

На рис.3 изображен фрагмент принципиальной схемы измерительного усилителя [2], дополненный цепью коррекции нелинейности. В частности, введен реализованный на операционном усилителе  $M_5$  сумматор выходного напряжения усилителя и напряжения поправки. С помощью потенциометров  $R_6$  и  $R_8$  устанавливаются значения коэффициентов  $k$  и  $b$  соответственно.

Еще одним вариантом уменьшения погрешности измерения является способ, при котором рабочая точка фотоприемника стабилизируется отдельным контуром обратной связи по уровню внешней засветки при помощи дополнительного источника потока смещения. Это позволяет стабилизировать рабочую точку фотоприемника при изменении условий внешней освещенности и соответственно устранить влияние нелинейности его характеристики чувствительности.

Для экземпляров фотоприемников с малым коэффициентом нелинейности можно ограничиться лишь введением постоянной подсветки, достаточной для того, чтобы сместить рабочую точку фотоприемника с нелинейного участка в линейную область.

Последние два варианта требуют введения дополнительного источника светового потока в измерительный канал, что связано с усложнением конструкции оптического блока, а также с необходимостью в дополнительных аппаратных затратах на схему управления источником подсветки.

Описанный способ линейной коррекции по уровню внешней засветки был реализован в анализаторе фотоколориметрическом портативном АФП-01, прошедшем испытания для целей утверждения типа средств измерений. Погрешность от нелинейности фотоприемника в АФП-01 имеет величину не более  $\pm 0,001$  по оптической плотности.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мухитдинов М. А., Мусаев Э. С. Светоизлучающие диоды и их применение. М.: Радио и связь, 1988. 80 с.
2. Иванов А. И., Абрамов А. Д. Усилитель фототока с автоматической коррекцией нулевого уровня // Приборы и техника эксперимента. 1998. № 2. С. 57–59.
3. Мирошников М. М. Теоретические основы оптико-электронных приборов: Учебное пособие для вузов. Л.: Машиностроение (Ленингр. отд-е), 1977. 600 с.

#### ОБ АВТОРАХ

**Иванов Анатолий Иванович**, профессор каф. промышленной электроники УГАТУ. Дипл. инженер электронной техники (НЭТИ, 1966), канд. техн. наук по элементам и техническим средствам систем управления (УАИ, 1973). Исследования в области систем управления силовыми установками.

**Абрамов Алексей Джоржович**, аспирант каф. промышленной электроники УГАТУ. Дипл. инженер электронной техники (УГАТУ, 1996). Исследования в области фотоколориметрических измерений.

УДК 621.9.011

### ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ПРОЦЕССОВ РЕЗАНИЯ МЕТАЛЛОВ

**В. В. ПОСТНОВ**

Факультет авиационно-технологических систем УГАТУ  
Тел: (3472) 23 05 26

Изложены особенности напряженно-деформированного состояния зоны контакта инструмента с деталью при нестационарном резании металлов. Разработана модель процесса стружкообразования, учитывающая влияние скорости изменения элементов режима резания на уровень и характер изменения деформаций и напряжений на контактных поверхностях инструмента. Приведены экспериментальные данные по результатам исследования деформаций и сил резания при нестационарной обработке жаропрочных никелевых сплавов

*Нестационарность резания; скорость и ускорение резания; зона сдвига*

#### ВВЕДЕНИЕ

Большинство процессов механообработки реализуется при нестационарном нагружении режущих инструментов. Это может быть обусловлено как переменностью внешних факторов — режима обработки, физико-механических параметров обрабатываемой заготовки, жесткости технологической системы, — так и внутренней нестабильностью процесса резания, связанной с циклическим характером стружкообразования, значительным градиентом удельных нагрузок, температур и скоростей деформации на контактных поверхно-

стях инструмента, изменением температурно-силовой нагруженности зоны обработки вследствие необратимого роста износа режущего инструмента.

Эффективное использование мехатронных станочных систем требует разработки физически обоснованных математических моделей контактных процессов, учитывающих закономерности нестационарного нагружения режущего инструмента. Разработка таких моделей составила цель настоящей работы, определила ее необходимость и актуальность.

### ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ЗОНЫ КОНТАКТА ИНСТРУМЕНТА С ДЕТАЛЬЮ ПРИ НЕСТАЦИОНАРНОМ РЕЗАНИИ

Нестационарный режим резания определяется в каждый момент времени текущими значениями скорости резания  $V_i$ , подачи инструмента  $S_i$ , глубины резания  $t_i$ , а также их производными по времени — ускорением резания  $a_v = dV/d\tau$ , скоростью изменения подачи  $a_s = dS/d\tau$  и скоростью изменения глубины резания  $a_t = dt/d\tau$ .

Исследования процесса деформации срезаемого слоя, проведенные на станке с ЧПУ мод. 16К20Т1 по управляющим программам, предусматривающим обработку с переменной скоростью резания и подачи инструмента (рис. 1), показали, что нестационарность режима обработки приводит к изменению деформационных характеристик процесса стружкообразования. Так, например, угол наклона  $\beta$  условной плоскости сдвига, при сохранении общего характера его зависимостей от скорости резания (рис. 1, а) и подачи инструмента (рис. 1, б) аналогичными стационарному режиму ( $a_v = 0, a_s = 0$ ), зависит от знака и величины ускорения резания и скорости изменения подачи. Увеличение  $a_v$  и  $a_s$  до определенного значения повышает уровень зависимостей  $\beta(V, S)$ , тем самым облегчая условия деформации при стружкообразовании. Следует отметить, что обработка с увеличением  $V$  и  $S$  оказывает большее влияние на уровень и поведение деформационных параметров, чем работа с отрицательными значениями  $a_v$  и  $a_s$ .

Исследования деформированного состояния зоны контакта инструмента с деталью позволили предложить модель стружкообразования при нестационарном резании (рис. 2), в рамках которой изменение скорости  $V$  резания или толщины  $a$  срезаемого слоя приводит к изменению угла наклона  $\beta$  условной плоскости сдвига в пределах зоны сдвига конечной толщины  $\Delta S$ , причем текущее значение угла сдвига  $\beta_i$  определяется из выражений

$$\beta_i = \beta_0 + C_S \ln \left( 1 + \frac{a_v \Delta \tau}{V_0} \right) \text{ при } V = \text{var}; \quad (1)$$

$$\beta_i = \beta_0 \left[ 1 - C_a \left( 1 - \ln \frac{a_i}{a_a \Delta \tau} - x_a \right) \right] \text{ при } S = \text{var}, \quad (2)$$

где  $\beta_0$  — исходное значение угла сдвига при начальных значениях скорости  $V_0$  и толщины срезаемого слоя  $a_0$  в момент времени  $\Delta \tau = 0$ ;  $C_S$  и  $C_a$  — постоянные, зависящие от ускорения резания  $a_v$  и скорости изменения подачи  $a_a$  соответственно;  $x_a$  — приращение толщины срезаемого слоя, при котором отсутствует изменение угла сдвига.

