

УДК 621.91.01

ОПТИМИЗАЦИЯ УСЛОВИЙ ОБРАБОТКИ ТРУДНООБРАБАТЫВАЕМОГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ РАЗРАБОТАННОЙ ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА ФРЕЗЕРОВАНИЯ В САЕ-СИСТЕМЕ DEFORM

© 2015 В.В. Быданов, В.П. Алексеев

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

Статья поступила в редакцию 06.11.2015

В данной статье рассмотрены вопросы оптимизации условий обработки жаропрочной стали 10X11H23T3MP-ВД в современной САЕ системе DEFORM. Разработана имитационная модель процесса фрезерования, необходимая для анализа влияния условий резания на процесс формирования усилий. Проведен реверс-инжиниринг свойств материала по анализу усилий резания. Проведен анализ и обработка результатов моделирования. Произведено сравнение результатов моделирования с экспериментальными данными для подтверждения адекватности полученной имитационной модели процесса фрезерования.

Ключевые слова: механическая обработка, моделирование, метод конечных элементов, режимы резания, силы резания, процесс стружкообразования.

С развитием авиадвигателестроения к качеству изготавливаемой продукции предъявляются все более жесткие требования в плане надежности и долговечности, которые определяются не только совершенством конструкции изделия, но также методом и качеством обработки. Наиболее распространённым методом изготовления деталей является механическая обработка.

В процессе организации механической обработки ответственных изделий наиболее остро встает вопрос создания оптимальных условий резания. Под оптимальными понимаются такие условия, при которых возможно обеспечить необходимую точность геометрических параметров и свойства поверхностного слоя обрабатываемой заготовки при достижении определенных критериев. Одним из таких критериев является предельная величина усилий резания. Величина и направление усилий резания является важной характеристикой процесса лезвийной обработки. От них зависят условия работы станка, инструмента, приспособления, точность обработки детали и др. Одним из методов воздействия на величину усилий является изменение режима резания.

Каждая составляющая режима резания (подача, глубина и скорость резания) оказывает влияние на усилия резания. При увеличении подачи и глубины резания возрастает площадь поперечного сечения срезаемого слоя, а, значит, и нагрузка на переднюю поверхность. Следовательно, во столько же раз увеличивается нагрузка на резец, вызываемая силами,

действующими на переднюю и заднюю поверхности инструмента. Однако степень влияния подачи и глубины различна [1]. При токарной обработке жаропрочного сплава на никелевой основе при скорости резания 22 м/мин и подаче 0,05 мм/об изменение глубины резания с 0,5 до 1 мм привело к увеличению силы резания на 38%. В тоже время, при постоянной глубине резания 0,5 мм увеличение подачи с 0,05 до 0,1 мм/об привело к увеличению усилий на 18% [2]. Влияние скорости резания на силы проявляется через изменение коэффициента усадки стружки, который, как правило, уменьшается с ростом скорости. Резание на высоких скоростях приводит к значительному повышению температуры резания, исчезновению нароста, в результате чего уменьшается коэффициент трения, коэффициент усадки, а, следовательно, и сила резания [1]. Например, при точении коррозионностойкого сплава на никелевой основе изменении скорости резания с 50 до 100 м/мин., приводит к уменьшению силы резания на величину от 6 до 20% в зависимости от материала инструмента при прочих равных условиях [3].

В тоже время, режимы резания оказывают большое влияние на такие параметры, как стойкость инструмента, качество поверхностного слоя, производительность обработки и ряд других. Так, увеличение скорости резания приводит к повышению температуры на режущей кромке инструмента, что приводит к потере прочности и пластическим деформациям. D.G. Thakur и др. [4] определили, что при точении никелевого сплава Инконель 718 использование скорости резания выше 55 м/мин приводит к значительному снижению срока службы инструмента, в то время как обработка

Быданов Виктор Вячеславович, студент.

