

УДК 621.91:621.454

ОБОБЩЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НЕСТАЦИОНАРНОЙ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ И ИХ ВЗАИМОСВЯЗЬ С ОСНОВНЫМИ ПАРАМЕТРАМИ ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ

В. Л. ЮРЬЕВ

ОАО «Институт технологии и организации производства»
Тел: (3472) 33 71 71

Изложены особенности нестационарной механической обработки сложнофасонных деталей. Предложены обобщенные характеристики нестационарной обработки. На основании экспериментальных данных установлены взаимосвязи между интенсивностью нестационарности, усадкой стружки и удельными контактными нагрузками при обработке жаропрочных никелевых и титановых сплавов

Нестационарная обработка; интенсивность нестационарности; степень нестационарности

Анализ технологических процессов механической обработки сложнофасонных деталей ГТД в условиях реального производства показывает, что существует значительное количество операций, в которых одновременно и закономерно изменяется ряд технологических параметров (скорость и глубина резания, подача и др.). Процессы, в которых происходит изменение технологических параметров обработки, а следовательно, и температурно-силовых условий в зоне резания при перемещении инструмента вдоль траектории движения, принято называть нестационарными.

Требование оптимизации таких процессов приводит к необходимости введения количественных оценок, позволяющих полностью характеризовать нестационарную механическую обработку.

Одновременное и для каждой детали случайное сочетание изменяющихся параметров не позволяет характеризовать эти процессы по исходным данным.

В качестве оценки целесообразно выбрать некоторый выходной интегральный показатель. В работах [1, 2] в качестве такого показателя рекомендуется использовать значение удельной энергии, затрачиваемой на процесс резания U . Рекомендуемые энергетические критерии, управляя пластической деформацией

и упрочнением в зоне обработки, тесно связаны с износом инструмента, тепловым режимом и качеством поверхностного слоя обработанной детали. Перспективность применения этого показателя определяет также возможность осуществления с его помощью структурной оптимизации различных технологических процессов формообразования.

Применительно к нестационарным процессам значение затрачиваемой энергии (с учетом законов изменения нестационарных параметров) определяется следующим образом:

$$U = \frac{1}{L} \int_0^L U(x) dx, \quad \text{Дж}, \quad (1)$$

где $U(x)$ — текущее значение энергии; L — конечное значение координаты x (при перемещении инструмента относительно детали по двум координатам);

$$U = \frac{1}{LK} \int_0^L \int_0^K U(x, y) dx dy, \quad \text{Дж}, \quad (2)$$

где K — конечное значение координаты y (при обработке поверхностей, в случае перемещения инструмента относительно детали по трем и более координатам).

Для количественной оценки нестационарных процессов необходимо знать их интенсивность, т.е. скорость изменения выбранного энергетического показателя процесса вдоль траектории движения инструмента:

$$h_n = \frac{dU}{dl} = \frac{dU_1}{dP_1} \frac{dP_1}{dl} + \frac{dU_2}{dP_2} \frac{dP_2}{dl} + \dots + \frac{dU_n}{dP_n} \frac{dP_n}{dl}, \quad (3)$$

где P_1, P_2, \dots, P_n — нестационарные технологические параметры.

С учетом конкретных переменных технологических параметров это уравнение примет вид

$$h_n = \frac{dU}{dl} = \frac{dU_1}{dV} \frac{dV}{dl} + \frac{dU_2}{dt} \frac{dt}{dl} + \frac{dU_3}{d\varphi} \frac{d\varphi}{dl} + \frac{dU_n}{d(r/R)} \frac{d(r/R)}{dl}, \quad (4)$$

где V — скорость резания (м/мин); t — глубина резания (мм); φ — главный угол в плане (град.); r — радиус при вершине инструмента (мм); R — радиус обрабатываемой криволинейной поверхности (мм); l — длина пути резания (м).

После соответствующих преобразований это уравнение принимает вид

$$h_n = \frac{(U_1 - U_0) S_{\min}}{l_1 - l_0}, \quad \text{Дж/мин}, \quad (5)$$

где U_0, U_1 — соответственно начальное и конечное значения энергии, затрачиваемой на процесс резания; l_0, l_1 — начальное и конечное значения длины пути резания; S_{\min} — минутная подача.

