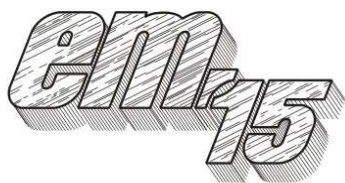


XII Międzynarodowa Konferencja - Electromachining 2015



UNIwersytet Technologiczno-Przyrodniczy
Wydział Inżynierii Mechanicznej, Zakład Inżynierii Produkcji
STOWARZYSZENIE INŻYNIERÓW I TECHNIKÓW
MECHANIKÓW POLSKICH – Koło Uczelniane UTP

85-789 Bydgoszcz, ul. Kaliskiego 7
tel. (0 52) 340-87-47, fax. (0 52) 340-82-45,
e-mail: tomasz.paczkowski@utp.edu.pl

Konstituowanie warstwy wierzchniej Inconelu 718 po wycinaniu elektroerozyjnym

Surface layer of Inconel 718 after WEDM process

DOROTA ONISZCZUK – ŚWIERCZ¹
RAFAŁ ŚWIERCZ²
LUCJAN DĄBROWSKI³
MICHAŁ MARCZAK⁴

Stopy na bazie niklu (np. Inconel 718) są często wykorzystywane w przemyśle lotniczym ze względu na dobre właściwości mechaniczne oraz chemiczne przy pracy w podwyższonej temperaturze. Ze względu na warunki, w jakich pracują elementy wykonane z omawianego stopu, istotny jest wynikowy stan warstwy wierzchniej obrabianych przedmiotów. W artykule przedstawiono wpływ parametrów procesu WEDM na konstituowanie warstwy wierzchniej dla Inconelu 718.

SŁOWA KLUCZOWE: Inconel 718, warstwa wierzchnia, WEDM.

Inconel 718 C is widely used in the aerospace industry due to their good mechanical and chemical properties at high temperatures. This material is especially used as turbine disk, blades, combustors, etc. These parts are working in difficult conditions that very important is the state of the surface layer of the workpiece after WEDM process. The paper presents an analysis of the influence of cutting parameters on selected components of the surface layer after WEDM.

KEYWORDS: Inconel 718, surface layer, WEDM.

WSTĘP

Rozwój technologii obróbki elektroerozyjnej powoduje wzrost jej udziału w procesach kształtowania oprzyrządowana technologicznego i przedmiotów z materiałów trudnoobrabialnych, począwszy od wytwarzania gniazd form

wtryskowych, matryc kuźniczych, stempli czy też części lotniczych. Badania prowadzone przez naukowców wykazały, że istnieją bardzo silne związki pomiędzy własnościami eksploatacyjnymi podzespołów maszyn i urządzeń a stanem warstwy wierzchniej (WV) konstituowanej po obróbce. Mają one wpływ między innymi na: procesy tarcia i zużycia elementów współpracujących ze sobą, odkształcenia i wytrzymałość zmęczeniową, stykową, odporność na działanie korozyjne, aktywność drganiową, jakość nanoszenia i utrzymywanie się powłok, właściwości aero- i hydromechaniczne [3, 4, 7].

Jednym z podstawowych czynników determinujących zastosowanie obróbki elektroerozyjnej w kształtowaniu przedmiotów, jest ich wynikowy stan warstwy wierzchniej, który obejmuje cechy stereometryczne powierzchni jak również właściwości mikrostruktury. Właściwości przedmiotu powstającego w trakcie jego produkcji, są skutkiem złożonych zjawisk fizycznych występujących w procesie wycinania elektroerozyjnego. W wyniku oddziaływania wyładowań elektrycznych konstituowany jest charakterystyczny dla badanego procesu stan warstwy wierzchniej, w którym następują przemiany fazowe. Utworzona nowa struktura metalograficzna charakteryzuje się niejednorodnością i licznymi defektami w postaci mikropęknięć [8]. W ostatnich latach zauważyć można znaczny wzrost zastosowań stopów wysoko - temperaturowych w przemyśle lotniczym, samochodowym i energetycznym. Jednym z przykładów z omawianej grupy materiałów są stopy oparte na bazie niklu (tzw. superstopy), do których zaliczany jest Inconel 718 składający się głównie z następujących pierwiastków: niklu i kobaltu (50 – 55%), chromu (17 – 21%), niobu i tantalu (4,75 – 5,5%) oraz innych (molibdenu, tytanu, glinu, żelaza). Inconel 718 charakteryzuje się zachowaniem właściwości wytrzymałościowych nawet w wysokich temperaturach. Jednak niska