E-mail: viktorbydanov@gmail.com

Алексеев Вячеслав Петрович, инженер кафедры производства двигателей летательных аппаратов.

E-mail: alexeev.v.p@mail.ru

в диапазоне скоростей 45-55 м/мин позволяет добиться равномерного износа инструмента при прочих равных условиях. Н.Р. Krain и др. [5] определили, что в процессе фрезерования никелевых сплавов при скорости резания 35 м/мин подача выше 0,13мм/зуб и коэффициент радиального погружения (отношения глубины резания к диаметру инструмента) 75% существенно снижает стойкость инструмента, в то время как подача 0,1 мм и радиальное погружение 50 % позволяет добиться наилучшего баланса стойкости и производительности.

Определение оптимальных режимов резания является многовариантной технико-экономической задачей, требующей большого числа сложных вычислений. Из-за недостаточной изученности процесса резания, решение данной задачи посредством применения аналитических моделей не всегда оправдано по причине их сложности, а также получения неадекватных значений, ввиду того факта, что данные модели учитывают обработку в идеальных условиях. Поэтому на сегодняшний день одним из методов определения оптимальных параметров резания является численное моделирование обработки, основанное на методе конечных элементов, которое реализовано в ряде CAE-систем. (ABAQUS, DEFORM, NX Nastran, LS-DYNA и другие).

Применение CAE-систем, основанных на конечно-элементном методе, дает возможность разработать адекватную модель лезвийной обработки, позволяющую определить оптимальные условия резания, не прибегая к дорогостоящим экспериментальным исследованиям. Так, например, Usama Umer, Lijing Xie, Xibin Wang [6] в программном комплексе ABAQUS/Explicit разработали численную модель высокоскоростного фрезерования, позволяющую достаточно точно спрогнозировать результаты обработки закаленной стали AISI-H13 для изготовления штампов/пресс-форм и определить зависимости составляющих сил резания от изменения режимов обработки.

Целью исследования является оптимизация условий обработки труднообрабатываемого материала на основе разработанной имитационной модели бокового фрезерования в CAE-системе DEFORM

1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ АСПЕКТЫ

Экспериментальные исследования процесса резания жаропрочного сплава были проведены по ранее разработанной методике[7]. Для проведения эксперимента использовалось современное фрезерное оборудование с ЧПУ ALZMETALL BAZ 15 CNC и динамометрический стол Kistler, который осуществлял регистрацию изменения составляющих усилия резания F_x , F_y , F_z в реальном времени. В качестве режущего инструмента использовался монолитный инструмент со стружкоделительными канавками $\varnothing 20$ мм. Основные геометрические параметры представлены на рис. 1 и в табл. 2. В виде оправки использовался термозажим, обеспечивающий наибольшую жесткость закрепления.

В качестве обрабатываемой заготовки были выбраны пластины $D \times B \times T$ 40x24x6 мм из материала ЭП33-ВД (10X12H23T3MP-ВД). Поверхность каждого образца предварительно обрабатывалась так, чтобы исходная шероховатость у всех образцов была одинаковая Ra 1,25. Химический состав сплава ЭП33-ВД представлен в табл. 1.

При проведении экспериментальных исследований скорость резания изменялась от 45 – 75 м/мин, подача на зуб от 0,05 – 0,2 мм/зуб, боковой сьем a_e от 0,1 – 0,5 мм. По результатам исследований были получены усилия резания по трем осям F_x, F_y, F_z для каждого режима.

