МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЖАРОПРОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ В УСЛОВИЯХ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ ОБРАБОТКИ РЕЗАНИЕМ

© 2012 А.И. Хаймович, А.Н. Жидяев

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

Поступила в редакцию 29.05.2012

В данной статье рассматривается моделирование реологических свойств вязких жаропрочных сплавов, подвергнутых высокоскоростной обработке (ВСО) фрезерованием. На основе статистической обработки экспериментальных данных по измерению усилий резания получена модель определяющих отношений типа Джонсона-Кука. Дан анализ поведения обрабатываемого материала при температурах резания, близких к точке полиморфных превращений.

Ключевые слова. Высокоскоростное фрезерование, жаропрочные сплавы, реологические свойства, модель Джонсона-Кука.

Значительную часть элементов газотурбинного двигателя составляют детали, имеющие сложнофасонные поверхности, такие как лопатка, крыльчатка, блиск и др. Большинство из этих деталей изготавливаются из жаропрочных сплавов, обработка которых вызывает ряд трудностей.

Целью настоящей работы является изучение и моделирование реологических свойств вязких жаропрочных хромисто-никелевых сплавов, подвергнутых высокоскоростной обработке (BCO) фрезерованием.

В качестве объекта исследования был выбран сплав ХН45МВТЮБР-ИД широко применяемый для производства компрессорных лопаток ГТД.

Известно, что при ВСО закаленных сталей при регистрации зависимости усилие резания – скорость резания наблюдаются так называемые "кривые Соломона", которые показывают снижение сил резания в некотором диапазоне скоростей [1]. Наиболее важным фактором здесь является перераспределение тепла в зоне резания. При небольших сечениях среза в данном диапазоне скоростей основная масса тепла концентрируется в стружке, не успевая переходить в заготовку. Именно это позволяет производить обработку закаленных сталей, не опасаясь отпуска поверхностного слоя.

Обработка вязких хромисто-никелевых сплавов характеризуется своей спецификой, поэтому требует экспериментальных исследований в широком диапазоне температурно-скоростных режимов резания, необходимых для моделирования реологии материала при BCO.

Эксперименты по измерению силы резания проводились с помощью 3-х осевого динамометрического стола Kistler9257В с регистрацией изменения составляющих усилия резания F_x , F_y , F_z в реальном времени. Обработку образцов производили концевой цилиндрической фрезой диаметром 12мм на обрабатывающем центре MikronUCP800 Duro. Технологические параметры обработки: боковой съем s = 0, 1 мм, съем по высоте t = 4 мм, подача на оборот фрезы $f_{of} = 0,32$ мм/об, фрезерование попутное, обработка с СОЖ.

ВСО с точки зрения сопротивления пластическому деформированию характеризуется одновременным действием процессов вязкого упрочнения (вязкотекучесть) и температурного разупрочнения. В виду того, что измерение температуры резания в процессе фрезерования у вершины радиуса инструмента технически затруднительно по причине локализации области интенсивного деформирования в диапазоне 0,01...0,2мм и перемещении очага пластической деформации (ОПД) со скоростью до 800 м/мин, результат измерения имеет большую погрешность и носит оценочный характер. Поэтому для оценки температуры резания целесообразно воспользоваться аналитическим методом, изложенным в работах [3, 4].

Значения температуры θ в зоне резания оценивается по теоретическим зависимостям, которые получены при рассмотрении теплового потока от квазистационарного быстродвижущегося полосового источника тепла постоянной интенсивности, расположенного под углом β в условной плоскости сдвига. Тепловые источники при резании имеют объемный характер, так как пластические деформации металла протекают в определенных объемах зоны резания [2, 3].

Хаймович Александр Исаакович, кандидат технических наук, доцент кафедры механической обработки матеpuaлoв. E-mail berill_samara@bk.ru

Жидяев Алексей Николаевич, аспирант кафедры "Производство двигателей летательных аппаратов". E-mail bududai@mail.ru

Между значениями температуры резания θ и температурой θ_A в условной плоскости сдвига существует связь, которую оценочно можно определить из теоретической зависимости [4]:

$$\frac{\theta}{\theta_{A}} = \frac{1,32Pe^{0.375}B^{0.665}E^{0.055}\left[\cos\gamma + \sin\gamma - B\left(\cos\gamma - \sin\gamma\right)\right]^{0,275}}{F^{0.15}D^{0.045}erf^{0.6}\sqrt{\frac{PeB}{4}}\sin^{0.03}\alpha\left(\cos\gamma + B\sin\gamma\right)^{0.3125}}, (1)$$