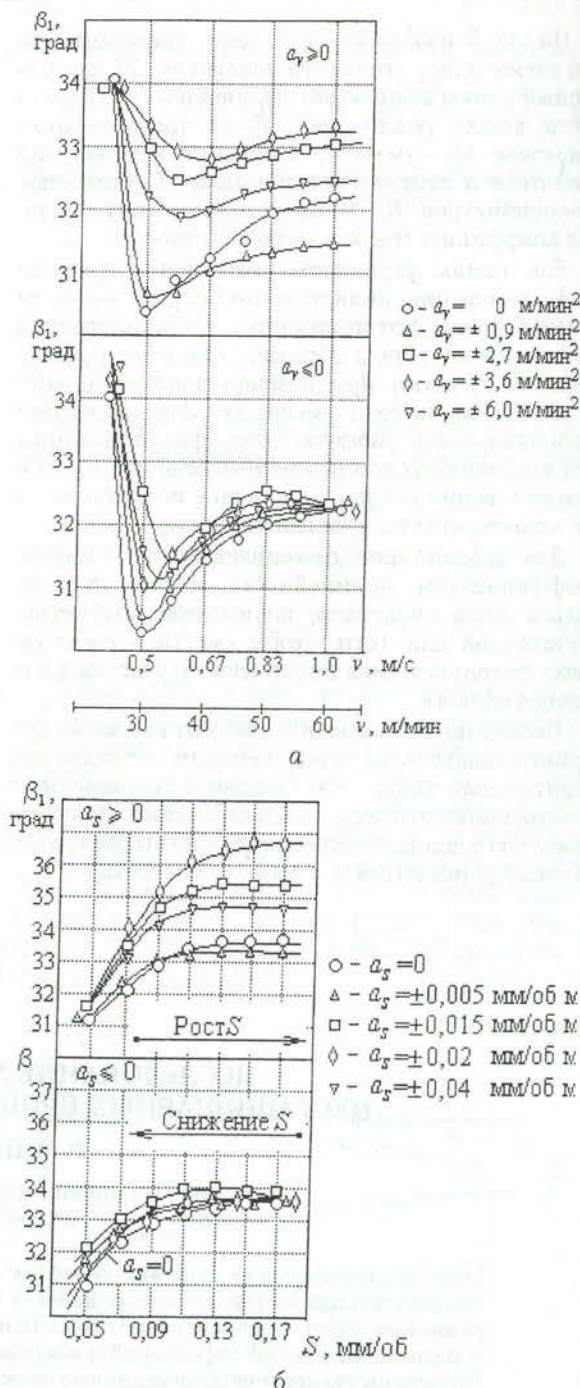


Рис. 1. Влияние величины и знака ускорения резания (а) и скорости изменения подачи (б) на угол сдвига при точении сплава ХН73МБТЮ резцом ВК8

При этом принято, что если материал срезаемого слоя, непосредственно прилегающий к режущей кромке, будет перемещаться с исходной скоростью резания за время единичного цикла стружкообразования на величину  $l_p$  из исходного положения  $O$  в исходное положение  $O'$ , то у другого (наружного) конца зоны сдвига будет происходить запаздывание в перемещении на величину  $\Delta l$  вследствие так называемого «обратного течения» материала [3].

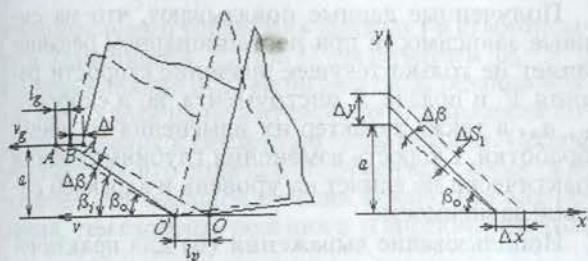


Рис. 2. Модель для анализа изменения условий стружкообразования при нестационарном резании

Таким образом, при переменной скорости резания и подаче инструмента в пределах зоны сдвига конечной толщины  $\Delta S_1$  будет происходить изменение угла наклона на некоторую величину  $\Delta\beta$ . Поскольку при линейном изменении  $V$  и  $S$  описанный выше процесс осуществляется непрерывно, результирующая зависимость  $\beta$  при нестационарном резании будет представлять собой кривую, при достаточно больших  $a_v$  и  $a_s$  располагающуюся выше, чем аналогичные зависимости при стационарном резании, что и подтверждается экспериментально (см. рис. 1). Увеличение  $a_v$  и  $a_s$  свыше некоторого критического значения приводит к некоторому росту толщины  $\Delta S_1$  зоны сдвига, что обусловлено необходимостью затрат определенного времени на процессы деформации в зоне стружкообразования и ограничивает возрастание скорости деформации из условий упрочнения и температурного разупрочнения материала в зоне сдвига [3].

### НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ЗОНЫ КОНТАКТА ИНСТРУМЕНТА С ДЕТАЛЬЮ И СИЛЫ РЕЗАНИЯ ПРИ НЕСТАЦИОНАРНЫХ РЕЖИМАХ ОБРАБОТКИ

На базе предложенной выше модели нестационарного стружкообразования (см. рис. 2) рассмотрено напряженное состояние зоны сдвига, которое в любой точке линии  $A_0, B_0$  ( $A_i, B_i$ ), эквивалентной условной плоскости сдвига, может быть представлено напряжением  $\tau_p$  и гидростатическим напряжением  $p$  (рис. 3). При этом принято, что схема деформированного состояния зоны стружкообразования соответствует в основном схеме простого сдвига [1].