Наряду с приведенными характеристиками при оценке нестационарных процессов необходимо знать, в каких пределах изменяется энергия при обработке детали. Для этой цели целесообразно ввести понятие степени нестационарности процесса, которая определяется по формуле

$$N_n = \frac{U_1 - U_0}{U_1} \cdot 100\%. \quad (6)$$

Для определения информативности предложенных характеристик необходимо установить их взаимосвязь с основными параметрами процесса резания.

Усадка стружки является косвенным показателем, характеризующим пластическую деформацию в зоне стружкообразования.

Зная зависимость усадки стружки от интенсивности нестационарности, можно судить об изменении в процессе обработки относительной деформации, угла сдвига и т.д.

При увеличении толщины срезаемого слоя в процессе пластического сдвига на Δa относительная деформация $\varepsilon = \Delta a/a$, следовательно, можно установить взаимосвязь между усадкой стружки и относительной деформацией [3]:

$$\xi = \frac{a_{cp}}{a} = \frac{a + \Delta a}{a} = 1 + \varepsilon. \quad (7)$$

Экспериментальные исследования, проведенные при торцевом фрезеровании титанового сплава ВТ22, показали, что с увеличением интенсивности нестационарности происходит уменьшение усадки стружки (ξ) (рис. 1).

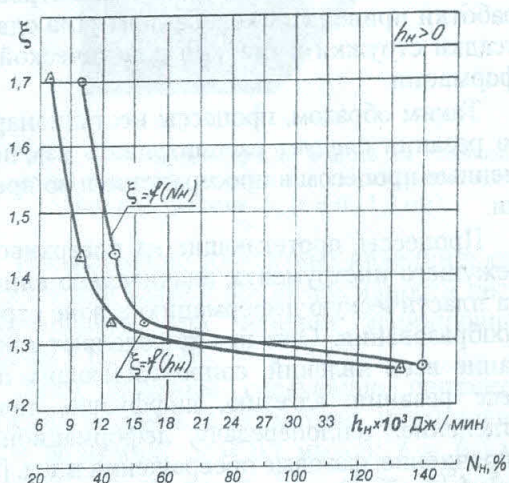


Рис. 1. Влияние характеристик нестационарности процесса на усадку стружки при фрезеровании титанового сплава ВТ22 фрезой из твердого сплава ВК8: $V = 25$ м/мин; $S_z = 0,1$ мм/зуб; $t = 1,0$ мм; $\varphi = 70^\circ$; $\gamma = 0^\circ$; $a = 10^\circ$

Это говорит о том, что с увеличением интенсивности нестационарности пластическая деформация в зоне стружкообразования затрудняется.

И.А.Тиме предложил зависимость между усадкой стружки по толщине и углом сдвига:

$$\xi = \frac{\cos(\Phi - \gamma)}{\sin \Phi}, \quad (8)$$

где Φ — угол сдвига; γ — передний угол резца.

В условиях проведения экспериментов, когда $\gamma = 0$, эта зависимость имеет вид

$$\xi = \frac{\cos \Phi}{\sin \Phi}. \quad (9)$$

Для определения угла сдвига сделаем необходимые преобразования:

$$\begin{aligned}\xi^2 &= \frac{\cos^2 \Phi}{\sin^2 \Phi} = \frac{1 - \sin^2 \Phi}{\sin^2 \Phi}; \\ \xi^2 \sin^2 \Phi &= 1 - \sin^2 \Phi; \\ \xi^2 \sin^2 \Phi + \sin^2 \Phi &= 1; \\ \sin^2 \Phi (\xi^2 + 1) &= 1;\end{aligned}$$

$$\sin \Phi = \sqrt{\frac{1}{1 + \xi^2}}. \quad (10)$$

Анализируя полученные зависимости, приходим к выводу, что в процессе нестационарной механической обработки изменяется напряженно-деформированное состояние зоны стружкообразования. Это проявляется в том, что изменение исходных параметров обработки приводит к колебаниям угла сдвига, усадки стружки и степени пластической деформации.

Таким образом, процессы нестационарного резания следует рассматривать как переменные процессы в пространстве и во времени.

