

Analiza rezalnih sil in strižne cone pri ortogonalnem odrezavanju (suho in kriogeno) Inconela 718: numerični model

Matija HRIBERŠEK, Franci PUŠAVEC, Janez KOPAČ

Izvleček: V sodobnem času se pojavljajo vse večje zahteve po razvoju mehansko in termično zmogljivejših materialov. V to skupino sodi material z industrijskim imenom Inconel 718. Zaradi tega, da se lahko napovejo obrabe orodja in stanja površine po obdelavi, se vse bolj uporabljajo načini modeliranja odrezovalnih procesov, ki nam to delno omogočijo. Za ta namen je bil zasnovan numerični model ortogonalnega odrezavanja Inconela 718 s ploščico iz karbidne trdnine. Rezultati simulacij sil, ki se pojavijo pri ortogonalnem odrezavanju, so bili primerjani z eksperimenti za razmere suhega in kriogenega odrezavanja, poleg tega pa so bile izvedene raziskave strižne cone.

Ključne besede: numerično modeliranje, ortogonalno odrezavanje, rezalne sile, strižni kot

1 Uvod

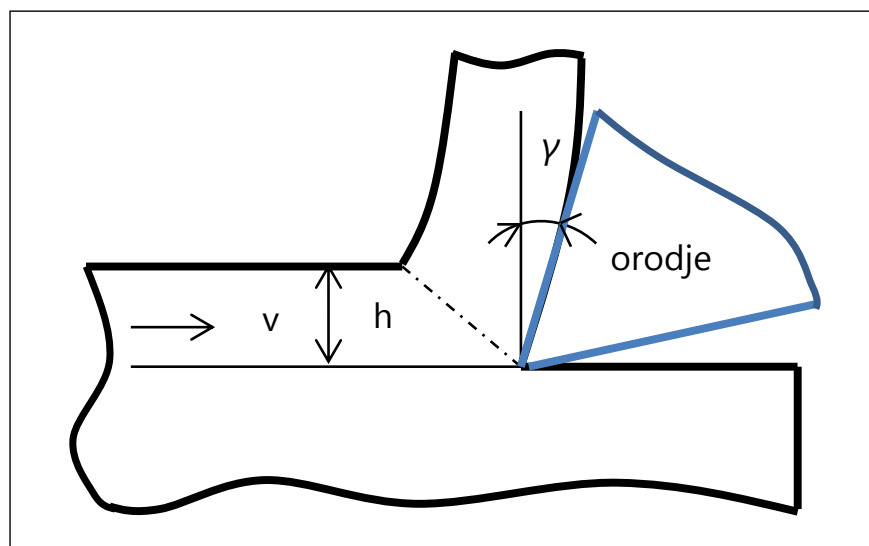
V sodobnem času se pojavlja zahteva industrije po vse bolj mehansko in temperaturno obstojnih materialih. V to skupino materialov spada avstenitna zlitina na osnovi niklja in kroma, imenovana Inconel 718. Ta skupina materialov zajema titanove zlitine in nekatere keramike, ki imajo izjemne mehanske lastnosti pri visokih temperaturah in dobro korozijsko odpornost. Obdelava takšnih materialov običajno zahteva uporabo najzahtevnejših orodij iz karbidne trdnine z naslednjimi prevlekami: TiC, TiCN, TiN, TiAlN in CBN [1]. Takšne vrste orodij z nanašajočimi prevlekami se uporabljajo za izboljšanje obstojnosti in tornih lastnosti, kar pomeni zmanjšanje re-

zalnih sil. Zaradi vse večjega razvoja okolju prijaznih tehnologij so bile raziskave opravljene pri suhih pogojih ortogonalnega odrezavanja in z dovodom tekočega dušika na obdelovanec, kar se imenuje kriogeno odrezavanje. Ortogonalno odrezavanje je poenostavljena oblika odrezavanja, pri kateri lahko opazujemo dogajanje v eni ravnini, pravokotni

na rezalni rob. Zaradi ravninskega problema imamo le dve sili (rezalno in podajalno). *Slika 1* prikazuje ortogonalno odrezavanje.

