

УДК621.91

ФОРМИРОВАНИЕ МОДЕЛИ РЕОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТРУДНООБРАБАТЫВАЕМЫХ МАТЕРИАЛОВ В ПРОЦЕССЕ ИНТЕНСИВНОЙ ДЕФОРМАЦИИ РЕЗАНИЕМ

© 2015 А. И. Хаймович, А. В. Балякин, Н. В. Галкина

Самарский государственный аэрокосмический университет
имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет)

Повышение эффективности высокоскоростной обработки (ВСО) требует углублённого изучения физических явлений, сопровождающих процесс резания. Основными отличиями ВСО от традиционной механической обработки с физической точки зрения являются преобладание быстротекущих динамических процессов как в зоне резания, так и в системе «станок – приспособление – инструмент – изделие» и ярко выраженная нелинейность законов развития этих процессов. В этой связи исследование физических явлений, сопровождающих процесс ВСО, и установление их взаимосвязи с устойчивостью процесса резания и качеством обработанной поверхности является актуальной задачей. В статье рассмотрена методика определения параметров реологических свойств материала титанового сплава ВТ6, применяемого в авиационном двигателестроении, при торцевом фрезеровании. Расчёты проводились в САЕ-системе Deform с использованием FEM-модели.

Температура резания, силы резания, реологические свойства, модель напряжённо-деформированного состояния Джонсона–Кука.

doi: 10.18287/2412-7329-2015-14-3-384-390

Введение

Материалы и методы их обработки, используемые в авиадвигателестроительной, авиационной, космической и машиностроительной отраслях постоянно совершенствуются. Появляются новые материалы и методы обработки [1]. Понимание физических явлений и выявление поведения материала при обработке являются основным вопросом для моделирования и оптимизации технологических процессов резания [2].

Исследование температуры резания при механической обработке, в том числе и при торцевом фрезеровании, играет важную роль [3]. Нагрев режущей кромки инструмента в процессе резания вызывает изменение структуры и механических свойств материала, а при достижении определённых значений температур способствует интенсификации адгезионных и диффузионных явлений. Всё это способствует ускорению износа инструмента и снижению его стойкости. Кроме того, тепло, выделяющееся в процессе резания, влияет на характер и степень деформации, величину сил деформации и трения, на качество обработанной поверхности.

Температура резания зависит как от режимов резания, так и от механических и теплофизических свойств материала заготовки и инструмента. Определение температурных и стойкостных зависимостей для титанового сплава [4] и сопоставление полученных данных с их механическими и теплофизическими свойствами и свойствами материала инструмента позволяют использовать температуру резания как один из критериев обрабатываемости новых материалов.

Были разработаны различные методы для решения тепловой задачи отображения режущего инструмента, заготовки и стружки, например: аналитические методы [5], экспериментальные и численные (моделирование) методы [6], гибридные методы и методы теплового источника. Некоторые аналитические модели были ранее предложены Merchant [7], разработаны Oxley [8, 9, 10], последние работы были адаптированы для процессов фрезерования [11].

Зависимости температуры от различных факторов при торцевом фрезеровании [4] позволяют объяснить некоторые особенности процесса, как-то: влияние

смещения фрезы на стойкость, ускоренный износ инструмента в момент врезания фрезы в заготовку при обработке жаропрочных материалов и др.

Методика проведения эксперимента

Измерение температуры резания производилось методом естественной термопары «фреза-изделие» (рис. 1). Для уменьшения погрешностей в процессе работы была использована цельная пластина твёрдого сплава ВК6М с размерами

55×20×12 мм. Пластина с нужной геометрией укреплялась в корпусе фрезы (табл.1).

Регистрация температуры осуществлялась путём записи аналогового сигнала и выводилась в виде осциллограмм (рис. 2).

Температурные исследования были проведены по титановому сплаву ВТ6. Заготовки имели вид брусков с размерами 700×100×75 мм. Механические и теплофизические свойства сплава ВТ6 представлены в табл. 2 [3].