Процессы, протекающие на поверхностях режущего инструмента, значительно влияют на пластическую деформацию в зоне стружкообразования. Они определяют протекание всех явлений, сопровождающих процесс резания: адгезию, диффузию, теплоотделение, теплопередачу, деформационное упрочнение, фазовые превращения и т. д. [3, 4 и др.].

Поэтому очень важно изучить процесс формирования удельных контактных явлений при нестационарных условиях обработки. Из известных методов определения сил, действующих на поверхностях режущего инструмента [4-6 и др.], наиболее предпочтительным является метод, предложенный Н.Н.Зоревым [5]. Он основан на сравнении усилий резания при различных величинах износа задней поверхности режущего инструмента.

Возрастание износа по задней поверхности сопровождается увеличением сил P_x , P_y , P_z за счет увеличения сил, действующих на задней поверхности инструмента. Зная приращение фаски износа Δh_3 , можно определять и сами силы, действующие на задней поверхности. Экспериментально установлено, что между силами на задней поверхности и шириной фаски износа наблюдается пропорцио-

нальная зависимость:

$$\begin{aligned}P'_x &= \Delta P_x \frac{h_3}{\Delta h_3}; \\ P'_y &= \Delta P_y \frac{h_3}{\Delta h_3}; \\ P'_z &= \Delta P_z \frac{h_3}{\Delta h_3}.\end{aligned} \quad (11)$$

Для определения сил, действующих на задней поверхности режущего инструмента, необходимо построить графики изменения проекции сил резания P_x , P_y , P_z в зависимости от ширины фаски износа (рис. 2). При $h_3 = 0$ отрезки, отсекаемые на оси ординат, дадут силы P_x , P_y , P_z , действующие на задней поверхности.

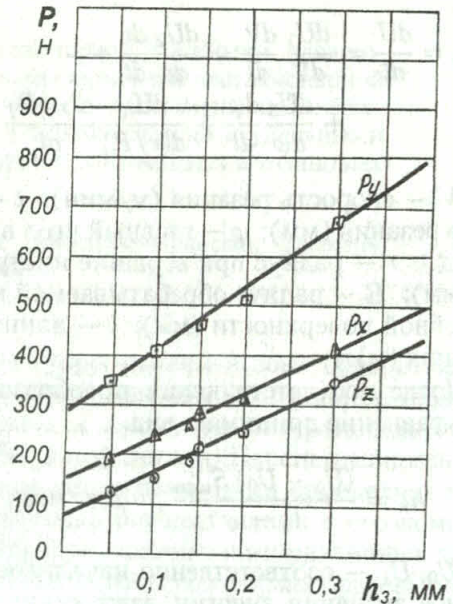


Рис. 2. Влияние ширины фаски износа по задней поверхности h_3 на составляющие силы резания жаропрочного сплава ХН77ТЮР резцом из твердого сплава ВК6-ОМ: $V = 36$ м/мин; $S = 0,1$ мм/об; $t = 0,5$ мм; $\gamma = 75^\circ$; $r = 1,0$ мм

Расчеты элементов механики процесса резания проведены по формулам, приведенным в работах [7, 8], с учетом некоторых изменений [9], позволяющих уточнить схему сил, действующих на инструмент.

Поскольку формирование поверхности детали и износ инструмента протекают под воздействием одних и тех же физических явлений, протекающих на задней поверхности, в данной работе были проведены исследования удельных контактных нагрузок на задней поверхности инструмента при нестационарных условиях.

Обработка деталей при постоянных технологических условиях определяет формирование фаски износа по задней поверхности,

постоянной по длине, которая равна ширине среза [4, 8 и др.] (рис. 3, а). Изменение технологических параметров в процессе обработки приводит к тому, что различные точки режущего лезвия за период стойкости разное время находятся в контакте с деталью. Причем участок режущего лезвия при вершине резца находится в контакте постоянно. По мере удаления от вершины инструмента участки режущего лезвия находятся в контакте с деталью меньшее время, и фаска износа будет уменьшаться к периферии. Следовательно, можно предположить, что в этих условиях фаска износа по задней поверхности будет иметь вид, представленный на рис. 3, б и в.