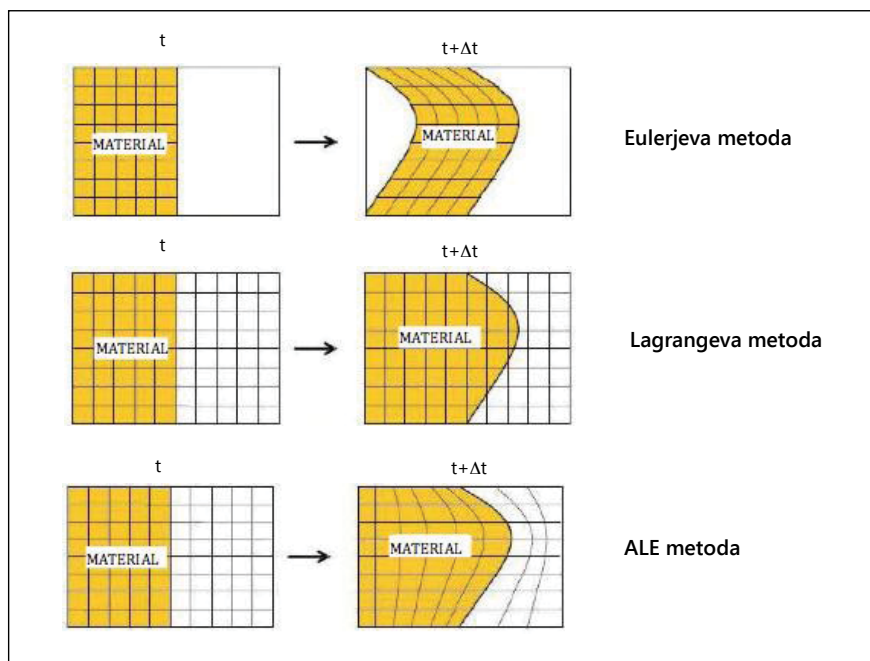
2 Namen raziskav

Namen raziskav je bil narediti numerični model odrezavanja, ki bo omo-



Slika 1. Ortogonalno odrezavanje [2]

Matija Hriberšek, univ. dipl. inž., doc. dr. Franci Pušavec, univ. dipl. inž., prof. dr. Janez Kopač, univ. dipl. inž., vsi Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo



Slika 2. Primerjava med formulacijami numeričnega modeliranja [8]

gočal spreminjanje vhodnih parametrov in napovedoval rang velikosti količin, ki so relevantne za proces odrezavanja (sile, temperature, napetosti, deformacije). Eksperimentalni del smo opravili v suhih pogojih odrezavanja in z dovodom tekočega dušika na obdelovanec. Namen začetka razvoja kriogenega odrezavanja v preteklosti je bil zmanjšati temperaturo na površini med orodjem in odrezkom in s tem omogočiti manjšo obrabo orodja in lažji lom odrezkov pri obdelavi visoko zahtevnih materialov [4], izboljšati integriteto površine zaradi zmanjševanja toplotno prizadetih con na obdelovancu [5] in zmanjšati koeficient trenja ter s tem posledično rezalne sile [6] v primerjavi s suhimi pogoji obdelave, kar so raziskave, navedene v tem članku, tudi pokazale. Slaba lastnost kriogenega odrezavanja je velik strošek tekočega dušika in nepovračljivost medija, ponovna uporaba namreč ni možna zaradi izparitve. Cilj raziskav je bila primerjava numeričnih in eksperimentalno dobljenih sil in analiza razmer v strižni coni pri obeh načinih obdelave.

3 Numerični model

Numerična simulacija odrezavanja (suho, kriogeno) je bila izvedena s programskim paketom Abaqus/