где F,D,E- безразмерные комплексы (критерии подобия), определяющиеся выражениями:

$$F=rac{\lambda_p}{\lambda}eta$$
 – критерий, отражающий влияние

геометрии инструмента и отношения теплопроводностей инструментального λ_p и обрабатываемого λ материалов,

$$\beta = \frac{\pi}{2} - (\alpha + \gamma)$$
 – угол заострения режуще-

го клина, рад; α, γ – соответственно задний и передний углы.

$$D = \frac{s}{t}$$
 – критерий, характеризующий геомет-

рию сечения среза;

$$E = \frac{r_u}{s}$$
 – критерий, характеризующий отно-

сительную величину радиуса закругления инструмента *г*_и;

При B>0,4 получаем выражение для температуры резания [4]

$$\theta = n_{on} \frac{0.95\sigma_{s0}Pe^{0.375}E^{0.055}erf^{0.4}\sqrt{\frac{PeB}{4}}}{\sqrt{3}C_{p}\rho B^{0.625}F^{0.15}D^{0.045}(1-\sin\gamma)^{0.65}\sin^{0.03}\alpha}, (2)$$

где *n*_{on} – поправочный коэффициент, учитывающий реальные условия резания.

Для случая $B \ge 0, 4$ соответствующего рациональным режимам резания получена более простая теоретическая формула степенного вида [4]

$$B = \frac{mPe^n}{F^k D^p \left(1 - \sin\gamma\right)^q},\tag{3}$$

в которой коэффициент m и показатели степени n, k, p и q .В зависимости от условий выполнения процессов резания должны определяться по табл. 1 [4].

График зависимости расчетной температуры резания от скорости резания представлен на рис. 1 (б).

Для моделирования силового режима резания в общем виде целесообразно использовать

относительные параметры
$$\overline{\theta} = \frac{\theta - \theta_0}{\theta_{\max} - \theta_0}$$
 – отно-

сительная температура резания; $\overline{v} = \frac{v - v_{\min}}{v_{\max} - v_{\min}}$

– относительная скорость резания;
$$p = \frac{F_{pes}}{\sigma_{s0} st}$$
 –

относительное удельное усилие резания, где σ_{s0} – предел текучести обрабатываемого материала при базовой температуре (в нашем случае σ_{s0} = 600МПа при θ =500°С [5]). Учитывая изложенное, рассматриваемая модель примет вид:

$$p = \psi(\overline{v}, \overline{\theta}) \Big|_{f_z = const} , \qquad (4)$$

где $\psi(\bar{v}, \bar{\theta})$ – функционал, зависящий от реологических свойств материала и геометрии режущей части инструмента.

В данной работе используется феноменологический подход к реологическим свойствам обрабатываемого материала, поэтому для конструирования принципиальной схемы модели воспользуемся корреляционным анализом экспериментальных данных. Графики взаимных корреляций параметров $p, \overline{v}, \overline{\theta}$ представлены на рис. 2

Ре	$\frac{FD^{0,3}(1-\sin\gamma)^{0,25}}{\sqrt{Pe}}$	$\frac{FD^{0,3}}{Pe(1-\sin\gamma)^{0,4}}$	m	n	k	р	q
<i>Pe</i> ≥120	≤0,03	≤ 0,05	0,80	-0,14	-0,03	-0,01	0,95
	≤0,45	≤ 0,665	0,56	-0,06	0,09	0,03	1,00
		>0,665	0,35	0,36	0,56	0,16	1,20
	≥0,45	≤ 0,665	0,51	0,02	0,23	0,07	1,04
		>0,665	0,30	0,47	0,76	0,23	1,25

Таблица 1. Значения коэффициентов для определения угла относительной плоскости сдвига [4]



Рис. 1. Зависимость составляющих и результирующей силы резания F и расчетной температуры резания θ от скорости резания при высокоскоростном фрезеровании образца из ХН45МВТЮБР-ИД (ЭП718 ИД):

подача 0,32 мм на оборот, фреза диаметром 12 мм, боковой съем 0,1 мм, съем по высоте 4 мм



Рис. 2. Корреляция параметров скорость резания V – расчетная температура резания и Т - относительное усилие резания Р при высокоскоростном фрезеровании образца из XH45MBTЮБР-ИД

Анализ корреляционных зависимостей показывает, что скорость резания и вызываемая диссипацией мощности пластической деформации температура резания оказывают совместное мультипликативное воздействие на удельное усилие резания, поскольку ни один из параметров взятых отдельно не показывает сильную корреляционную связь с силой резания. С другой стороны между температурой и скоростью резания существует связь, с коэффициентом корреляции близким к 1, что обуславливается условиями проведения эксперимента и принятой функционально-определенной зависимостью между этими параметрами. Принимая во внимание изложенное, реологические свойства обрабатываемого материала можно представить в виде принципиальной схемы, изображенной на рис. 3, объясняющей феноменологию процесса резания.