¹dr inż. Dorota Oniszczyk - Świercz (doo@meil.pw.edu.pl)

²dr inż. Rafał Świercz (rsw@meil.pw.edu.pl)

³dr hab. inż. Lucjan Dąbrowski (ld@meil.pw.edu.pl)

⁴mgr inż. Michał Marczak (mim@meil.pw.edu.pl)

przewodność cieplna powoduje, że jest to materiał trudny w obróbce. Ciepło powstające w strefie ścinania ma znaczący wpływ na wydajność obróbki oraz jakość obrabianej powierzchni. Generowane ciepło zazwyczaj zmienia mikrostrukturę stopu i powoduje powstanie naprężeń, czego skutkiem jest powstanie mikropęknięć oraz mikrostrukturalnych zmian podczas obróbki. Szacuje się, że ze stopów opartych na osnowie niklu wykonuje się ponad połowę elementów stosowanych w branży lotniczej, szczególnie tych komponentów sekcji gorących silników gazowych takich jak: elementy turbiny, łopatki, zespół komory spalania [1, 4, 6].

Celem pracy jest opracowanie modeli matematycznych procesu wycinania elektroerozyjnego (WEDM) Inconelu 718, które pozwolą na dobór najkorzystniejszych parametrów i warunków obróbki w zależności od pożądanych cech jakościowych warstwy wierzchniej.

Metodyka badań

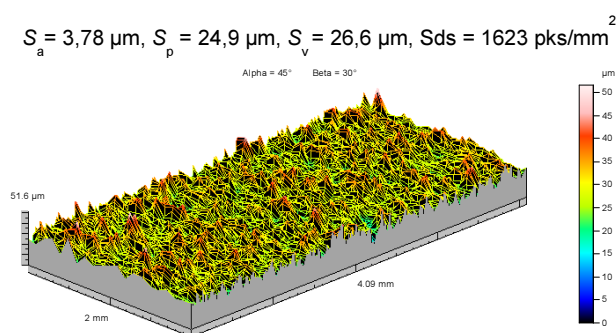
Badania doświadczalne wpływu parametrów obróbki na stan warstwy wierzchniej dla Inconelu 718 przeprowadzono na wycinarkę elektroerozyjnej Robofil 440. W przeprowadzonym eksperymencie zastosowano elektrodę roboczą (druć mosiężny) o średnicy 0,25 mm. Obróbce poddano Inconel 718. Wycinano kostki prostopadłościowe o wymiarach: 10 mm x 10 mm x 10 mm. Proces obróbki odbywał się w pełnym zanurzeniu (półfabrykat, z którego wycinane były kostki był zanurzony) w dielektryku – wodzie demineralizowanej, dejonizowanej. Badania doświadczalne przeprowadzono na podstawie eksperymentu planowanego Hartley'a rotabilnego, pięciopoziomowego, trójparametrowego. Zastosowanie planowanego eksperymentu w badaniach miało na celu zbadanie jednoczesnego wpływu kilku parametrów obróbki na wybrane parametry stanu warstwy wierzchniej, tj. chropowatość powierzchni, strukturę metalograficzną oraz mikrotwardość. Na podstawie przeprowadzonej analizy literatury oraz badań własnych zastosowano w planowanym eksperymencie następujące parametry wejściowe: czas impulsu (t_{on}) w zakresie: 0,6 - 1,8 μ s, ciśnienie podawania dielektryka (p) w zakresie: 0,04 - 0,32 MPa oraz prędkość przewijania elektrody roboczej (WS) w zakresie: 2 - 10 m/min. Zakresy użytkowe wartości parametrów doświadczalnych w planowanym eksperymencie dobrano na podstawie przeprowadzonej analizy tablic technologicznych dla: przyjętego rodzaju materiału o wysokości cięcia 10 mm, pojedynczego przejścia oraz na podstawie badań wstępnych, które uwzględniały stabilność obróbki oraz brak zerwań drutu.