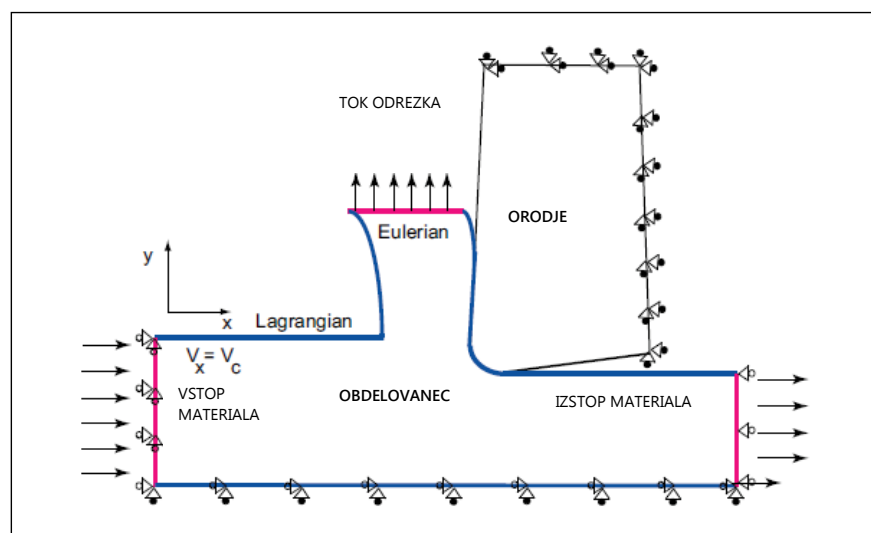
Explicit 6.10-1. Uporabljena je bila metoda končnih elementov. Numerično modeliranje običajno opredelimo z dvema formulacijama, to sta Lagrangeova in Eulerjeva metoda. Pri Lagrangeovi metodi se računalniška mreža deformira z materialom, kar pomeni, da je položaj vsake točke na mreži znan v vsaki časovni enoti (slika 2). S to metodo se enostavno določijo robni pogoji sistema. Eulerjeva metoda opredeljuje fiksno mrežo v prostoru in se uporablja predvsem za simulacije tekočin. Na začetku se je za simulacije odrezavanja uporabljala Lagrangeova eksplicitna metoda zaradi deformabilnosti mreže in s

tem možnosti simulacije tvorbe odrezka, vendar jo je zaradi njene zamudnosti nadomestila metoda ALE (Arbitrary Lagrangian Eulerian) [7].

3.1 Metoda ALE

Študije v preteklosti so pokazale, da z združenjem Lagrangeove in Eulerjeve metode dobimo najboljše rezultate. Kombinirana metoda ALE združuje deformacijo in tok materiala skozi mrežo. Lagrangeova metoda najbolj natančno opiše tok odrezka in rezalne razmere, vendar je zaradi že prej omenjene zamudnosti numerične simulacije bolj primerno, da se uporabi metoda ALE. Robni pogoji te metode so prikazani na sliki 3 [7]. Za to metodo je značilno, da združuje robne pogoje obeh metod (Lagrangeova, Eulerjeva). Lagrangeovi robni pogoji so: fiksno orodje in fiksni obdelovanec. Eulerjeva metoda vključuje robne pogoje toka materiala: vstop materiala, izstop materiala in tok odrezka.

V zvezi z modelom napetosti v materialu je bil uporabljen Johnson-Cookov model, ki je najbolj razširjen v industrijskih okoljih. Ta model je odlično orodje za analizo termo-visko-plastičnega obnašanja zaradi elasto-termo-viskoplastičnega modela, ki ga sestavljajo trije deli: plastično utrjevanje, deformacija in mehčanje materiala zaradi temperature [1]. Johnson-Cookov model



Slika 3. Robni pogoji za ALE metodo [7]

Tabela 1. Johnson-Cookovi parametri za staran Inconel 718

Johnson-Cookov model	Opis	Kobayashi-jevi parametri
A [MPa]	napetost tečenja	980
B [MPa]	modul utrjevanja	1370
C	koeficient deformacije	0,02
n	koeficient utrjevanja	0,164
m	koeficient termičnega mehčanja	1,03
ϵ_0 [s ⁻¹]	referenčna plastična deformacija	1
T _m [°]	temperatura taljenja	1300
T [°]	trenutna temperatura	20

je definiran z enačbo 1. Material obdelovanca je bil staran Inconel 718. Iz preteklih raziskav je bilo ugotovljeno, da je najbolj smiselno izbrati Kobayashijeve parametre za izbrani model, kar prikazuje tabela 1 [9].

$$\sigma_{eq} = [A + B(\epsilon_p)^n] \left[1 + C \cdot \ln \left(\frac{\dot{\epsilon}_p}{\dot{\epsilon}_0} \right) \right] \left[1 - \frac{T - T_0}{T_f - T_0} \right] \quad [1]$$

■ 4 Eksperimentalno delo

V eksperimentalnem delu so bile izvedene operacije ortogonalnega struženja. Orodje je bila ploščica iz karbidne trdnine s prevleko TiAlN (Sandvik Coromant: TCGT 1103 01-UM 1125). Material surovca je bil iz staranega Inconela 718 AMS 5663 v obliki palic. V spodnji tabeli 2 je prikazana kemijska sestava materiala.