Таблица 1. Параметры пластины

$\gamma, ^\circ$	$\lambda, ^\circ$	$\alpha, ^\circ$	$\varphi, ^\circ$	$\varphi_0, ^\circ$	$\varphi_1, ^\circ$	$f_0, \text{мм}$
8	8	12	45	20	10	1,0

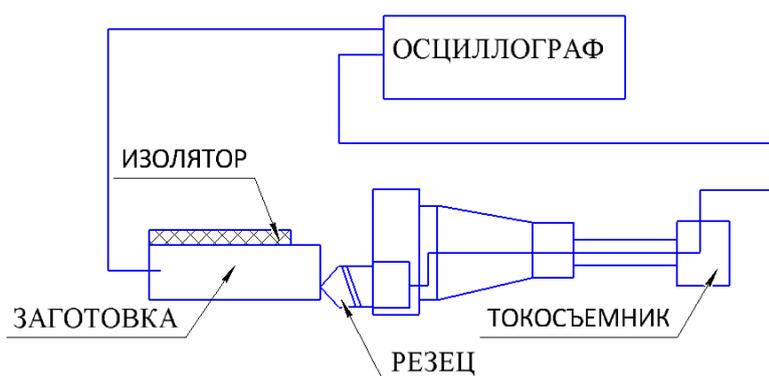


Рис. 1. Схема установки измерения температуры резания

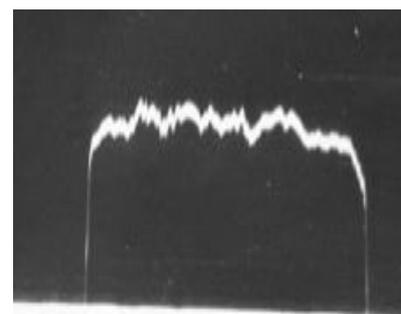


Рис. 2. Осциллограмма температуры резания на режиме №3

Таблица 2. Механические свойства заготовок

Сплав	№ образца	$\sigma_s, \text{кг/мм}^2$	$\sigma_{0,2}, \text{кг/мм}^2$	$\delta_s, \%$	$\psi, \%$	$\delta_p, \%$	$\psi_p, \%$	$\frac{\delta_p}{\delta}$	$\frac{\psi_p}{\psi}$
ВТ6	11	88,0	80	9,65	30,4	5,3	5,0	0,55	0,16
	12	90,0	81,5	10,3	36	5,1	4,9	0,5	0,14

Анализ температурных осциллограмм и их обработка

Обработка осциллограмм производится по методу, описанному в [3]. Кратко данный метод можно представить в следующем виде:

1. По оцифрованным осциллограммам производится вычисление площади,

ограниченной кривой температуры и нулевой линией. По этим площадям определяются средние ординаты температур:

$$h_{\text{ср}} = \frac{F_{\Theta}}{L} [\text{мм}], \quad (1)$$

где L – развёртка по времени; F_{Θ} – площадь осциллограммы.

2. Определяются среднемаксимальные ординаты температур как среднеарифметические значения наибольших величин выступов.

3. С помощью тарировочных коэффициентов находятся значения средних и среднемаксимальных температур резания, которые отражены в табл. 3.

