

УДК 621.438:621.941

НАЗНАЧЕНИЕ РЕЖИМОВ ТОКАРНОЙ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ПО ТЕМПЕРАТУРЕ В ЗОНЕ РЕЗАНИЯ

А. Г. ЛЮТОВ¹, Г. Н. КОУРОВ², Н. Г. РЕКА³

¹ Lutov1@mail.ru, ² Kourov_GN@mail.ru, ³ Kourova.89@mail.ru

ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (УГАТУ)

Поступила в редакцию 10 апреля 2015 г.

Аннотация. Рассматриваются вопросы назначения режимов резания при торцовом точении дисков газотурбинных авиационных двигателей (ГТД), позволяющих обеспечить постоянный уровень R_z , h_c , N и остаточных напряжений вдоль всего обработанного полотна диска ГТД. В качестве основного параметра режима резания, позволяющего получить названные качества обработки поверхности диска, предлагается использовать температуру в зоне резания металла, которая должна быть оптимальной и стабильной. В статье предложен метод измерения температуры в зоне резания, пригодный для промышленного применения. Введено понятие нагреваемого тела. Выдвинута гипотеза метода определения массы нагреваемого тела, проведен эксперимент по проверке гипотезы. Стабилизацию температуры в зоне резания предлагается обеспечивать системой автоматического регулирования, построенной с использованием предложенного метода измерения температуры в зоне резания металла.

Ключевые слова: диски газотурбинных двигателей; оптимальные режимы резания; токарная обработка; мощность процесса резания; оптимальная температура; уравнение теплового равновесия; нагреваемое тело; передаточная функция.

ПРОБЛЕМА И ЕЕ АКТУАЛЬНОСТЬ

В зоне резания металлов вследствие пластических деформаций и трения возникает теплота, которая оказывает влияние на коэффициент трения, характер наростообразования, износ инструмента, качество обработанной поверхности, энергопотребление и другие показатели процесса резания. Особенно важно соблюдение температурно-силовых режимов при обработке жаропрочных материалов, используемых для изготовления деталей газотурбинных авиационных двигателей (ГТД).

Доказано [1], что одним из важных параметров резания в процессе изготовления деталей из труднообрабатываемых материалов авиационных газотурбинных двигателей является температура в зоне резания. В ответственных деталях, таких как диски ГТД, поверхность должна обрабатываться за один проход резца. Колебания температуры могут привести к образованию очагов напряженности за счет непостоянства степени $N\%$ наклепа и его глубины h_c , неравномерности шероховатости R_z и колебаний оста-

точных напряжений вдоль всего обработанного полотна диска.

Из проведенных экспериментов [2, 3] при торцовом точении дисков по сравнению режимов резания при постоянной скорости резания ($v = \text{const}$) и при неизменной оптимальной температуре ($E_0 = \text{const}$ – показания с датчика температуры) в зоне резания можно сделать вывод, что наилучший режим резания осуществляется при неизменной, оптимальной температуре в зоне резания.

Такой режим позволяет минимизировать уровень шероховатости (R_z), параметров наклепа (глубины h_c и степени $N\%$) при заданных величинах глубины резания и подачи инструмента и обеспечить постоянный уровень R_z , h_c , N и остаточных напряжений вдоль всего обработанного полотна диска (рис. 1).

Как известно [4], обеспечение минимального уровня параметров наклепа обуславливает повышение усталостной прочности при высокотемпературной эксплуатации деталей ГТД, а минимальная шероховатость предопределяет повышение коррозионной стойкости.

