

гранулометрического состава, используемых материалов и траекторий движения, а также в значительной степени от конструкции электродуговых плазмотронов и режимов генерации плазменных потоков. В связи с этим для обеспечения высокого качества покрытий был проведен контроль геометрии ядра пламенной струи и скорости напыляемых частиц, с помощью метода скоростной видео съемки.

Использование конического сопла позволило увеличить скорость частиц в среднем на 20-30%. Уменьшение угла раскрытия насадка приводит к увеличению скорости частиц, а так же к уменьшению градиента скоростей по сечению ядра плазменной струи. Как показали эксперименты увеличение длины насадка больше высокотемпературной зоны плазменной струи, не приводит к дальнейшему увеличению скорости частиц. Так как в формировании покрытия участвуют нагретые частицы с малым разбросом скоростей, это позволит образовывать более равномерные покрытия с хорошими механическими и эксплуатационными свойствами. Так же эксперимент показал, что использование профилированного сопла приводит к увеличению высокотемпературной зоны плазменной струи до 40%. Уменьшение угла раскрытия насадки не приводит к значительному увеличению ядра, однако увеличивается ширина. Частицы напыляемого материала в плазменной

струе движутся по различным траекториям, увеличение объема приведет к большему времени пребывания в ядре. Что хорошо подтверждается проведенным экспериментом. Во время экспериментов порошок подавался в плазменную струю в равных количествах. Из анализа кадров видно увеличение количества треков оставляемыми частицами. В свою очередь это приведет к увеличению коэффициента использования материала.

В зоне нагрева и ускорения частиц применение конического сопла, пристыкованного непосредственно к выходному торцу анода плазмотрона, позволило увеличить эффективность нагрева частиц, за счет сохранения высокой температуры плазменной струи на большей дистанции. Повышение температуры струи происходит в первую очередь по причине предотвращения подмешивания в нее холодного атмосферного воздуха. На протяжении всего этого участка градиенты температуры поперек струи будут меньше. Использование плазмотрона с профилированным соплом позволит разрабатывать новые виды покрытий с заданной структурой и свойствами для повышения эксплуатационных характеристик деталей, работающих в условиях повышенных температур и нагрузок, например, поршни двигателя беспилотного летательного аппарата, детали горячего тракта газоперекачивающих агрегатов, лопатки и сопловые секции турбин и других

УДК 621.77

## **ФЕНОМЕНОЛОГИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПОВЕДЕНИЯ ЖАРОПРОЧНОГО СПЛАВА ПРИ ВЫСОКОСКОРОСНОМ ФРЕЗЕРОВАНИИ**

© 2012 А.И. Хаймович, А.Н. Жидяев.

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

## **PHENOMENOLOGICAL MODEL OF THE HEAT RESISTING ALLOYS EXPOSED BY HIGH-SPEED MILLING**

© 2012 A.I. Khaimovich, A.N. Zhidyaev

Samara State Aerospace 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.

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

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

В качестве объекта исследования для моделирования реологических свойств был сплав ХН45МВТЮБР-ИД широко используемый для производства компрессорных лопаток ГТД.

Известно, что при ВСО некоторых сталей при регистрации зависимости усилия резания – скорость резания наблюдаются так называемые «кривые Соломона», которые показывают снижение сил резания в некотором диапазоне скоростей.

Эксперименты по измерению силы резания проводили с помощью 3-х осевого динамометрического стола Kistler с регистрацией изменения усилий  $F_x, F_y, F_z$  по 3-м осям в реальном времени. Обработку образцов производили торцевой цилиндрической фрезой диаметром 12мм на обрабатывающем центре MikronUCP 800 Duro. Технологические параметры обработки: боковой съем  $s = 0,1$  мм, съем по высоте  $t = 4$  мм.

Для оценки температуры резания  $\theta$  применяли аналитические методы, изложенные в работе [1].

Для моделирования силового режима резания вводили относительные параметры  $\bar{\theta} = \frac{\theta - \theta_0}{\theta_{max} - \theta_0}$  - относительная температура резания;

$\bar{v} = \frac{v - v_{min}}{v_{max} - v_{min}}$  -

относительная скорость резания;  $p = \frac{F_{рез}}{\sigma_{s0} s t}$  -

относительное удельное усилие резания, где  $\sigma_{s0}$  - предел текучести

обрабатываемого материала при базовой температуре. С учетом изложенного модель примет вид:

$$p = \psi(\bar{v}, \bar{\theta}) \Big|_{f_z = const} \quad (1)$$

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

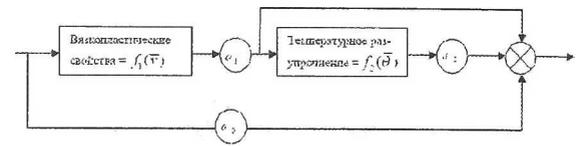


Рис. 1 Принципиальная схема реологических свойств вязкопластического материала, обрабатываемого высоко-скоростным резанием.