Таблица 3. Результаты экспериментов

№ экс.	S_z , мм/зуб	V , м/мин	B , мм	K , мм	L , мм	F_{Θ° , мм	h_{cp} , мм	h_{cpmax} , мм	T_{max} , °C
1	0.045	80	2	6	74.88	588.81	39.315	39.925	761
2	0.078				72.12	574.49	39.83	39.925	762
3	0.114				72.3	768.06	53.115	53.865	970
4	0.2				75.9	991.45	65.315	63.105	1150
5	0.286				73.98	1045.39	70.655	72.85	1200
6	0.114	40	2	6	52.44	436.15	41.585	42.025	790
7		64			36	339.68	47.18	46.08	870
8		113			46.5	523.61	56.3	54.11	1030
9		141			39.06	505.975	64.77	61.9	1140
10		174			28.08	435.155	77.485	75.515	1260
11	0.114	80	2	0	91.62	849.57	46.365	47.48	860
12				6	70.26	892.93	63.545	62.855	1120
13				15	71.46	594.18	41.575	44.985	790
14				29	63.6	687.265	54.03	54.065	1020
15				42.5	57	803.29	70.465	69.075	1200
16	0.124	80	4	6	82.62	855.8	51.79	53.915	1010
17			3		75.3	771.6	51.235	50.395	1010
18			1.5		78.42	838.165	53.44	53.325	1020
19			1		78.66	814.825	51.795	50.025	1010
20			0.6		76.44	706.73	46.23	45.315	860

Анализ осциллограмм показывает, что температура резания зависит, главным образом, от толщины стружки, что отражается на работе деформации и работе трения и, следовательно, на тепловыделении. Ломаный характер осциллограммы (рис. 2) указывает на нестабильность стружкообразования, связанную с изменением коэффициента трения, образованием нароста на режущей кромке и т.п.

По результатам численного (имитационного) моделирования процесса фрезерной обработки в САЕ Deform с верификацией результата по измеренным усилиям в натурном эксперименте [12] сравнивались значения температуры, полученной численными методами, с эмпири-

ческими результатами по табл. 3. Для сравнения с экспериментом брали усреднённую по объёму стружки величину температуры из МКЭ-анализа. Имитационное моделирование фрезерной обработки с заданием параметров материала производилось по методике, описанной в работах [2, 12–14]. Из анализа полученных данных по режимам можно сделать вывод, что распределение температуры, полученное численными методами, имеет достоверность 18%.

Аппроксимировав [15, 16] данные, полученные численным методом, можно построить зависимости температуры от глубины резания и смещения фрезы и от скорости и глубины резания (рис. 3).

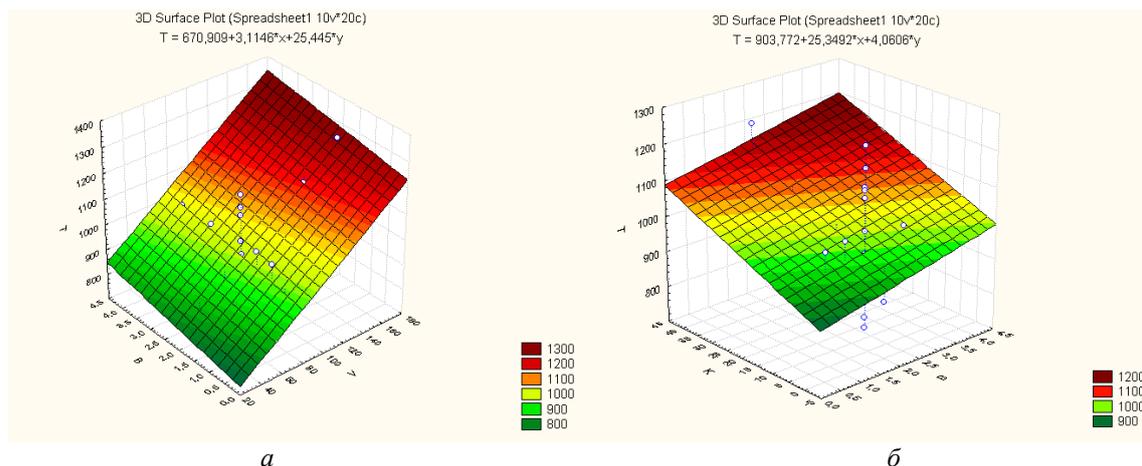


Рис. 3. Зависимость температуры:
 а – от скорости и глубины резания; б – от глубины резания и смещения фрезы

Из рис. 3, а видно, что при увеличении глубины резания и смещения фрезы температура увеличивается, при этом рост её в большей степени зависит от глубины резания.