Вязкопластические свойства в зависимости от относительной скорости резания $\overline{\nu}$ описываются функционалом $f_1(\overline{\nu})$, температурное разупрочнение – функционалом $f_2(\overline{\theta})$. Коэффициент a_0 интегрировано отвечает за жестко-пластические свойства и за деформационное упрочнение. В данной модели, поскольку $\{s, t, f_z\}$ – *const* для рассмотренных условий эксперимента, деформационное упрочнение как функция технологических параметров не учитывается.



Рис. 3. Принципиальная схема реологических свойств вязкопластического материала, обрабатываемого высокоскоростным резанием

Коэффициент a_1 характеризует степень влияния вязкопластического упрочнения, а коэффициент a_2 – температурного разупрочнения. В общем случае значения коэффициентов являются функциями геометрии режущего инструмента, технологических параметров $\{s,t,f_z\}$, которые определяют размеры и форму ОПД и свойств сопротивления обрабатываемого материала динамической нагрузке при резании. Вектор коэффициентов

$$\begin{pmatrix} a_0 = \sigma_{s0} k(f_z, s, t, \alpha, \gamma,) \\ a_1 = k(f_z, s, t, \alpha, \gamma,) \\ a_2 = \sigma_{s0}(\lambda, \lambda_p, C_p, \rho) \end{cases}$$

получают по результатам обработки экспериментов, причем значение коэффициента $k(f_z, s, t, \alpha, \gamma,)$, учитывающего размеры и форму ОПД, можно оценить аналитически [9].

Вид функциональных зависимостей $f_1(\overline{\nu})$ и $f_2(\overline{\theta})$ можно задать, используя подходы, применяемые в механике сплошных сред, которые устанавливают определяющие соотношения между напряженным и деформированным состоянием в условиях динамического нагружения. Наиболее простой и часто применяемой моделью является эмпирическая модель Джонсона-Кука. Эмпирическая модель Джонсона-Кука [6, 7] определяет следующее соотношения для поля напряжений (σ_{μ})

$$\sigma_{y}(\varepsilon_{p},\dot{\varepsilon}_{p},\theta) = \left(a + b \cdot (\varepsilon_{p})^{n}\right) \left(1 + c \cdot \ln(\overline{\varepsilon}_{p})\right) \left(1 - \overline{T}^{m}\right), (5)$$

где \mathcal{E}_p – эквивалентная пластическая деформация, $\dot{\mathcal{E}}_p$ – эквивалентная скорость деформации, a, b, c, n, m – константы, зависимые от материала. Приведенные скорости деформации $\dot{\mathcal{E}}_p$ и температура \overline{T} , задаются зависимостями

$$\overline{\dot{\varepsilon}}_{p} = \frac{\dot{\varepsilon}_{p}}{\overline{\dot{\varepsilon}}_{p0}}; \ \overline{T} = \frac{T - T_{0}}{T_{nn} - T_{0}}$$

где $\overline{\dot{e}}_{p0}$ – интенсивность скорости пластической деформации, полученная в квазистатических испытаниях, проводимых с целью получения значения предела текучести и параметров упрочнения a, b, n; T_0 – некоторая постоянная температура; T_m – температура плавления. Для $\overline{T} < 0$ предполагается m=1.