Анализ корреляционных зависимостей показывает, что реологические свойства обрабатываемого материала можно представить в виде принципиальной схемы, изображенной на рис.1, объясняющей феноменологию процесса резания.

Вязкопластические свойства в зависимости от относительной скорости резания  $\bar{v}$  описываются функционалом  $f_1(\bar{v})$ , температурное разупрочнение – функционалом  $f_2(\bar{\theta})$ . Коэффициент  $a_0$  интегрировано отвечает за жесткопластические свойства и за деформационное упрочнение.

Коэффициент  $a_1$  характеризует степень влияния вязкопластического упрочнения, а коэффициент  $a_2$  - температурного разупрочнения. Вид функциональных зависимостей  $f_1(\bar{v})$  и  $f_2(\bar{\theta})$  можно задать, основываясь на подходах, применяемых 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 [6,7] по которой можно предложить:  $f_1(\bar{v}) = \ln(\bar{v})$ ,  $f_2(\bar{\theta}) = \bar{\theta}^m$ . В этом случае модель реологических свойств вязкопластического материала, обрабатываемого резанием примет вид:

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

(2)

Неизвестные коэффициенты, входящие в модель (2) 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 и модель (8) для сплава ХН45МВТЮБР-ИД представлена зависимостью (9).

$$p = 0,85 + 0,061 \ln\left(\frac{v - 40}{560}\right) \left(1 - 1,347 \left(\frac{\theta - 2000}{1543}\right)\right) \quad (3)$$

Достоверность модели (3) составляет 66,3%, что является высокой величиной, несмотря на разброс экспериментальных значений усилий резания относительного номинального значения, вызванного вибрациями фрезы по резонансным частотам. На рис. 2 представлен 3-х мерный график модели (3) и экспериментально полученные значения относительных усилий резания для сплава ХН45МВТЮБР-ИД.

Модель  $p = a_0 + a_1 \ln\left(\frac{v - 40}{560}\right) \left(1 + a_2 \left(\frac{\theta - 2000}{1543}\right)^{a_3}\right)$   
 $p = 0,85 + 0,061 \ln\left(\frac{v - 40}{560}\right) \left(1 - 1,347 \left(\frac{\theta - 2000}{1543}\right)^1\right)$

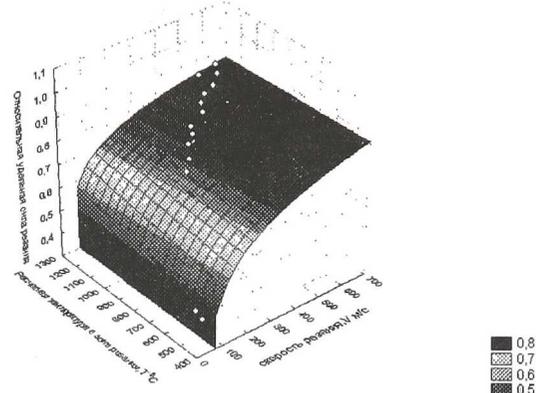


Рис. 2 Модель реологических свойств (реологическая поверхность) и экспериментальные данные (относительное усилие - скорость резания - температура резания) при высокоскоростном фрезеровании образцов из хромисто-никелевого сплава ХН45МВТЮБР-ИД.

Анализируя результаты исследования, можно сделать выводы:

Предложенная авторами феноменологическая модель вязкопластического 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

1. Силин, С.С. Метод подобия при резании материалов [Текст]: / С.С. Силин.- М.: Машиностроение, 1979. - 152 с.
2. Johnson, G.R. Cook, W.H. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high. [Электронный ресурс]: /Johnson G.R. , Cook W.H. //Proceedings of the 7th International Symposium on Ballistics.- 1983.- р 541-547/- <http://www.lajss.org/HistoricalArticles/A%20constitutive%20model%20and%20data%20for%20metals.pdf>.