Рис. 3, б показывает, что при увеличении скорости и глубины резания температура увеличивается, при этом её рост в большей степени зависит от скорости резания.

Выводы

1. При фрезеровании титановых сплавов (ВТ6) температура резания достигает значений 800...1260°C.

2. Проведённые опыты по титановому сплаву ВТ6 показали, что стойкость фрезы сильно зависит от её положения относительно заготовки. Экспериментально установлено, что наиболее интенсивный износ происходит во время врезания фрезы в заготовку. Ранее было высказано предположение о том, что одной из основных причин интенсивного износа при врезании или при неоптимальном смеще-

нии фрезы является толщина стружки на выходе, которая обуславливает высокую температуру в конце каждого реза. Последняя способствует прилипанию стружки к передней поверхности, схватыванию материала резца с материалом изделия и вырыванию частиц твёрдого сплава.

3. Одной из основных причин снижения стойкости при соответствующем расположении фрезы относительно заготовки является высокая температура резания в момент выхода. Это позволяет объяснить физическую роль смещения. В то же время высокие температуры в момент выхода оказывают отрицательное влияние на стойкость инструмента при большом смещении и при врезании в комплексе с большими силами резания и малой жёсткостью станка.

4. Средняя температура резания ниже максимальных, действующих на большей части контакта, на 10...15%. Поэтому при расчётах условий резания следует ориентироваться на максимальные значения температуры.

Библиографический список

1. Tönshoff H.K., Bussmann W., Stanske C. Requirements on Tools and Machines when Machining Hard Materials // Proc. of the 26th Int. Mach. Tool and Res. Conf. 1986. P. 349-357.

2. Khaimovich A., Balaykin A., Galkina N. Study of Rheological Properties of Mate-

rials at the Blade Processing on Example of Milling Nickel-Chromium Alloy 10H11N23T3 MR VD // Applied Mechanics and Materials. 2015. V. 756. P. 120-125. doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.756.120

3. Митряев К. Ф., Комиссаров В. И. Исследование обрабатываемости жаропрочных и титановых сплавов при торцовом фрезеровании // В кн.: Обрабатываемость жаропрочных титановых сплавов. Куйбышев: Куйбышевское обл. книжное издательство, 1962. С. 43-67.
4. Settineri L., Priarone P.C., Arft M., Lung D., Stoyanov T. An evaluative approach to correlate machinability, microstructures, and material properties of gamma titanium aluminides // CIRP Annals - Manufacturing Technology. 2014. V. 63, Iss. 1. P. 57-60. doi.org/10.1016/j.cirp.2014.03.068
5. Zhang S., Liu Z. An analytical model for transient temperature distributions in coated carbide cutting tools // International Communications in Heat and Mass Transfer. 2008. V. 35, Iss. 10. P. 1311-1315. doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2008.08.001
6. Wan Y., Tang Z.T., Liu Z.Q., Ai X., The assessment of cutting temperature measurements in high-speed machining // In Materials Science Forum. 2004. V. 471-472. P. 162-166. doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.471-472.162
7. Merchant E. Basic mechanics of the metal cutting process // J. of Applied Mechanics. 1944. V. 66. P. 168-175.
8. Klockea F., Lunga D., Puls H. FEM-Modelling of the thermal workpiece deformation in dry turning // Procedia CIRP. V. 8. 2013. P. 240-245. doi.org/10.1016/j.procir.2013.06.096
9. Arrazola P.J., Özel T., Umbrello D., Davies M., Jawahir I.S. Recent advances in modelling of metal machining processes // PCIRP Annals - Manufacturing Technology. 2013. V. 62, Iss. 2. P. 695-718. doi.org/10.1016/j.cirp.2013.05.006
10. Kiliçaslan C. Modelling and simulation of metal cutting by finite element method. Master's degree thesis. Ýzmir Institute of Technology, Turkey, 2009.
11. Fontaine M., Devillez A., Moufki A., Dudzinski D. Predictive force model for ball end milling and experimental validation with a wavelike form machining test // Int. J. Machine Tools and Manufacture. 2006. V. 46, Iss. 3-4. P. 367-380. doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2005.05.011
12. Khaimovich A., Balaykin A. Analysis of plastic properties of titanium alloys under severe deformation conditions in machining // International Journal of Engineering and Technology. 2014. V. 6, Iss. 5. P. 2184-2190.
13. Khaimovich A., Balaykin A., Kondratiev A. Methodology of rheological material properties phenomenological modeling at high speed cutting by reverse analysis // Research Journal of Applied Sciences. 2014. V. 9, Iss. 11. P. 753-760
14. Khaimovich A., Balaykin A. Analysis of titanium alloys plastic properties under severe deformation conditions in machining // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. 2014. V. 9, Iss. 10. P. 1828-1833.
15. Bai Y., Wierzbicki T. A new model of metal plasticity and fracture with pressure and Lode dependence // International Journal of Plasticity. 2008. V. 24, Iss. 6. P. 1071-1096. doi.org/10.1016/j.ijplas.2007.09.004
16. Puls H., Klocke F., Lung D. Experimental investigation on friction under metal cutting conditions // Wear. 2014. V. 310, Iss. 1-2. P. 63-71. doi.org/10.1016/j.wear.2013.12.020