Metoda ortogonalnega struženja je bila uporabljena zaradi poenostavi-

Tabela 2. Kemijska sestava Inconela 718

Kemijski element	Vsebnost [%]
Ni + Co	50–55
Cr	17–21
Fe	18,5
Nb + Ta	4,75–5,5
Mo	2,8–3,3
Ti	0,65–1,15
Al	0,2–0,8

tve problema, saj nastaneta pri tej vrsti odrezavanja le dve sili v ravnini, kar olajša delo, ko se proces numerično modelira. Slika 4 prikazuje ortogonalno odrezavanje (struženje diskov – ravninski problem).

Za dovod tekočega dušika (kriogeno odrezavanje) je bil uporabljen sistem, ki je računalniško krmiljen in ga je pod mentorstvom prof. dr. Janeza Kopača razvil doc. dr. Franci Pušavec. Iz priporočil proizvajalca za orodje so bili določeni optimalni rezalni parametri: rezalna hitrost v_c , podajanje na vrtljaj f in globina rezanja a_p ter dizajn eksperimentov (tabela 3). Za oba načina odrezavanja so bili uporabljeni isti rezalni pogoji.

4.1 Primerjava rezalnih sil

Sile so bile merjene z dinamometrom Kystler Type 9129AA. V primeru kriogenega odrezavanja je bil curek tekočega dušika usmerjen na cepilno ploskev. V tabeli 4 so prikazane rezalne sile (suho odrezavanje), dobljene z numeričnimi simulacijami in eksperimenti. Iz tabele je razvidno, da se eksperimentalno dobljene sile razlikujejo od numerične simulacije. Vzrok za odstopanje je v tem, da je numerični model le poenostavljen približek realnih razmer. Z izborom Kobayashijevih parametrov za Johnson-Cookov model (stran Inconel 718) smo se najbolj približali eksperimentalnim rezultatom. V tabeli 5 so prikazani rezultati eksperimentalno dobljenih sil in sil

Tabela 3. Dizajn eksperimentov

	v_c [m/min]	f [mm/vrt]	a_p [mm]
1	25	0,04	1
2	25	0,06	1
3	35	0,01	1
4	35	0,01	2
5	35	0,01	3
6	35	0,15	1
7	35	0,15	2
8	50	0,1	2
9	50	0,1	3



Slika 4. Ortogonalno (suho) odrezavanje

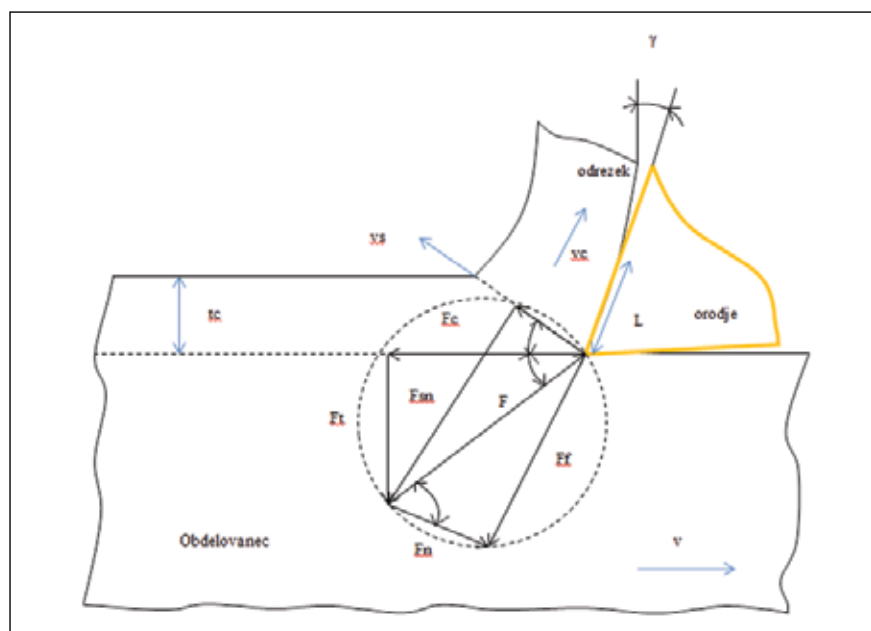
Tabela 4. Primerjava sil (suho odrezavanje)

	SUHO ODREZAVANJE			
	Eksperiment		Numerična simulacija	
	F_C [N]	F_F [N]	F_C [N]	F_F [N]
1	180	150	190	115
2	250	185	220	145
3	380	220	320	150
4	650	610	900	410
5	985	615	1305	600
6	460	260	445	210
7	910	550	945	420
8	630	360	850	390
9	960	575	1150	580