Как следует из зависимостей (1) и (2), при обработке с переменными значениями скорости резания и толщины срезаемого слоя происходит непрерывное изменение угла наклона условной плоскости сдвига  $\beta$  на некоторую величину  $\Delta\beta$ . При этом, поскольку толщина зоны сдвига становится переменной, характерное для стационарного резания линейное распределение гидростатического давления  $p_{Vi}$  вдоль  $A_i B_i$ , экспериментально и теоретически полученное в работе [2], нарушается вследствие дополнительного упрочнения

$d\tau_p/dS$  и становится равным

$$p_{Vi} = \tau_{pi} \left[ 1 + 2 \left( \frac{\pi}{4} - \beta_i \right) - \left( \frac{d \ln \tau_p}{d\beta} \right) 2\beta \frac{\Delta S_{1i} \sin \beta_i}{a_i} \right]. \quad (3)$$

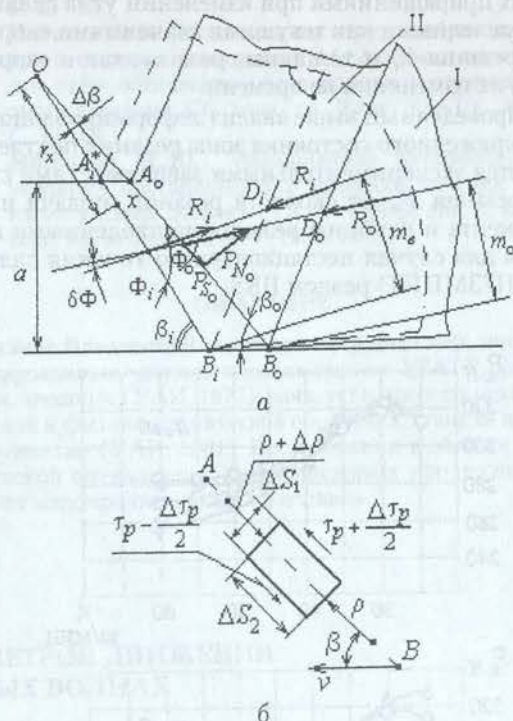


Рис. 3. Схема сил резания (а) и напряжений, действующих на элемент зоны сдвига (б)

Угол между результирующей силой  $R_i$  и условной плоскостью сдвига (рис. 3, а)

$$\operatorname{tg} \Phi_i = \frac{p_{Ni}}{p_{Si}} = 1 + 2 \left( \frac{\pi}{4} - \beta_i \right) - \frac{a_i}{2\Delta S_{1i} \sin \beta_i} \left( \frac{d \ln \tau_p}{d\beta} \right) d\beta. \quad (4)$$

Условие постоянства угла  $\Phi$  из выражения (4) можно определить в виде

$$\Delta\beta = \frac{1}{4C_S} \ln \frac{\tau_{p0}}{\tau_{pi}}, \quad (5)$$

где  $C_S = (\Delta S_1 \sin \beta)/a$  — относительная толщина зоны сдвига.

Таким образом, возможное запаздывание в изменении положения условной плоскости сдвига контролируется величиной упрочнения или разупрочнения материала детали в зоне сдвига и относительной толщиной этой зоны.

В соответствии со схемой действия сил резания, представленной на рис. 3, а, тангенциальная составляющая  $P'_{zi}$  результирующей силы резания может быть записана в виде

$$P'_{zi} = \tau_{pi} a_i b_i \frac{\cos(\rho_i - \gamma)}{\sin \beta_i \cos \Phi_i}, \quad (6)$$

где  $a_i, b_i$  — соответственно толщина и ширина срезаемого слоя, рассчитанные с учетом условий несвободного резания по формулам, приведенным в работе [4].

Выражение (6) является сложной функцией, задаваемой в условиях нестационарного резания начальными значениями  $\tau_{p_0}, \beta_0, p_0$  и возможными их приращениями при изменении угла сдвига, определенными как текущими значениями скорости резания  $V_i$  и толщины среза  $a_i$ , так и скоростью их изменения во времени.

Проведенный выше анализ деформированного и напряженного состояния зоны резания подтверждается экспериментальными зависимостями силы резания  $P_z$  от скорости резания, подачи инструмента и глубины резания, приведенными на рис. 4 для случая нестационарного точения сплава ХН73МБТЮ резцом ВК8.