Информация об авторах

Хаймович Александр Исаакович, доктор технических наук, доцент кафедры технологий производства двигателей, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail:

berill_samara@bk.ru. Область научных интересов: компьютерное моделирование процессов механической обработки резанием. CAD/CAM моделирование технологических процессов.

Балякин Андрей Владимирович, аспирант, инженер, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: a_balik@mail.ru. Область научных интересов: компьютерное моделирование процессов высокоскоростной механической обработки резанием. CAD/CAM моделирование технологических процессов.

Галкина Наталья Викторовна, аспирант, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: nata12_92@mail.ru. Область научных интересов: компьютерное моделирование процессов механической обработки резанием. CAD/CAM моделирование технологических процессов.

FORMATION OF A MODEL OF RHEOLOGICAL PROPERTIES OF HARD-TO-MACHINE MATERIALS IN THE PROCESS OF INTENSIVE CUTTING FORCE DEFLECTION

© 2015 A. I. Khaimovich, A. V. Balaykin, N. V. Galkina

Samara State Aerospace University, Samara, Russian Federation

Improving the efficiency of high-speed machining (HSM) requires in-depth study of the physical phenomena accompanying the cutting process. The main difference between HSM and traditional machining in terms of physics is the prevalence of swift dynamic processes both in the cutting zone and in the “machine - fixture - tool – product” system, as well as marked nonlinearity of the laws of development of these processes. In this regard, the study of physical phenomena accompanying the process of HSM, and the establishment of their relationship with the stability of the cutting process and the quality of the machined surface is an urgent task. This article describes a procedure of determining the parameters of the rheological properties of the titanium alloy BT6 material used in aircraft engine construction, in face milling. The calculations were performed in the CAE system Deform using a FEM - model.

Cutting temperature, cutting force, rheological properties, stress-strain state, Johnson-Cook constitutive model.

References

1. Tönshoff H.K., Bussmann W., Stanske C. Requirements on Tools and Machines when Machining Hard Materials. *Proc. of the 26th Int. Mach. Tool and Res. Conf.* 1986. P. 349-357.
2. Khaimovich A., Balaykin A., Galkina N. Study of Rheological Properties of Materials at the Blade Processing on Example of Milling Nickel-Chromium Alloy 10H11N23T3 MR VD. *Applied Mechanics and Materials*. 2015. V. 756. P. 120-125. doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.756.120
3. Komissarov V.I. Issledovanie obrabatyvaemosti zharoprochnykh i titanovykh splavov pri tortsovom frezerovanii. *V kn.: Obrabatyvaemost' zharoprochnykh titano-*
4. vykh splavov. Kuibyshev: Kuybyshevskoe obl. knizhnoe izdatel'stvo, 1962. P. 43-67.
5. Settineri L., Priarone P.C., Arft M., Lung D., Stoyanov T. An evaluative approach to correlate machinability, microstructures, and material properties of gamma titanium aluminides. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*. 2014. V. 63, Iss. 1. P. 57–60. doi.org/10.1016/j.cirp.2014.03.068
6. Zhang S., Liu Z. An analytical model for transient temperature distributions in coated carbide cutting tools. *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 2008. V. 35, Iss. 10. P. 1311–1315. doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2008.08.001