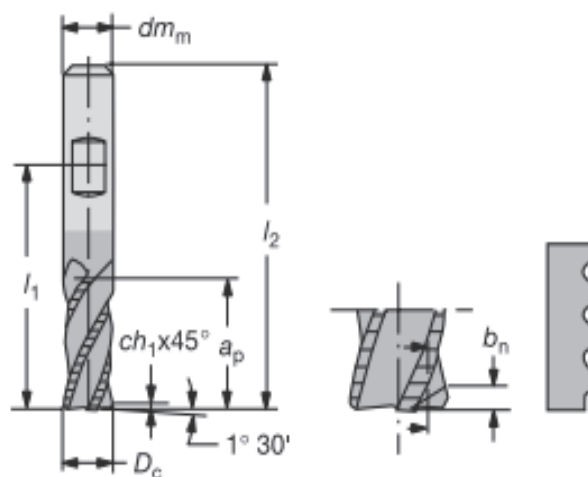


Рис. 1. Основные геометрические параметры режущего инструмента

Таблица 1. Химический состав стали 10X11H23T3MP, %

C	Cr	Ni	Ti	Vo	Fe	Al	Mn	Si	B	S
<0,1	10,0-12,5	21-25	2,6-3,2	1,0-1,6	Основа	0,8	0,6	0,6	0,02	0,01
						не более				

Таблица 2. Основные геометрические параметры

Наименование	Число зубьев, z_n	D_c	dm_m	l_1/l_3	l_2	r_{e1}	a_p
Черновая фреза	4	20	20	79	104	1	38

2. РЕВЕРС-ИНЖИНИРИНГ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛА ПО АНАЛИЗУ УСИЛИЙ РЕЗАНИЯ

Свойства материала в зоне обработки, как правило, задаются определяющими соотношениями (феноменологическая модель), устанавливающими связь между напряженным, деформированным состоянием и температурными полями. Одним из методов определения этих соотношений является метод обратного (реверсивного) инжиниринга, основанный на методе конечных элементов.

Целью данного этапа является определение коэффициентов феноменологической модели свойств жаропрочного материала 10X11H23T3MP-ВД (ЭП33-ВД) методом реверс-инжиниринга свойств материала по анализу усилий резания с помощью программного обеспечения Deform.

Методика реверс-инжиниринга свойств материала по усилиям резания подробно описана в работе [8]. Сущность метода заключается в нахождении коэффициентов феноменологической модели, при которых разница между результатами (величина усилий резания) численного моделирования и экспериментальными данными стремиться к нулю.

В качестве феноменологической модели свойств материала используется широко известная модель Джонсона-Кука, которая выражается зависимостью:

$$\sigma = (A + B\varepsilon_2^n) \left[1 + C \ln \left(\frac{\dot{\varepsilon}_2}{(\dot{\varepsilon}_2)_0} \right) \right] \left(\frac{\dot{\varepsilon}_2}{(\dot{\varepsilon}_2)_0} \right)^\alpha \left(D - E \left(\frac{T - T_{room}}{T_{melt} - T_{room}} \right)^m \right), \quad (1)$$

где ε_2^n – эффективная степень деформации;

$\dot{\varepsilon}_2$ – эффективная скорость деформации;

T – температура материала в зоне резания, °C.

Коэффициенты модели определяются из соотношений:

$$\bar{F}_i = \frac{F_{(v_i, s=const, t=const)}}{F_{(v_{i \neq j}, s=const, t=const)}}; \quad (2)$$

$$\bar{F}_i = \frac{\left[1 + C \ln \left(\frac{\dot{\varepsilon}_{2i}}{(\dot{\varepsilon}_2)_0} \right) \right] \left(\frac{\dot{\varepsilon}_{2i}}{(\dot{\varepsilon}_2)_0} \right)^\alpha \left(D - E \left(\frac{k_{F0} + k_{F1} F_i - T_{room}}{T_{melt} - T_{room}} \right)^m \right)}{\left[1 + C \ln \left(\frac{\dot{\varepsilon}_{2j}}{(\dot{\varepsilon}_2)_0} \right) \right] \left(\frac{\dot{\varepsilon}_{2j}}{(\dot{\varepsilon}_2)_0} \right)^\alpha \left(D - E \left(\frac{k_{F0} + k_{F1} F_j - T_{room}}{T_{melt} - T_{room}} \right)^m \right)} \left[\frac{1 + \left(\frac{1}{\sqrt{3}} + \mu(k_p) \right) k_r \left(\frac{1}{k_{n1}} \right)}{1 + \left(\frac{1}{\sqrt{3}} + \mu(k_p) \right) k_r \left(\frac{1}{k_{n1}} \right)} \right], \quad (3)$$