Сравнивая представленную на рис. З принципиальную схему реологических свойств обрабатываемого материала и феноменологическую модель определяющих соотношений Джонсона-Кука, можно предложить следующий вид зависимостей для функционалов $f_1(\overline{v})$ и $f_2(\overline{v}): f_1(\overline{v}) = \ln(\overline{v}), \quad f_2(\overline{\theta}) = \overline{\theta}^m$. В этом случае модель реологических свойств вязкопластического материала, обрабатываемого резанием примет вид:

$$p = a_0 + a_1 \ln\left(\frac{v - v_{\min}}{v_{\max} - v_{\min}}\right) \left(1 + a_2 \left(\frac{\theta - \theta_{nn}}{\theta_0 - \theta_{nn}}\right)^{a_3}\right).$$
(6)

Неизвестные коэффициенты, входящие в модель (8) для высокоскоростного фрезерования жаропрочного хромисто-никелевого сплава ХН45МВТЮБР-ИД рассчитывались методом нелинейного регрессионного анализа по экспериментальным и расчетным данным, приведенным на рис. 1. Расчет производился комбинированным методом Розенбрука - квази-Ньютона. Вектор начального приближения коэффициентов – (0,0,0,1). В качестве функции потерь была выбрана квадрат разности значений эксперимент-модель. Расчетные значения коэффициентов, входящих в модель (6) для сплава ХН45МВТЮБР-ИД определены зависимостью (7).

$$p = 0.85 + 0.061 \ln\left(\frac{v - 40}{560}\right) \left(1 - 1.347 \left(\frac{\theta - 2000}{1543}\right)\right). (7)$$

Достоверность модели (7) составляет 66,3%, что является высокой величиной, несмотря на разброс экспериментальных значений усилий резания относительного номинального значения, вызванного вибрациями фрезы по резонансным частотам. Распределение среднеквадратичных отклонений рассчитанных по модели (7) и наблюдаемых значений представлено на рис. 4. На рис. 5 представлен 3-х мерный график модели (7) и экспериментально полученные значения относительных усилий резания для сплава ХН45МВТЮБР-ИД.

Анализируя данные, представленные на рис.4, можно сделать следующие выводы.

 Наиболее интенсивный рост вязкопластических свойств (скоростного упрочнения) обрабатываемого материала наблюдается в диапазоне скоростей резания 40-200м/мин. Вязкопластические свойства явно подчиняются логарифмическому закону, что хорошо объясняется механизмами дислокационной теории сопротивления пластическому деформированию. Наличие интерметаллидных включений искажает матрицу сложнолегированного многофазного сплава, что препятствует движению дислокаций, ответственных за пластическую деформацию.

Модель: p=a0+a1*log((v-40)/560)*(1+a2*((T-2000)/(1543))**a3 p=0,85+0,061*log((x-40)/560)*(1-1,347*((v-2000)/(1543))**1)



Рис. 4. Модель реологических свойств (реологическая поверхность) и экспериментальные данные (относительное усилие - скорость резания – температура резания) при высокоскоростном фрезеровании образцов из хромисто-никелевого сплава ХН45МВТЮБР-ИД

2. В диапазоне скоростей резания 50-350 м/ мин повышенная температура в зоне резания способствует увеличению вязкопластического упрочнения. Об этом свидетельствует увеличение наклона касательных к изотермическим сечениям реологической поверхности (рис. 4) с ростом температуры. Интенсивное охлаждение за счет подачи СОЖ в зону резания в этом скоростном диапазоне позволяет существенно снизить усилия резания. Этот вывод хорошо согласуется с практикой фрезерования сплава ХН45МВТЮБР-ИД.

3. В диапазоне скоростей резания от 400м/мин и выше наблюдается температурное разупрочнение обрабатываемого материала (соответствующий температурный диапазон обработки без подачи СОЖ - 1000 °С и выше.). Температурное разупрочнение невелико и не компенсирует рост вязкопластического упрочнения.

4. Анализ экспериментальных данных по соотношению силы и скорости резания показывает, что в диапазоне скоростей резания 450..580м/мин, что соответствует температурному интервалу1050...1200 °С, наблюдается локальное снижение усилия резания. Этот феномен локального снижения усилия резания при высокоскоростном фрезеровании в области высоких температур носит название "кривой Соломона" [1]. Для объяснения причины этого явления следует обратиться к квазибинарной диаграмме состояния Ni-Cr. Из диаграммы [8] следует, что температура 1180 °С является температурой эвтектойдного превращения для сплавов с содержанием Ni 35-62% по массе. Поэтому сплав, находящийся в температурной области близкой к рассмотренной, претерпевает полиморфное $\alpha + \gamma \Box = \beta + \gamma$ превращение. Такое метастабильное состояние является причиной локального снижения усилия резания за счет дополнительной энергии, кото-



Рис. 5. Распределение среднеквадратичных отклонений модель-эксперимент при ВСО сплава XH45МВТЮБР

рая выделяется на пластическую деформации при смене типа кристаллической решетки. В целом, снижение усилия составляет не более 20% от достигнутого максимального значения, поэтому фрезерование в данном температурном диапазоне не может рассматриваться в качестве рекомендованных технологических режимов.