F_C – rezalna sila, F_F – podajalna sila

Tabela 5. Primerjava sil (kriogeno odrezavanje)

	KRIGENO ODREZAVANJE			
	Eksperiment		Numerična simulacija	
	F_C [N]	F_F [N]	F_C [N]	F_F [N]
1	145	120	200	120
2	180	140	220	130
3	355	200	310	130
4	645	510	670	260
5	1020	680	960	380
6	420	230	450	240
7	990	570	980	380
8	620	330	690	330
9	960	530	1020	490

**Slika 5.** Ernst-Merchantov krog sil [3]

iz numeričnih simulacij za kriogeno odrezavanje. Iz obeh tabel se lahko zaključi, da so manjše razlike med eksperimentalno dobljenimi silami in silami iz numeričnih simulacij pri globini rezanja 1 mm.

4.2 Raziskave strižne cone

Študije so bile narejene zaradi primerjave strižnega kota iz dobljenih eksperimentalnih rezultatov in rezultatov numeričnih simulacij (suho, kriogeno). S tem je bila potrjena povezava med strižnim kotom in podajanjem na vrtljaj, ki sta povezana pri ortogonalnem odrezavanju (večje podajanje, večji

strižni kot). Izračuni strižnega kota so bili narejeni po teoriji Ernst-Merchantovega kroga, ki definira poenostavljeno obliko odrezavanja, kar je prikazano na sliki 5 [3].

Iz teorije je znano, da pride z zmanjšanjem trenja na cepilni ploskvi do ustreznega povečanja strižnega kota (Φ) in tako do zmanjšanja debeline odrezkov. S povečanjem strižnega kota (Φ) pa se zmanjša dolžina strižne ravnine in s tem plastična deformacija v odrezku [2]. V tabeli 6 (suho odrezavanje) so prikazani izračuni strižnih kotov, dobljenih iz eksperimentov in izmerjenih iz numerične simulacije ortogonalnega odrezavanja (slika 6). V tabeli 7 je to prikazano še za kriogeno odrezavanje.

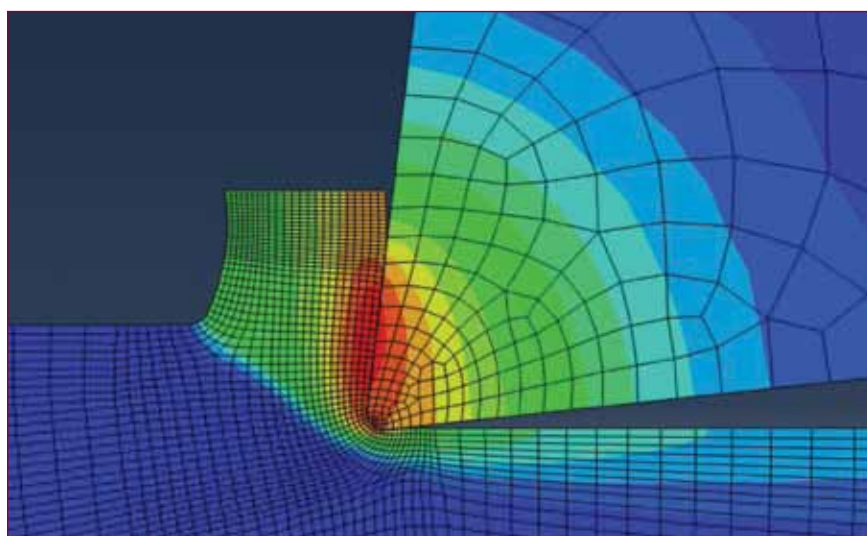
**Slika 6.** Numerična simulacija, temperaturna porazdelitev (suho odrezavanje)

Tabela 6. Primerjava strižnih kotov – suho odrezavanje morda

	φ_{XP} [°]	$\varphi_{SIMizmerjen}$ [°]
XP1	25	20
XP2	27	35
XP3	30	39
XP4	23	40
XP5	29	22
XP6	30	38
XP7	29	40
XP8	30	22
XP9	30	24

Tabela 7. Primerjava strižnih kotov – kriogeno odrezavanje

	φ_{XP} [°]	$\varphi_{SIMizmerjen}$ [°]
XP1	25	34
XP2	26	35
XP3	30	33
XP4	26	24
XP5	28	22
XP6	31	40
XP7	30	40
XP8	31	23
XP9	31	24