где \bar{F}_i – отношение усилий резания, полученных из экспериментов при различных скоростях резания при равных подаче и глубине резания;

F_i, F_j – соответственно усилия резания при i-ом и j-ом экспериментах, Н;

μ – коэффициент трения по Зибелю;

$k_{\sigma\gamma}$ – относительное нормальное напряжение в области трения скольжения, МПа;

k_γ – отношение длин участков трения с адгезией и трения скольжения на передней поверхности;

k_{A1} – приведенная скорость деформации, характеризует форму очага пластической деформации в зависимости от переднего угла инструмента γ , угла наклона адиабатической плоскости сдвига Φ , и длины трения с адгезией по передней грани.

Коэффициенты k_{F0}, k_{F1} определяются из предположения, что температура есть функция усилия $T_i = T_i(F_i)$. Предполагая, априори, линейный характер зависимости, имеем:

$$T_i = k_{F0} + k_{F1} F_i. \quad (4)$$

Коэффициенты k_{F0}, k_{F1} при подстановке в (2) являются зависимыми, поэтому для их адекватного определения необходимо дополнительное условие, в нашем случае ограничение по значениям температуры:

$$k_{F0} + k_{F1} F_i > T_{room} = 20 \text{ }^\circ\text{C}. \quad (5)$$

Значения $\dot{\varepsilon}_2, T$, а также коэффициентов $k_{\sigma\gamma}, k_\gamma, k_{A1}$, входящих в (3) определяются по результатам численного моделирования процесса резания материала аналога в САЕ-системе Deform 2D. Моделирование производилось для диапазона скоростей резания 45-75 м/мин, подача на зуб – 0,1-0,2 мм/зуб, глубина резания от 0,1 – 0,5 мм в соответствии с планом экспериментальных исследований.

В качестве материала аналога использовался жаропрочный сплав на никелевой основе Inconel 718 (Ni+Co 50-55%, Cr 17-21%, Mo 2,8-3,3%, Nb 4,75-5,5%, Al 0,65-1,15%, Ti 0,65-1,15%), параметры которого представлены в табл. 3.

Для определения параметров вязкопластического упрочнения (коэффициент C), в первом приближении берутся свойства материала, учитывающие деформационное упрочнение, полученные в результате статических испытаний на разрывной машине. Т.е. значения коэффициентов D, E, m принимаются равными: D=1, E=0, m=0. Коэффициенты α и $(\dot{\varepsilon}_2)_0$ принимаются равными: $\alpha=0, (\dot{\varepsilon}_2)_0 = 1$. Коэффициент трения по Зибелю $\mu=0,12$

Значение параметров деформационного упрочнения (коэффициенты A, B, n) определяются по результатам испытаний на растяжение, либо у материала аналога.

Применяя регрессионный анализ, из уравнений (3) и (4) были получены следующие значения неизвестных коэффициентов C, k_{F0}, k_{F1} :

$$C=0,0134; k_{F0}=261,796; k_{F1}=0,95. \quad (6)$$

Подставляя значения найденных коэффициентов в (1), получим модель реологических свойств материала. Коэффициенты модели в

Таблица 3. Параметры модели Джонсона-Кука для материала-аналога Inconel 718

A	B	n	C	m
1000	458	0,18	0,0105	2,3

Таблица 4. Коэффициенты модели реологических свойств материала

A	B	n	C	m
1241	622	0,6522	0,0134	1,3

дальнейшем уточняются посредством проведения дополнительных расчетов в САЕ-системе Deform 2D путем сопоставления экспериментальных значений усилий резания с расчётными. В табл. 4 представлены коэффициенты модели после уточнения.