5. Для моделирования реологических свойств материала, подвергнутого механической обработке в температурной области полиморфного превращения и соответствующей этой области "кривой Соломона" по усилиям резания, целесообразно использовать несколько кусочно-нелинейных аппроксимирующих зависимостей вида (6). В этом случае в качестве реперных значений скоростей и температур из (6) будут применимы следующие величины: $v_0 = \{v_{\min}, v_{01}, v_{02}\}, \theta_{nn} = \{\theta_{01}, \theta_{02}, \theta_{03}\}, \theta_0 = \{\theta_{\min}, \theta_{01}, \theta_{02}\},\$ где индекс min относится к минимальной скорости резания, индексы 01,02,03 - к значениям на входе, в точке локального минимумапо усилиям и на выходе из области полиморфных превращений. Постоянные коэффициенты, входящие в зависимость (6) будут определяться матрицей a_{ii} , где i = (0, 1, 2, 3), j = (01, 02, 03).

Подводя итог материалам, изложенным в данной статье, можно сделать выводы:

Предложенная авторами феноменологическая модель вязко-пластичного материала достоверно отражает его реологию при высокоскоростном фрезеровании.

Полученное локальное снижение усилия резания в области полиморфных превращений при обработке фрезерованием сплава ХН45МВТЮБР-ИД незначительно, поскольку требует использования специального режущего инструмента с оптимизированной под эти режимы геометрией и проведения дальнейших исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Виттингтон К., Власов В.Высокоскоростная механообработка. URL: http://www.delcam.ru/public/ sg 02.11 1.pdf (дата обращения 12.05.2012).
- Розенберг, А.М., Еремин, А.Н. Элементы теории процесса резания металлов. М.: Машгиз, 1956. 319 с (38)
- Силин С.С. Теоретическое определение параметров процесса резания//Производительная обработка и технологическая надежность деталей машин. Межвузовский сб. научных трудов. Ярославль: ЯПИ. №6. 1977. С. 3-16.
- Силин С. С. Метод подобия при резании материалов. М.: Машиностроение, 1979. 152 с.
- Авиационные материалы: Справочник в 9 томах [под ред. д.т.н. Р.Е. Шалина]. Т.З Жаропрочные стали исплавы. Сплавы на основе тугоплавких металлов. Ч.1 Деформируемые жаропрочные стали и сплавы. М.: НПО «ВИАМ», 1989. 570 с.
- Johnson, G.R. Cook, W.H. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high//Proceedings of the 7th International Symposium on Ballistics.-1983.- p 541-547/. URL: http://www.lajss.org/HistoricalArticles/ A%20constitutive%20model%20and%20data% 20for%20metals.pdf (дата обращения 12.05.2012).
- Steinberg D.J., Cochran S.G., Guinan M.W. A constitutive model for metals applicable at high-strain rate // JournalofAppliedPhysics.-51: 1498, 1980. URL: http:// link.aip.org/link/?JAPIAU/51/1498/1 (дата обращения 12.05.2012).
- ХимушинФ.Ф. Жаропрочные стали и сплавы. М.: Металлургия, 1969. 752 с.
- Хаймович А.И., Сурков О.С., Хаймович И.Н. Методика определения оптимальных параметров при ортогональном резании на основе аналитической модели очага пластической деформации // Известия Самарского научного центра РАН. 2011. №11. С186.

MODELLING OF RHEOLOGICAL PROPERTIES OF HEAT RESISTING MATERIALS IN THE CONDITIONS OF HIGH-SPEED PROCESSING BY CUTTING

© 2012 A.I. Khaimovich, A.N. Zhidyaev

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

In this article modeling of rheological properties of the viscous heat resisting alloys exposed to high-speed milling is offered. The constitutive model of Johnson-Cook type is received by statistical processing of experimental data of cutting strength measurement. The material behavior at the cutting temperatures close to a point of polymorphic transformations is given.

Key words. High speed milling, heat resisting alloys, rheological properties, Johnson-Cook constitutive model.

Alexander Khaimovich, Candidate of Technics, Associate Professor at the Machining Materials Department. E-mail berill_samara@bk.ru Alexey Zhidyaev, Graduate Student at the Production of Aircraft Engines Department. E-mail bududai@mail.ru