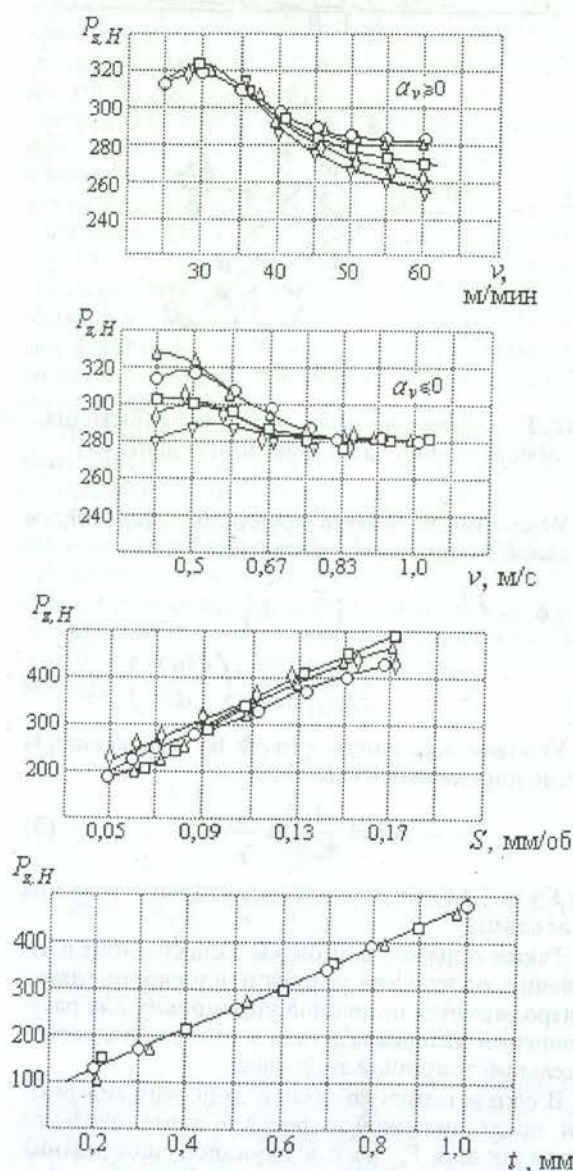


Рис. 4. Влияние элементов режима нестационарного резания при точении сплава ХН73МБТЮ резцом ВК8 (условные обозначения см. рис. 1)

Полученные данные показывают, что на силовые зависимости при нестационарном резании влияет не только текущее значение скорости резания  $V$  и подачи  $S$  инструмента, но и скорости  $a_v, a_s$ , а также характер их изменения во время обработки. Скорость изменения глубины резания практически не влияет на уровень и характер силовой зависимости.

Использование выражения (6) для практических расчетов затруднительно, поэтому силу резания с достаточной точностью можно аппроксимировать степенными зависимостями

$$P_z = C_{P_z} V_i^{z_{P_z}} S_i^{y_{P_z}} t^{x_{P_z}}, \quad (7)$$

где  $C_{P_z}, z_{P_z}, y_{P_z}, x_{P_z}$  — коэффициент и показатели степени, учитывающие влияние скорости, подачи и глубины резания соответственно.

Обработка экспериментальных данных, приведенных на рис. 4 в соответствии с уравнением (7), позволила получить зависимости коэффициентов  $c_{P_z}(v, S)$  и показателей степени  $z_{P_z}, y_{P_z}$  от ускорения резания  $a_v$  и скорости изменения подачи  $a_s$ , представленные на рис. 5 и 6.

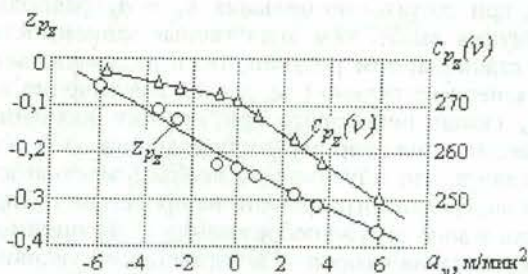


Рис. 5. Влияние ускорения резания на множитель  $c_{P_z}(v)$  и показатель степени  $z_{P_z}$  при точении сплава ХН73МБТЮ резцом ВК8 ( $S = 0,1$  мм/об,  $t = 0,5$  мм,  $\gamma = 0^\circ$ )

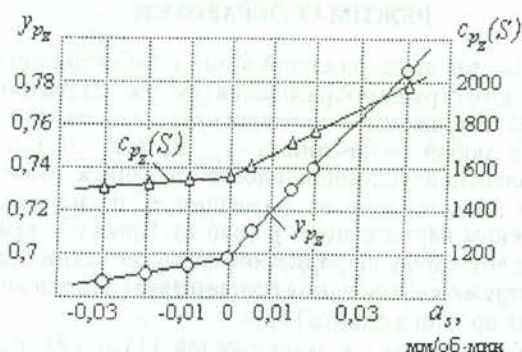


Рис. 6. Влияние скорости изменения подачи на множитель  $c_{P_z}(S)$  и показатель степени  $y_{P_z}$  при точении сплава ХН73МБТЮ резцом ВК8 ( $v = 0,66$  мм/об,  $t = 0,5$  мм,  $\gamma = 0^\circ$ )