Tabela 1. Plan eksperymentu

nr. próby	Plan eksperymentu					
	$x_1 - t_{on}$ [μ s]	$x_2 - WS$ [m/min]	$x_3 - p$ [MPa]			
1	-1	0,8	-1	3,6	-1	0,1
2	-1	0,8	-1	3,6	1	0,26
3	-1	0,8	1	8,4	-1	0,1
4	-1	0,8	1	8,4	1	0,26
5	1	1,6	-1	3,6	-1	0,1
6	1	1,6	-1	3,6	1	0,26
7	1	1,6	1	8,4	-1	0,1
8	1	1,6	1	8,4	1	0,26
9	-1,68	0,6	0	6	0	0,18
10	1,68	1,8	0	6	0	0,18
11	0	1,2	-1,68	2	0	0,18
12	0	1,2	1,68	10	0	0,18
13	0	1,2	0	6	-1,68	0,04
14	0	1,2	0	6	1,68	0,32
15	0	1,2	0	6	0	0,18
16	0	1,2	0	6	0	0,18

Chropowatość powierzchni

Pomiaru struktury geometrycznej powierzchni (SGP) wyciętych próbek dokonano przy użyciu wysokiej klasy (pierwszej) profilometru skanującego FORMTALYSURF Series 2 firmy Taylor – Hobson. Na podstawie przeprowadzonych pomiarów stwierdzono, iż struktura geometryczna powierzchni po obróbce WEDM ma charakter losowy o dużej gęstości powierzchniowej miejscowych wzniesień (rys. 1). Losowość struktury związana jest z fizyką zjawiska usuwania materiału w procesie erozji oraz nierównomierną ilością występowania wyładowań elektrycznych na całej długości elektrody roboczej. W miejscu wyładowania powstaje krater, część roztopionego metalu „wyrzucana” jest do szczeliny międzyelektrodowej i usuwana wraz z przepływającym dielektrykiem. Roztopiony metal, który nie został usunięty z powierzchni krateru, ponownie na nim zastyga, tworząc cienką warstwę (rzędu kilku – kilkunastu mikrometrów) o zmienionych własnościach w stosunku do materiału rdzenia. Podczas obróbki występują setki wyładowań elektrycznych, które tworzą charakterystyczną dla procesu WEDM strukturę geometryczną powierzchni (SGP), formowaną poprzez nakładanie się kraterów z pojedynczych wyładowań [2, 3, 7].



Rys. 1. Topografia powierzchni po obróbce WEDM uzyskana przy: $t_{on} = 1,8 \mu$ s, $WS = 6$ m/min, $p = 0,18$ MPa

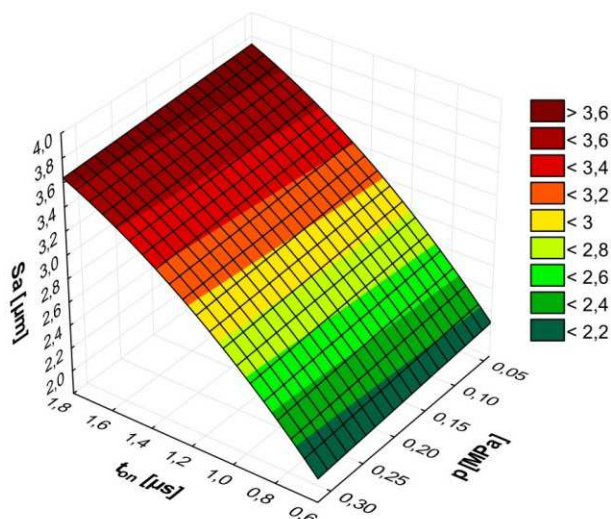
Na podstawie przeprowadzonych pomiarów SGP stwierdzono, iż w zależności od zastosowanych parametrów obróbki następuje zmiana struktury geometrycznej powierzchni a w szczególności następuje zmiana parametrów wysokościowych, dlatego w dalszej analizie struktury geometrycznej powierzchni skoncentrowano się na parametrze chropowatości S_a . Na podstawie otrzymanych wyników badań w programie Statistica utworzono statystyczny model matematyczny opisujący wpływ czynników wejściowych na wybrany parametr struktury geometrycznej powierzchni. Wyniki aproksymowano wielomianową funkcją regresji. Na poziomie istotności $\alpha = 0,05$ uzyskano wysoką wartość współczynnika korelacji wielokrotnej R , która określa jakość dopasowania funkcji do wyników pomiarów [5]. Wybraną zależność regresyjną przedstawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Równania regresji opisujące parametr SGP