■ 5 Zaključki

Namen raziskav je bil izdelati numerični model za oba načina odrezavanja (suho, kriogeno), ki bo uporabniku omogočal, da bo dobil čim bolj natančen vpogled v me-

hanske in termične izhodne spremenljivke (sile, napetosti, deformacije, temperature) v obdelovancu. Za referenco je bil izbran material obdelovanca Inconel 718, ki sodi med najbolj zahtevne materiale po mehanskih in termičnih lastnostih. Z izborom Kobayashijevih parametrov za Johnson-Cookov model smo dosegli najboljši približek numerično dobljenih sil, zato sklepamo, da so ti parametri za starani Inconel 718 najbolj ustrezni [1]. Sile med eksperimenti in numeričnimi simulacijami se razlikujejo, vendar je možno opaziti manjše odstopanje pri manjših globinah rezanja. V tem primeru lahko sklepamo, da velja pravilo manjše vrednosti in posledično manjše razlike. Drug razlog za odstopanje je v tem, da smo modelirali začetno širino odrezka. Opazimo lahko, da so sile pri kriogenem odrezavanju malenkost manjše v primerjavi z eksperimenti. Iz tega je možno sklepati, da ima tekoči dušik zelo majhen vpliv na koeficient trenja. Za odrezavanje Inconela je značilno, da ima zelo visoko trdnost in žilavost in slabo toplotno prevodnost. To pomeni, da se odrezki formirajo v dolge spiralne trakove. Med izvajanjem eksperimentov je bilo ugotovljeno, da je tekoči dušik prispeval k boljši formaciji odrezka v primerjavi s suhimi pogoji odrezavanja, saj so se odrezki hitreje lomili. Z raziskavami strižne cone je bila potrjena teorija, da pride z zmanjšanjem koeficienta trenja (manjše sile) do ustreznega povečanja strižnega kota. To sklepamo, ker so strižni koti v tabeli 7 v večini (kriogeno) večji kot v tabeli 6 (suho), sile pa so obratno velike.

Viri

- [1] V. Chaudiere: Influence of cryogenic assistance on the machining of Inconel 718 in the simplified case of orthogonal cutting: experimental and numerical approaches.
- [2] J. Kopač: Odrezavanje: Teoretične osnove in tehnološki napotki, prof. dr. Janez Kopač (samozaložnik), *Dragomelj*, 2008.
- [3] A. P. Markopoulos: Finite element method in machining processes, *Springer*, 2013.
- [4] D. Fabre: Characterization of cutting tool wear in cryogenically assisted machining of Inconel 718, *Master thesis*, 2013.
- [5] F. Pušavec, H. Hamdi, J. Kopač, I. S. Jawahir: Surface integrity in cryogenic machining of nickel based alloy – Inconel 718, *Journal of Materials Processing Technology*, 2011, 211, 773–783.
- [6] C. Courbon, F. Pušavec, F. Dumont, J. Rech, J. Kopač: Tribological behaviours of TiAl4V and Inconel 718 under dry and cryogenic conditions – Application to the context of machining with carbide tools, *Tribology International* 2013, 66, 72–82.
- [7] P.J. Arrazola, T. Özel: Investigations on the effects of friction modeling in finite element simulation of machining, *International Journal of Mechanical Sciences* 52, 2010, Pages 31–42.
- [8] C. Courbon: Étude sur l'usage ébauche des maté.
- [9] T. Kobayashi, J. W. Simons, C. S. Brown, D. A. Shockey: Plastic flow behaviour of Inconel 718 under dynamic shear loads, *International Journal of Impact Engineering*, 2008, 35, 389–396.

The Numerical Model of Shear Zone during the Orthogonal Cutting (Dry and Cryogenic) of Inconel 718

Abstract: Nowadays, there is a high demand for the development of materials that are mechanically and thermally resistant. Among them, there is a material with the trade name Inconel 718. It is highly desirable for tool wear and surface integrity after processing to be predicted beforehand, which is why modelling methods that partially enable that are being used increasingly. For that purpose, the numerical model of the orthogonal cutting of Inconel 718 with carbide insert has been designed. The results of the simulation forces occurring during the orthogonal cutting have been compared to the experiments for dry and cryogenic cutting conditions and the study of shear zone has been carried out.

Keywords: numerical modelling, orthogonal cutting, cutting forces, shear angle