3. РАЗРАБОТКА ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА БОКОВОГО ФРЕЗЕРОВАНИЯ

На основе рассчитанной модели реологических свойств материала разработана двухмерная имитационная модель обработки материала в САЕ-системе DEFORM2D, 3D. Разработка двухмерной модели осуществлялась аналогично мо-

дели, описанной в работе ранее [9]. Применялась следующая модель процесса фрезерования (рис. 2).

Разработка трехмерной модели процесса резания проводилась в программном обеспечении DEFORM3D. Применялась следующая модель процесса фрезерования (рис. 3). В качестве режущего инструмента в модели используется фреза со стружкоделительными канавками.

В моделях заготовки был выполнен срез глубиной 0,3 мм, [рис. 1в] имитирующий поверхность после работы предыдущего зуба. Данная операция была введена с целью сокращения времени расчета за счет оптимальной генерации сетки программой. Инструмент в модели рассматривается как абсолютно жесткое тело. Области

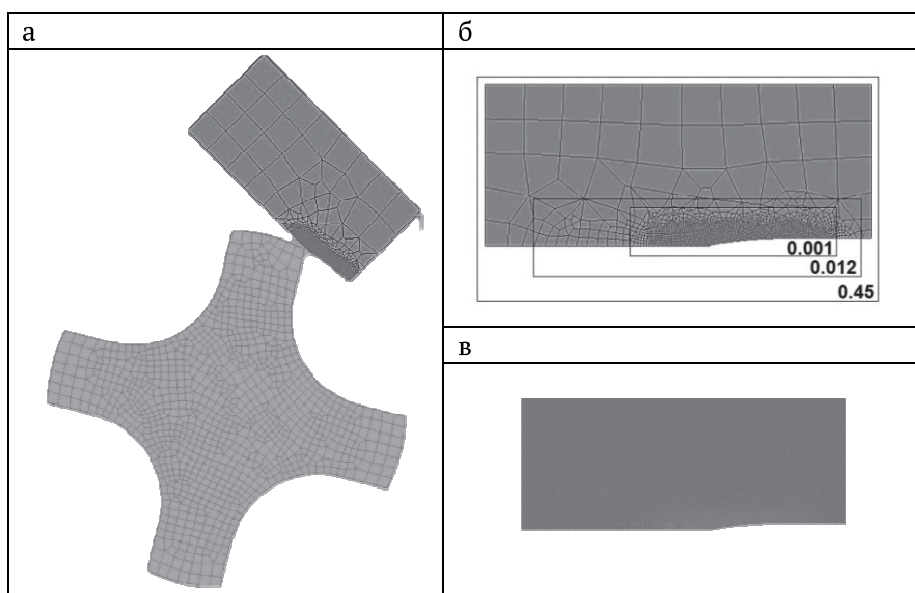


Рис. 2. Моделирование процесса фрезерование в DEFORM2D
а – трехмерная модель процесса фрезерования; б – области сгущения сетки;
в – имитация среза предыдущего зуба