Równanie regresji	R	F/F _{kr}
$S_a = 0,79 + 2,48 \cdot t_{on} - 0,47 \cdot t_{on}^2 - 0,34 \cdot t_{on} \cdot p$	0,98	4,53

Parametr chropowatości S_a zawiera się w przedziale około od 2 do 4 μ m. Na podstawie opracowanej zależności graficznej stwierdzono, iż głównym czynnikiem wpływającym na chropowatość powierzchni S_a jest czas impulsu a tym samym energia wyładowania elektrycznego. Wraz ze wzrostem czasu impulsu chropowatość rośnie. Ponadto zaobserwowano, iż zarówno ciśnienie podawania dielektryka jak i prędkość przewijania elektrody roboczej nie mają

wplywu na chropowatość powierzchni. Interpretację graficzną równania regresji przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 2. Zależność parametru Sa po WEDM od czasu impulsu t_{on} i ciśnienia podawania dielektryka

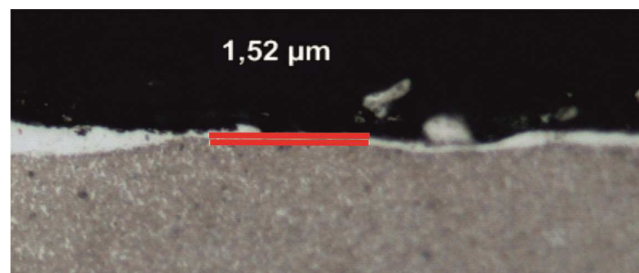
Struktura metalograficzna

Analizę mikrostruktury warstwy wierzchniej przeprowadzono na obrobionych próbkach po wycianiu elektroerozyjnym (uzyskanych zgodnie z parametrami zastosowanymi w planowanym eksperymencie). Obrobione próbki zainklowano w żywicy, poddano szlifowaniu oraz polerowaniu a następnie dokonano trawienia 5% nitalem. Badania struktury metalograficznej powierzchni realizowano przy użyciu mikroskopu optycznego Nikon Eclipse LV 150 sprzężonego z komputerowym analizatorem obrazu NIS-Elements BR 3.0. W wyniku oddziaływania gwałtownych, lokalnych procesów termicznych wywołanych wyładowaniami elektrycznymi następuje przemiana struktury metalograficznej powierzchni. W warstwie wierzchniej po obróbce elektroerozyjnej EDM zaobserwować można występowanie 3 charakterystycznych podwarstw: białej (przetopionej), zahartowanej oraz odpuszczanej. Każda z podwarstw charakteryzuje się odmiennymi własnościami w stosunku do materiału rdzenia. Wielu autorów w swoich pracach dowodzi, iż warstwa biała (powstała na skutek roztopienia i gwałtownego krzepnięcia cienkiej warstwy metalu na powierzchni krateru) charakteryzuje się niekorzystnymi właściwościami (warstwa ta jest krucha, występują w niej defekty w postaci mikropęknięć) [2,3]. Istotne jest zatem dobranie odpowiednich parametrów i warunków obróbki w celu uzyskania jak najmniejszej grubości warstwy białej lub jej całkowite wyeliminowanie, przy zastosowaniu jak najmniejszej liczby przebiegów wykończeniowych i wygładzających.

Na podstawie analizy zgiętości metalograficznych powierzchni Inconelu 718 po wycianiu elektroerozyjnym zaobserwowano występowanie głównie warstwy białej (rys. 3). Grubość warstwy białej jest niejednorodna oraz nieciągła i zmienia się w zależności od zastosowanych parametrów obróbki. Nieciągłość warstwy przetopionej wynika z losowości występowania wyładowań elektrycznych oraz warunków obróbki, tj. przemieszczenia drutu, podawania dielektryka, itp. Głównym czynnikiem wpływającym na grubość warstwy białej jest energia wyładowania elektrycznego. Wraz ze wzrostem energii wyładowania wzrasta grubość warstwy przetopionej i wynosi lokalnie nawet około 10 μm (rys. 3 b, c, d). Natomiast dla mniejszej energii wyładowania warstwa biała nabiera ciągłości i jednorodności oraz staje się cieńsza (grubość warstwy białej wynosi około 1,5 μm)

(rys. 3a). W przeciwieństwie do obróbki EDM w warstwie wierzchniej po wycianiu elektroerozyjnym nie zaobserwowano powstawania defektów mikrostruktury w postaci mikropęknięć.