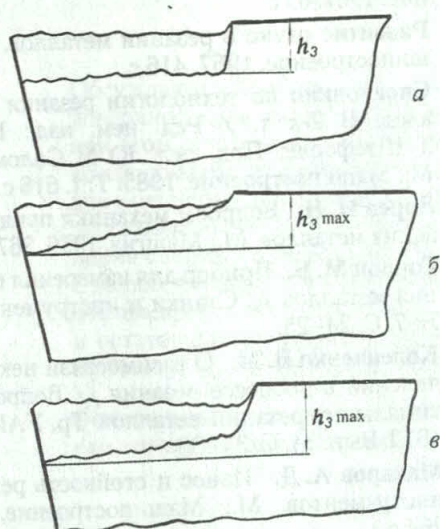


Рис. 3. Форма фаски износа инструмента по задней поверхности при стационарной (а) и нестационарной (б, в) обработке

Для проверки этой гипотезы были проведены эксперименты при точении образцов с переменным припуском. Причем в начальный момент глубина резания была равной нулю, а в конце перехода $t = 1,0$ мм.

Фотографирование режущего лезвия по задней грани показало, что фаска износа имеет треугольную форму (рис. 4, а). Максимальная величина расположена у вершины резца с переходом на вспомогательную заднюю поверхность (рис. 4, б), которая формирует свойства поверхностного слоя и его тонкую кристаллическую структуру. С удалением от вершины резца величина фаски износа уменьшается и доходит до нуля.

Таким образом, экспериментально подтверждено, что при нестационарных условиях форма и площадь фаски износа существенно отличаются от процессов с постоянными условиями. Это необходимо учитывать при

изучении контактных явлений на задней поверхности, закономерностей износа инструмента, адгезионных и диффузионных процессов, являющихся ответственными за износ инструмента и формирование качества поверхностного слоя.

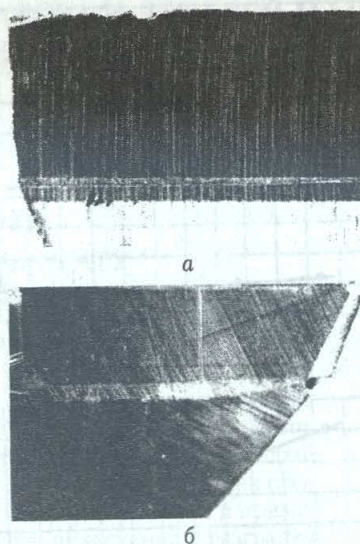


Рис. 4. Фотографии фаски износа на главной задней поверхности (а) и вспомогательной задней поверхности (б) ($t = 0 \dots 1,0$ мм)

Исследование контактных явлений проводилось при изменении интенсивности нестационарности при точении жаропрочного сплава ХН77ТЮР.

Были выбраны следующие параметры режима резания и геометрия инструмента: $V = 36$ м/мин; $S = 0,1$ мм/об; $t = 0,5$ мм; $\gamma = 0^\circ$; $\alpha = \alpha_1 = 10^\circ$; $\varphi = 30^\circ$; $r = 1,0$ мм; $h_3 = 0,3$ мм (при вершине резца).

Увеличение интенсивности нестационарности в исследуемом диапазоне приводит к существенному росту удельных контактных нагрузок. Удельные нормальные давления (q'_N) увеличиваются с 1050 МПа до 1350 МПа, касательные нагрузки (q'_F) изменяются от 540 МПа до 650 МПа. Более интенсивный рост q'_N по сравнению с q'_F приводит к уменьшению коэффициента трения по задней поверхности с 0,545 до 0,475 (рис. 5).

Увеличение интенсивности нестационарности приводит к увеличению радиальной составляющей силы резания P_y от 80 до 500 Н (более чем в 6 раз), в то время как ширина среза увеличивается приблизительно в 3 раза. Этим объясняется значительный рост удельных контактных нагрузок на задней поверхности. Значительное изменение удельных контактных нагрузок на задней поверхности, по-видимому, приведет к существенно-

му изменению характеристик износа режущего инструмента и параметров качества обработанной поверхности, что необходимо учитывать при разработке математических моделей и оптимизации нестационарных процессов обработки.