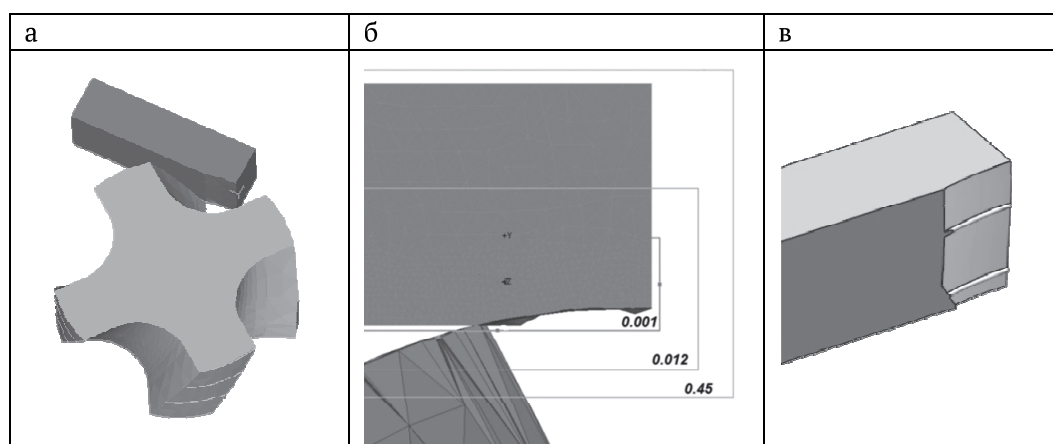


Рис. 3. Моделирование процесса фрезерование в DEFORM 3D:
а – трехмерная модель процесса фрезерования; б – области сгущения сетки;
в – имитация среза предыдущего зуба

сгущения сетки КЭ: внутренняя область – размер элемента 0,03 мм, средняя – 0,13 мм, внешняя – 0,41 мм (рис. 2б). Минимальный размер элемента назначается в зоне стружкообразования. Температура инструмента и заготовки принята равной 20 °С. Постоянный коэффициент трения инструмента о заготовку – 0,12 по Зибелю. Теплообмен с окружающей средой не учитывается.

4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

По результатам расчета модели были получены зависимости изменения силы резания в зависимости от режимов обработки. График изменения составляющих силы резания на режиме резания $S_z = 0,1$ мм; $t = 0,3$ мм; $V = 60$ м/мин представлены на рис. 4, 5.

В табл. 5 представлены средние значения составляющих усилий резания и суммарная составляющая, полученная методами эксперимента и моделирования на режимах обработки $S_z = 0,1$ мм; $t = 0,3$ мм; $V = 45$ м/мин.

Из анализа видно, что данные 2D моделирования хорошо согласуются с экспериментальными данными, а погрешность прогнозирования усилий резания, методом 3D моделированием, не превышает значения 20%. Связи с обеспечением точности и сокращением времени расчета дальнейший подбор оптимальных условий резания осуществляется на основе разработанной двухмерной модели.

В табл. 6 представлены средние значения составляющих усилий резания и суммарная составляющая, полученная методами эксперимента и 2D моделирования на различных режимах.

Наибольшее увеличение силы резания (порядка 20%) происходит при уменьшении скорости резания с 75 до 45 м/мин. При уменьшении скорости резания с 75 до 60 м/мин усилие возрастает на 8,5%.

Исходя из полученных данных, можно заключить, что наиболее благоприятные условия резания при обработке материала 10X11H23E3MP-ВД, с точки зрения минимизации силы, получены при скорости резания 75 м/мин при подаче $S = 0,1$ мм/зуб и припуска $t = 0,3$ мм, при прочих равных условиях.

