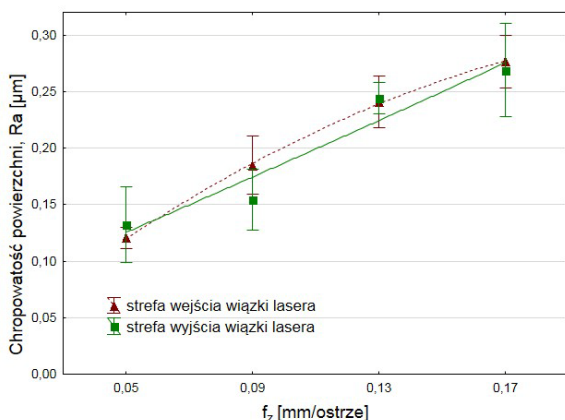
Wyniki badań wskazują, że na skutek zrealizowanej obróbki frezowaniem nastąpiła poprawa struktury geometrycznej powierzchni ukształtowanej poprzez cięcie laserem.



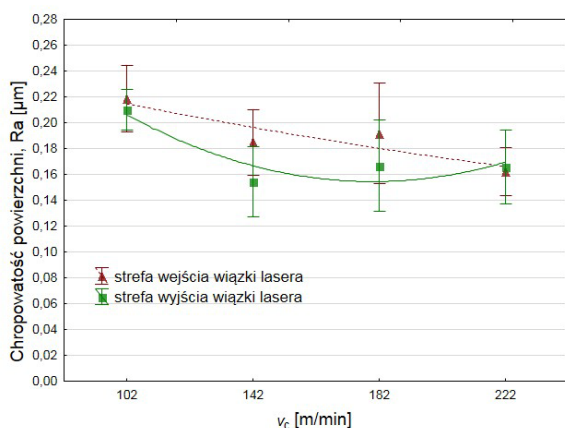
Rys. 5. Parametr chropowatości powierzchni R_a w funkcji głębokości skrawania a_p ($f_z = 0,09$ mm/ostrze, $v_c = 142$ m/min)

Rysunek 5 przedstawia wpływ głębokości skrawania a_p na chropowatość powierzchni dla strefy wejścia i wyjścia wiązki lasera. Widoczny jest niewielki spadek parametru R_a w zakresie $a_p = 0,09 \div 0,12$ mm, dla większych głębokości skrawania chropowatość powierzchni wzrasta, co spowodowane jest zwiększeniem sił skrawania. Większa wartość parametru chropowatości R_a dla małej głębokości skrawania wynika najprawdopodobniej z większego udziału odkształceń sprężystych warstwy wierzchniej, występujących w procesie skrawania cienkiej warstwy. Z rysunku 5 nie wynika jednoznacznie, aby głębokość skrawania a_p miała wpływ na chropowatość powierzchni.

Wzrost posuwu na ostrze f_z powoduje powstanie śladów mikronierówności po frezowaniu w większej odległości, co powoduje zwiększenie chropowatości powierzchni (rys. 6).



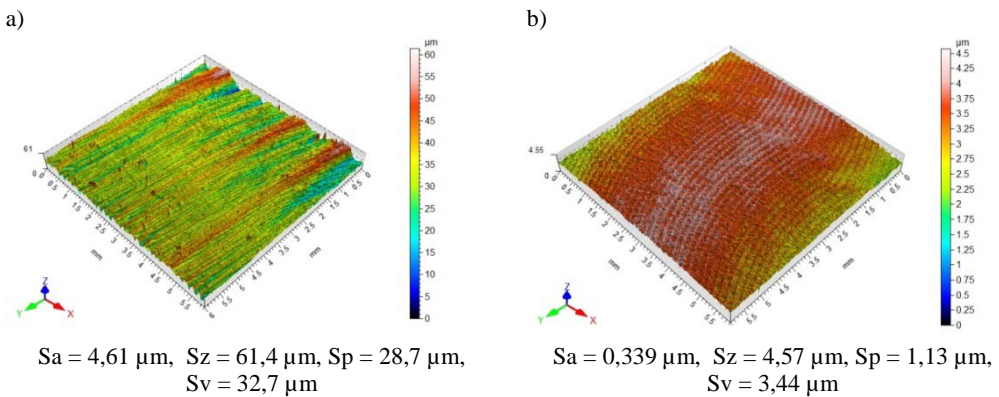
Rys. 6. Parametr chropowatości powierzchni R_a w funkcji posuwu na ostrze f_z ($a_p = 0,12$ mm, $v_c = 142$ m/min)



Rys. 7. Parametr chropowatości powierzchni R_a w funkcji prędkości skrawania v_c ($a_p = 0,12$ mm, $f_z = 0,09$ mm/ostrze)

Analizując wpływ prędkości skrawania na chropowatość powierzchni można zauważyć, że następuje spadek parametru R_a wraz ze wzrostem prędkości v_c (rys. 7). Spowodowane jest to mniejszymi siłami występującymi podczas frezowania oraz prawdopodobnie mniejszą wartością amplitudy drgań, której wartość maleje wraz ze wzrostem prędkości skrawania [8].