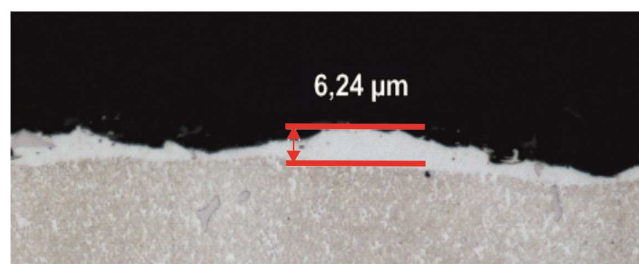
a)



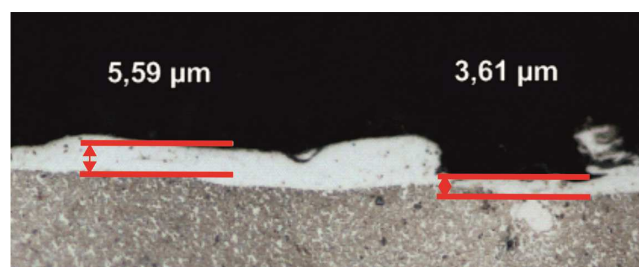
b)



c)



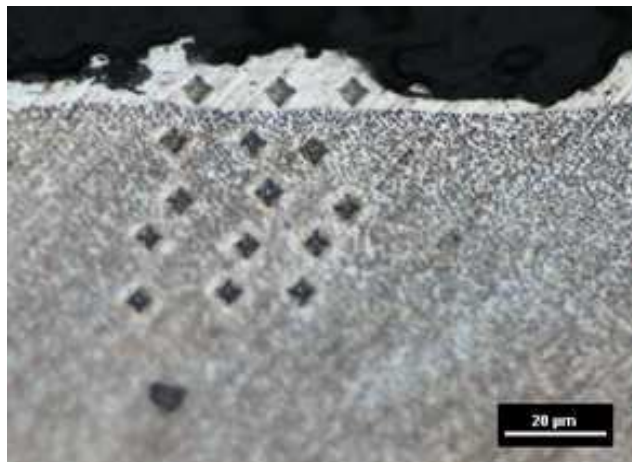
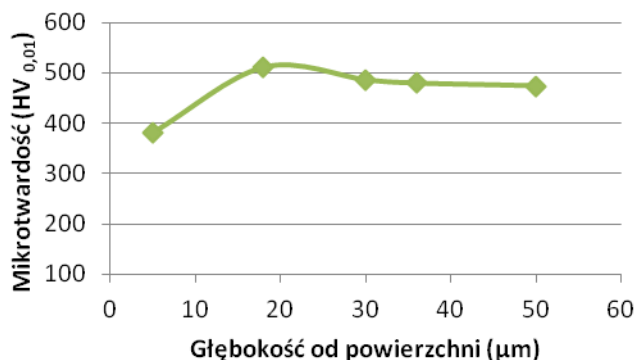
d)



Rys. 3. Struktura metalograficzna powierzchni dla Inconelu 718 po obróbce WEDM otrzymana przy: a) $t_{on} = 0,6 \mu\text{s}$, $I = 50 \text{ A}$, $U = 30 \text{ V}$, $E = 0,45 \text{ mJ}$, b) $t_{on} = 0,8 \mu\text{s}$, $I = 70 \text{ A}$, $U = 30 \text{ V}$, $E = 0,84 \text{ mJ}$, c) $t_{on} = 1,2 \mu\text{s}$, $I = 110 \text{ A}$, $U = 30 \text{ V}$, $E = 1,98 \text{ mJ}$, d) $t_{on} = 1,8 \mu\text{s}$, $I = 170 \text{ A}$, $U = 30 \text{ V}$, $E = 4,59 \text{ mJ}$

Mikrotwardość

W celu dokładnego scharakteryzowania warstwy wierzchniej po wycianiu elektroerozyjnym dokonano pomiaru mikrotwardości metodą Vickersa. Dokonano trzykrotnego pomiaru mikrotwardości (za pomocą głowicy Hanemana) przy obciążeniu 10 gram, w pięciu odległościach od powierzchni referencyjnej (rys. 4).