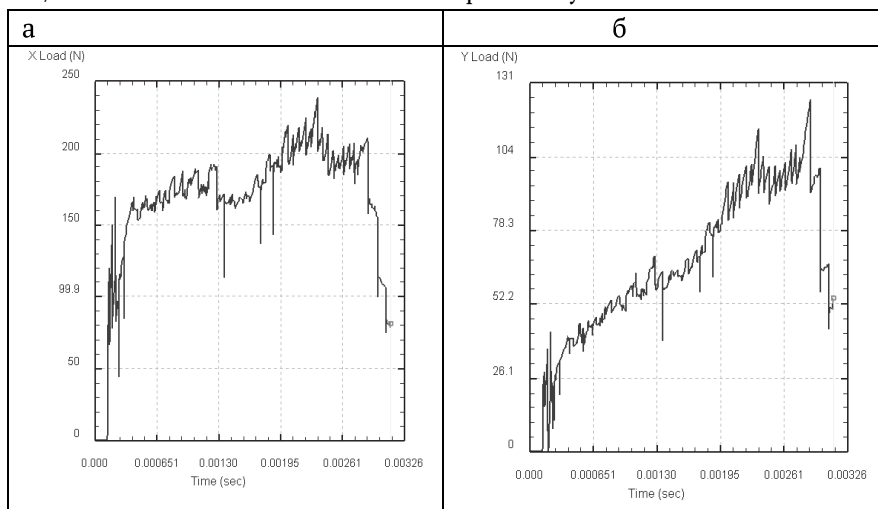


Рис. 4. График изменения составляющих усилий резания P_x , P_y при моделировании в программном обеспечении DEFORM2D на режиме резания $S_z = 0,1$ мм; $t = 0,3$ мм; $V = 60$ м/мин.: а – осевая составляющая P_x , б – радиальная составляющая P_y

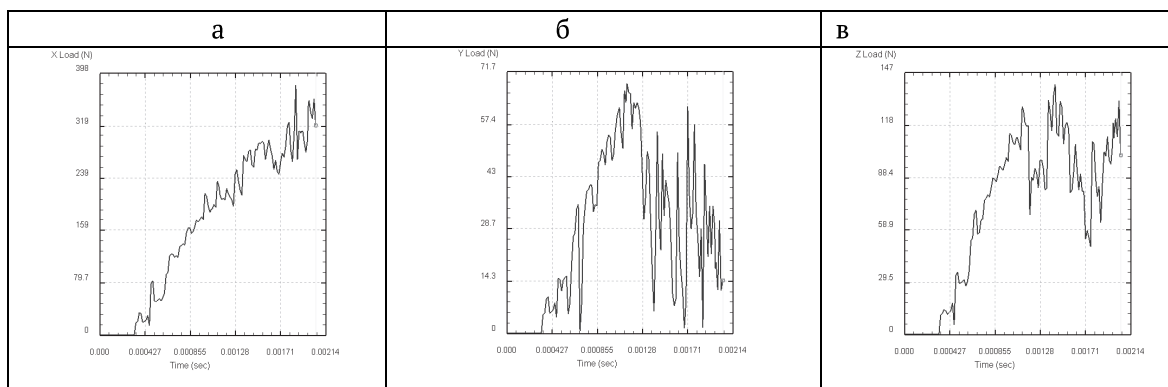


Рис. 5. График изменения составляющих усилий резания при моделировании в программном обеспечении DEFORM3D на режиме резания $S_z = 0,1$ мм; $t = 0,3$ мм; $V = 60$ м/мин.: а – осевая составляющая P_x , б – радиальная составляющая P_y , в – касательная составляющая P_z

Таблица 5. Значения усилий резания при обработке на режимах $S_z = 0,1\text{мм}$; $t = 0,3\text{мм}$; $V = 45\text{м/мин}$

	V, м/мин	Px	Py	Pz	PΣ
Данные эксперимента	45	141,49	107,63	36,17	181,421
Данные 2D моделирования	45	173,05	53,51	-	181,13
Данные 3D моделирования	45	200,41	32,55	60,52	211,86

Таблица 6. Значения усилий резания при моделировании обработки на режимах $S_z = 0,1\text{мм}$; $t = 0,3\text{мм}$; $V = 45\text{м/мин}$

	V, м/мин	Px	Py	Pz	PΣ
Данные 2D моделирования	45	173,05	53,51	-	181,13
	60	160,41	45,88	-	166,83
	75	150,32	32,56	-	153,81

5. ВЫВОДЫ

1) Разработана имитационная модель процесса резания в среде программного обеспечения DEFORM2D, 3D;

2) Проведен реверс-инжиниринг свойств материала по анализу усилий резания;

3) Подтверждена адекватность разработанной модели на основе сравнения усилий резания, полученных в процессе эксперимента и моделирования;

4) Данные 2D моделирования хорошо согласуются с экспериментальными данными, а погрешность прогнозирования усилий резания, методом 3D моделированием, не превышает значения 20%.