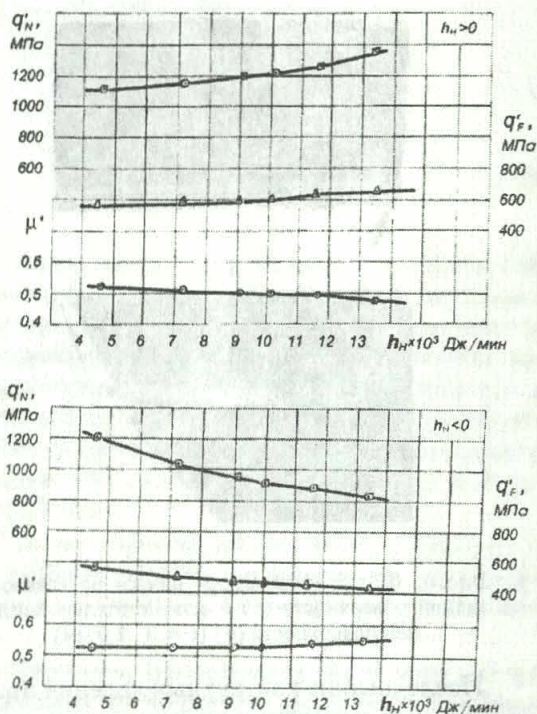


Рис. 5. Влияние интенсивности нестационарности на удельные контактные нагрузки на задней поверхности инструмента при точении жаропрочного сплава ХН77ТЮР резцом из твердого сплава ВК6-ОМ: $S = 0,1$ мм/об; $t = 0,5$ мм; $r = 1,0$ мм; $\varphi = 30^\circ$; $h_3 = 0,3$ мм

ВЫВОДЫ

1. Установлено, что при обработке сложноточенных деталей одновременно и непрерывно изменяется ряд исходных технологических параметров (скорость, глубина и геометрия резания). В результате этого обработка происходит при нестационарных (переменных) технологических условиях.
2. Предложены обобщенные характеристики нестационарности: степень и интенсивность нестационарности.
3. На основании экспериментальных исследований при обработке жаропрочных никельхромовых и титановых сплавов установ-

лена взаимосвязь между обобщенными характеристиками нестационарности, посадкой стружки и удельными контактными нагрузками на задней поверхности, что позволяет использовать их при описании и моделировании нестационарных процессов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Старков В. К. Оптимизация процесса резания жаропрочных сплавов на основе закономерностей формирования тонкой структуры поверхностного слоя: Дис. ... д-ра техн. наук. М., 1979. 421 с.
2. Швец В. В. Некоторые вопросы теории технологии машиностроения. М.: Машиностроение. 1967. 63 с.
3. Развитие науки о резании металлов. М.: Машиностроение, 1967. 416 с.
4. Справочник по технологии резания материалов. В 2-х т. / Ред. нем. изд.: Г. Шпур, Т. Штеферле; Под. ред. Ю. М. Соломенцева. М.: Машиностроение, 1985. Т. 1. 616 с.
5. Зорев Н. Н. Вопросы механики процесса резания металлов. М.: Машгиз, 1956. 367 с.
6. Гордон М. Б. Прибор для измерения сил трения металлов // Станки и инструмент. 1965. № 7. С. 24–25.
7. Коленченко В. М. О взаимосвязи некоторых явлений в процессе резания // Вопросы оптимального резания металлов: Тр. УАИ. Уфа, 1972. Вып. 34. С. 34–38.
8. Макаров А. Д. Износ и стойкость режущих инструментов. М.: Машиностроение, 1966. 264 с.
9. Шустер Л. Ш. Исследование сил и температур, действующих на грани резца // Вопросы оптимального резания металлов: Тр. УАИ. Уфа, 1972. Вып. 34. С. 73–83.

ОБ АВТОРЕ

Юрьев Виктор Леонидович, ген. директор ОАО «Институт технологии и организации производства». Дипл. инж.-механик (УАИ, 1973). Д-р техн. наук по тепловым двигателям ЛА (УГАТУ, 2000). Исследования в области нестационарной механической обработки сложноточенных деталей ГТД из жаропрочных никельхромовых и титановых сплавов.