Rys. 4. Rozkład mikrotwardości po obróbce WEDM wraz z fotografią przedstawiającą wgłębienia w warstwie powstałe podczas pomiaru

Na podstawie analizy uzyskanych wyników stwierdzono spadek mikrotwardości w warstwie białej z około 480 do około 380 HV w stosunku do materiału rodzimego. Zmniejszenie twardości w warstwie białej może wynikać z odmiennego składu chemicznego w stosunku do materiału rdzenia. Warstwa przetopiona może zawierać pierwiastki zarówno materiału rodzimego jak również materiału elektrody roboczej, co w konsekwencji prowadzi do odmiennych właściwości fizyko chemicznych tej struktury. Na głębokości około 20 µm zaobserwowano nieznaczny wzrost mikrotwardości w stosunku do materiału rdzenia. Pomiary mikrotwardości w dalszych odległościach od powierzchni bazowej nie wykazały istotnych zmian w stosunku do materiału rdzenia.

Podsumowanie

W procesie wycinania elektroerozyjnego energia wyładowania elektrycznego jest podstawowym czynnikiem determinującym stan warstwy wierzchniej. Topografia powierzchni po wycinaniu elektroerozyjnym generowana jest w wyniku nakładania się śladów pojedynczych wyładowań elektrycznych i ma punktowy izotropowy charakter.

W przypadku obróbki Inconelu 718 zaobserwowano występowanie głównie warstwy białej. Charakteryzuje się ona nieciągłością i niejednorodnością. W zależności od dostarczonej energii wyładowania elektrycznego grubość warstwy białej zawiera się w przedziale od około 1,5 µm do około 10 µm. W warstwie przetopionej nie zaobserwowano typowych dla obróbki elektroerozyjnej defektów w postaci mikro-pęknięć. Ponadto warstwa biała charakteryzuje się spadkiem mikrotwardości w porównaniu do materiału przed obróbką. Spadek mikrotwardości może wynikać z obecności pierwiastków elektrody roboczej w strukturze materiału.

Należy przeprowadzić dalsze badania uwzględniające skład chemiczny warstwy białej, pozwalające na ocenę dyfuzji pierwiastków elektrody roboczej w trakcie procesu erozji.

LITERATURA:

1. Aspinwall, D.K., Soo S.L., Berrisford A.E., Walder G.: Workpiece surface roughness and integrity after WEDM of Ti 6Al 4V and Inconel 718 using minimum damage generator technology, *Ann. CIRP 57/1*, pp. 187-190, 2008.
2. Gostimirovic M., Kovac P., Sekulic M., Skoric B.: Influence of discharge energy on machining characteristics in EDM, *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 26, Issue 1, pp.: 173 – 179, 2012.
3. Kunieda M., Lauwers B., Rajurkar K. P., Schumacher B. M.: Advancing EDM through fundamental insight into the process, *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, Vol. 54, Issue 2, pp.: 64 – 87, 2005.
4. Li L., Guo Y.B., Wei X.T., Li W.: Surface integrity characteristics in wire-EDM of Inconel 718 at different discharge energy, *Procedia CIRP 6*, pp.: 220 – 225, 2013.
5. Mańczak K.: *Technika planowania eksperymentu*, Wydawnictwo Naukowo Techniczne, Warszawa, 1976.
6. Newton T. R., Melkote S. N., Watkins T. R., Trejo R. M., Reister L.: Investigation of the effect of process parameters on the formation and characteristics of recast layer in wire-EDM of Inconel 718, *Materials Science and Engineering*, pp.: 208–215, 2009.
7. Oczos E. K., Liubimov V.: Rozważania nad istotnością parametrów struktury geometrycznej powierzchni w układzie 3D, *Mechanik*, R. 81, nr. 3, pp.: 129 – 137, 2008.
8. Oniszczyk D., Świercz R.: Investigation into the impact of electrical pulse character on surface texture in the EDM and WEDM process, *Advances in Manufacturing Science and Technology*, pp.: 43 – 53, 2012.