Rozważając topografię po frezowaniu czołowym powierzchni po cięciu laserem (rys. 8) można zauważyć wyraźną poprawę jakości powierzchni. Powierzchnia po cięciu laserem charakteryzuje się prążkowaną strukturą, w której występują liczne zagłębienia i wzniesienia. Na powierzchni można wyróżnić dwie strefy o zróżnicowanej chropowatości i różnym układzie prążków. Jest to strefa wejścia i strefa wyjścia wiązki lasera. Po obróbce frezowaniem na obrabianej powierzchni widoczne są ślady mikronierówności powstające w wyniku odwzorowania ostrza narzędzia.



Rys. 8. Topografia powierzchni po: a) cięciu laserem, b) cięciu laserem i frezowaniu czołowym ($v_c = 142 \text{ m/min}$, $a_p = 0,12 \text{ mm}$, $f_z = 0,09 \text{ mm/ostre}$)

5. PODSUMOWANIE

W pracy badano wpływ parametrów technologicznych podczas frezowania czołowego utwardzonych warstw, powstałych w wyniku cięcia laserem, za pomocą narzędzi o ostrzach z regularnego azotku boru na siły występujące podczas obróbki i chropowatość powierzchni. Następujące wyniki podsumowują rezultaty przeprowadzonych badań.

Wzrost posuwu na ostrze f_z oraz głębokości skrawania a_p powodują wzrost składowych siły skrawania.

Wzrost prędkości skrawania v_c powoduje spadek wartości siły F_f i F_{IN} .

Głębokość skrawania i prędkość skrawania nie wpływają w sposób znaczący na chropowatość powierzchni. W przypadku wzrostu posuwu, zgodnie z oczekiwaniem, nastąpił wzrost parametru R_a .

Po frezowaniu zostały wyeliminowane różnice chropowatości powierzchni dla strefy wejścia i strefy wyjścia wiązki lasera.

Obróbka frezowaniem pozwoliła na wyeliminowanie negatywnych skutków procesu cięcia laserem. Można oczekiwać, że pozostawienie części warstwy utwardzonej po procesie cięcia laserem, wpłynie korzystnie na właściwości użytkowe wytwarzanych elementów.

LITERATURA

1. AMIN A. K. M. N., DOLAH A. B., MAHMUND M. B., LAJIS M. A.: *Effects of workpiece preheating on surface roughness, chatter and tool performance during end milling of hardened steel D2*. Journal of Materials Processing Technology, 2008, 201, 466–470.
2. BYLICA A., BOCHNOWSKI W., WIĘCEK G.: *Naprężenia własne w stali C45 naddtapianej laserowo*. Archiwum Odlewnictwa, 2006, 19, 43–48.
3. ÇALIŞKAN H., KÜÇÜKKÖSE M.: *The effect of aCN/TiAlN coating on tool wear, cutting force, surface finish and chip morphology in face milling of Ti6Al4V superalloy*. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2015, 50, 304–312.
4. FELDSHTEIN E., KOMAN I.: *Wycinanie laserowe elementów o dużej grubości w blachach ze stali nierdzewnej*. Przegląd Mechaniczny, 2010, 4, 13–18.
5. IORDANOVA I., ANTONOV V., GURKOVSKY S.: *Changes of microstructure and mechanical properties of cold-rolled low carbon steel due to its surface treatment by Nd: glass pulsed laser*. Surface & Coatings Technology, 2002, 153, 267–276.
6. KLIMPEL A.: *Technologie laserowe*. Gliwice, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, 2012.
7. PU Z., SINGH A.: *High speed ball nose milling of hardened AISI A2 tool steel with PCBN and coated carbide tools*. Journal of Manufacturing Processes, 2013, 15, 467–473.
8. TOH C. K.: *Static and dynamic cutting force analysis when high speed rough milling hardened steel*. Materials and Design, 2004, 25, 41–50.
9. VIVANCOS J., LUIS C. J., ORITZ J. A., GONZALEZ H. A.: *Analysis of factors affecting the high-speed side milling of hardened die steels*. Journal of Materials Processing Technology, 2005, 162–163, 696–710.
10. WOJCIECHOWSKI S.: *The investigation of cutting forces during cylindrical milling of hardened steel*. Archiwum Technologii Maszyn i Automatyzacji, 2011, 31, 77–86.
11. PN-EN ISO 12584: 2004. *Niezgodności w procesach cięcia płomieniowego tlenowo-gazowego, cięcia wiązką laserową i cięcia plazmowego*. Terminologia.