Таким образом, увеличение ускорения  $a_v > 0$  приводит к интенсивному снижению силы резания с возрастанием скорости резания. Увеличение

отрицательного ускорения приводит к стабилизации зависимости  $P_z(v)$ . С увеличением  $a_s > 0$  степень влияния подачи на рост силы резания возрастает. Увеличение интенсивности снижения подачи приводит к снижению силы резания. Следует отметить, что подача инструмента и скорость ее изменения в большей степени влияют на силу резания, чем скорость резания и ускорение резания.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана теоретическая модель упруго-пластической деформации и напряженного состояния обрабатываемого материала в зоне резания, учитывающая явления технологической наследственности и запаздывания деформационных и тепловых процессов, протекающих в срезаемом слое при дискретном или непрерывном изменении элементов режима резания.

Получены новые зависимости для расчета силы и температуры резания, учитывающие не только текущее значение элементов режима резания, но и скорость и направление их изменения во время обработки.

УДК 681.3.06

## ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ НА УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ВОЛНАХ

В. Х. ЯСОВЕЕВ

Факультет авиационного приборостроения УГАТУ  
Тел: (3472) 23 77 89 E-mail: artvh@ugatu.ac.ru

Рассмотрены вопросы создания преобразователей параметров движения на ультразвуковых волнах, распространяющихся в звукопроводах из магнитострикционного материала. Приведены формулы, описывающие последовательность преобразования входного сигнала, и основные технические характеристики

*Ультразвуковая волна; первичный преобразователь; магнитострикционный эффект; погрешность*

Современные системы управления летательными аппаратами предъявляют жесткие требования к точности первичных преобразователей [1]. К ним относятся и различные устройства преобразования положения элементов электрогидроприводов исполнительных устройств, измерители уровня компонентов топлива в баках летательных аппаратов и ряд других.

Работа с бортовыми ЭВМ ставит острую проблему аналого-цифрового преобразования первичной информации. Здесь возможно применение двух вариантов. В первом можно использовать аналоговый выходной сигнал в виде тока либо напряжения с последующим его преобразованием в цифровой эквивалент. Во втором случае элементы функции цифрового преобразования исходной информации о параметре совмещаются в одном преобразователе. Безусловно, что второй вариант предпочтителен, так как обеспечивает при надлежащем проектировании минимальные массо-габа-

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Розенберг Ю. А., Тахтман С. И. Силы резания и методы их определения. Часть I. Общие положения: Учеб. пособие. Курган: КМИ, 1995. 128 с.
2. Оксли П. Б. Механизм резания металлов с переменным напряжением текучести // Конструирование и технология машиностроения. 1962. № 4. С. 25–32.
3. Постнов В. В. Исследование стружкообразования при нестационарном резании // Автоматизированные технологические и мехатронные системы в машиностроении: Сб. науч. тр. Уфа: УГАТУ, 1997. С. 39–43.
4. Мигранов М. Ш. Изнашивание инструмента в условиях нестационарного процесса точения при изготовлении деталей ГТД: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Уфа: УГАТУ, 1995. 14 с.

### ОБ АВТОРЕ

Постнов Владимир Валентинович, доцент каф. автоматизированных технологических систем УГАТУ. Дипл. инж.-механик (УАИ, 1972); канд. техн. наук по механической и физико-технической обработке, станкам и инструментам (УАИ, 1981). Исследования в области физической оптимизации нестационарных процессов резания жаропрочных сталей и сплавов.

ритные показатели. Хорошие результаты следует ожидать при использовании ультразвуковых преобразователей [2]. Во многом это объясняется их преимуществами перед другими типами первичных преобразователей перемещений, заключающимися в том, что их выходной величиной является время движения волны упругой деформации от излучателя до приемника, которое преобразуется в цифровой код с высокой точностью. Они имеют линейную статическую характеристику, высокое быстродействие, малые габариты и массу.

Согласно алгоритму преобразования, в структуре ультразвукового преобразователя перемещений предусмотрено два основных блока: первичный измерительный преобразователь, служащий средством выражения перемещения в виде временного интервала, и электронный блок, необходимый для формирования сигналов с первичного преобразователя, фиксации временного интерва-