5) Наиболее благоприятные условия резания при обработке материала 10X11H23E3MP-ВД, с точки зрения минимизации силы, получены при скорости резания 75м/мин при подаче $S = 0,1$ мм/зуб и припуска $= 0,3$ мм, при прочих равных условиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мазур Н.П., Внуков Ю.Н., А.И. Грабченко, В.Л. Доброскок, В.А. Залого, Ю.К. Новоселов, Ф.Я. Якубов. Основы теории резания материалов: учеб. для вузов. 2-е изд. М.: Харьков: НТУ «ХПИ», 2013. 534 с.
2. Ezilarasan C., Senthilkumar V.S., Velayudham A. Theoretical predictions and experimental validations on

- machining thin Nimonic C-263 super alloy// Simulation Modelling Practice and Theory. 2014. 40. P.192–207.
3. Abdulah Altin. Optimization of the turning parameters for the cutting forces in the Hastelloy X superalloy based on the Taguchi method// Materials and technology. 2014. 48. P. 249-254
4. Thakur D.G., Ramamoorthy B., Vijayaraghavan L. Study on the machinability characteristics of superalloy Inconel 718 during high speed turning// Simulation Modelling Practice and Theory. 2009. 30. P. 1718-1725
5. Krain H.R., Sharman A.R., Ridgway K.C. Optimisation of tool life and productivity when end milling Inconel 718TM// Journal of Material Processing Technology. 2007. 189. P. 153-161
6. Usama Umer, Lijing Xie, Xibin Wang. Finite element chip formation analysis for high speed milling operations// Transaction of the CSME/de la SCGM. 2008 Vol. 32. No. 3-4.
7. Хаймович А.И., Сурков О.С., Кондратьев А.И., Алексеев В.П. Экспериментальное исследование обрабатываемости жаропрочной стали 10X11H23T3MP-ВД применяемой при изготовлении деталей ГТД на фрезерном оборудовании с ЧПУ// Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С. П. Королёва (НИУ) №5 (47). Часть 3. Самара. 2014.
8. Khaymovich A.I., Balyakin A.V., Kondratyev A.I. Methodology of rheological material properties phenomenological modeling at high speed cutting by reverse analysis // Research Journal of Applied Sciences. 2014. 9(11). P. 753-760.
9. Понятов Д.С., Алексеев В.П. Разработка имитационной модели процесса резания при обработке труднообрабатываемого материала в CAE - системе DEFORM 2D// Сборник трудов студенческой научно – технической конференции «Лукачевские чтения 2015». 2015. СГАУ.

OPTIMIZATION OF PROCESSING CONDITIONS OF HARD MATERIAL BASED ON SIMULATION MODEL IN THE MILLING PROCESS CAE-SYSTEMS DEFORM

© 2015 V.V. Bydanov, V.P. Alekseev

Samara State Aerospace University named after Academician S.P. Korolyov
(National Research University)

This article describes how to optimize processing conditions heat-resistant steel 10H11N23T3MR-VD in modern CAE-system DEFORM. A simulation model of milling process necessary for analyzing the effect of cutting conditions on the formation efforts. An reverse-engineering properties of the material for the analysis of the cutting forces. The analysis and processing of the simulation results. The comparison of simulation results with experimental data to confirm the adequacy of the resulting simulation model of the milling process.

Keywords: machining, simulation of the cutting process, optimization of the processing conditions, cutting conditions, cutting forces, cutting tool geometry, process chip, the processing, the adequacy of the experimental studies, simulation model, CAE - system.

Victor Bydanov, Student. E-mail: viktorbydanov@gmail.com
Vyacheslav Alekseev, Engineer at the Production of Aircraft Engines Department. E-mail: alexeev.v.p@mail.ru