6. Wan Y., Tang Z.T., Liu Z.Q., Ai X., The assessment of cutting temperature measurements in high-speed machining. *In Materials Science Forum*. 2004. V. 471-472. P. 162-166. doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.471-472.162
7. Merchant E. Basic mechanics of the metal cutting process. *Journal of Applied Mechanics*. 1944. V. 66. P. 168-175.
8. Klockea F., Lunga D., Puls H. FEM-Modelling of the thermal workpiece deformation in dry turning. *Procedia CIRP*. V. 8. 2013. P. 240-245. doi.org/10.1016/j.procir.2013.06.096 .
9. Arrazola P.J., Özel T., Umbrello D., Davies M., Jawahir I.S. Recent advances in modelling of metal machining processes. *PCIRP Annals - Manufacturing Technology*. 2013. V. 62, Iss. 2. P. 695-718. doi.org/10.1016/j.cirp.2013.05.006
10. Kiliçaslan C. Modelling and simulation of metal cutting by finite element method. Master's degree thesis. Ýzmir Institute of Technology, Turkey, 2009.
11. Fontaine M., Devillez A., Moufki A., Dudzinski D. Predictive force model for ball end milling and experimental validation with a wavelike form machining test. *Int. Journal Machine Tools and Manufacture*. 2006. V. 46, Iss. 3-4. P. 367-380. doi.org/10.1016/j.ijmactools.2005.05.011
12. Khaimovich A., Balaykin A. (2014) Analysis of plastic properties of titanium alloys under severe deformation conditions in machining. *International Journal of Engineering and Technology*. 2014. V. 6, Iss. 5. P. 2184-2190.
13. Khaimovich A. Balaykin A. Kondratiev A. (2014) Methodology of rheological material properties phenomenological modeling at high speed cutting by reverse analysis. *Research Journal of Applied Sciences*. V. 9, Iss. 11. 2014. P. 753-760
14. Khaimovich A. Balaykin A. (2014) Analysis of titanium alloys plastic properties under severe deformation conditions in machining. *ARP Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2014. V. 9, Iss. 10. P. 1828-1833.
15. Bai Y., Wierzbicki T. A new model of metal plasticity and fracture with pressure and Lode dependence. *International Journal of Plasticity*. 2008. V. 24, Iss. 6. P. 1071-1096. doi.org/10.1016/j.ijplas.2007.09.004
16. Puls H., Klocke F., Lung D. Experimental investigation on friction under metal cutting conditions. *Wear*. 2014. V. 310, Iss. 1-2. P. 63-71. doi.org/10.1016/j.wear.2013.12.020

About the authors

Khaimovich Alexander Isaakovich, Doctor of Science (Engineering), Assistant Professor of the Department of, Samara State Aerospace University, Samara, Russian Federation. E-mail: berill_samara@bk.ru. Area of Research: computer simulation of high-speed machining processes, CAD / CAM modeling of processes.

Balaykin Andrey Vladimirovich, postgraduate student, engineer of the Department of Engine Production Technology, Samara State Aerospace University, Samara,

Russian Federation. E-mail: a_balik@mail.ru. Area of Research: computer simulation of high-speed machining processes, CAD / CAM modeling of processes.

Galkina Natalia Victorovna, postgraduate student, Samara State Aerospace University, Samara, Russian Federation. E-mail: nata12_92@mail.ru. Area of Research: computer simulation of high-speed machining processes, CAD / CAM modeling of processes.