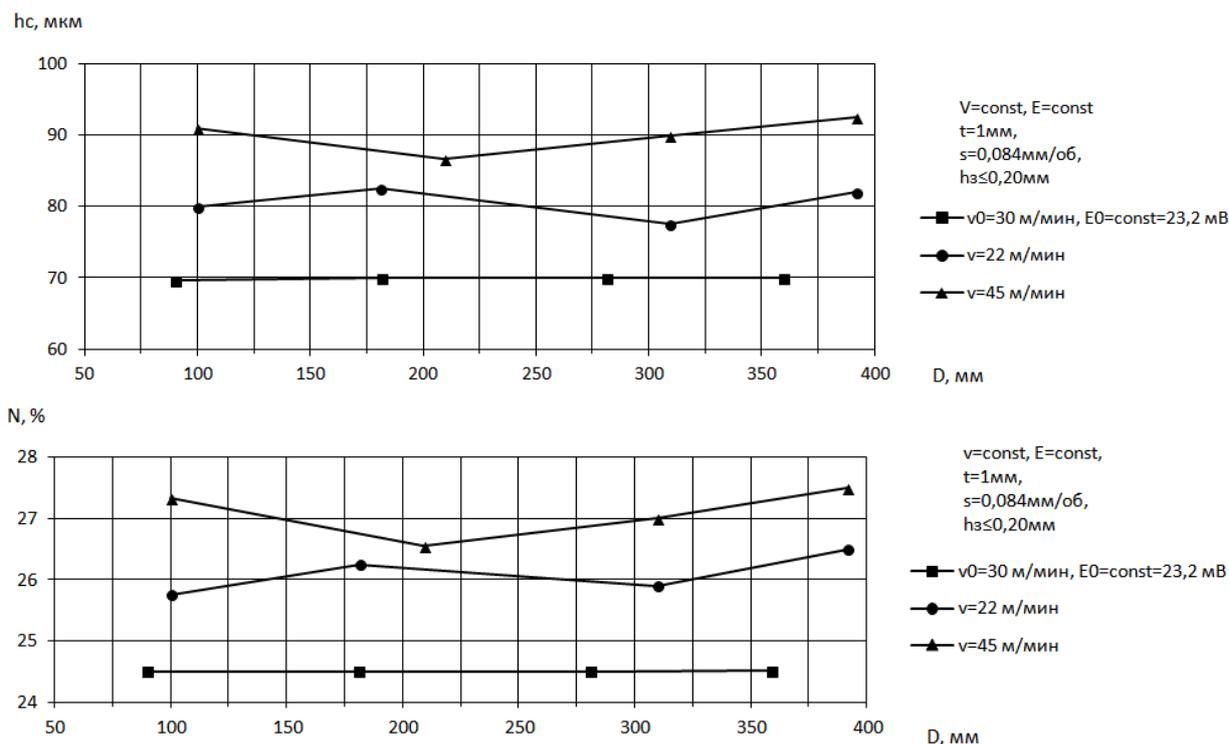


Рис. 1. Распределение параметров наклепа по полотну обработанного диска при торцовом точении ХН77ТЮР-ВК6М

Постоянство уровня остаточных напряжений по полотну диска обеспечивает уменьшение вероятности коробления тонкостенных дисков при их изготовлении и эксплуатации. Стабилизация температурного режима зоны резания благоприятно сказывается на динамике контактных процессов на поверхностях инструмента и детали, а через них – на уменьшении интенсивности износа инструмента и формировании поверхностной структуры деталей с меньшим уровнем дефектов.

Таким образом, ведение процесса резания с обеспечением постоянства температуры резания при обработке позволяет существенно повысить производительность обработки с одновременным получением деталей с высокими эксплуатационными свойствами, что предопределяет повышение ресурса работы наиболее ответственных деталей таких изделий, как ГТД.

Стабилизацию температурного режима в зоне резания металла возможно осуществить, применяя систему автоматического регулирования температуры в зоне резания. Однако имеющиеся современные способы и средства измерения температуры в зоне резания достаточно сложны и поэтому не нашли широкого применения в промышленности.

Авторами предлагается простой, оригинальный метод измерения температуры в зоне резания по энергетическим параметрам электродвигателя, осуществляющего процесс резания.

ПРЕДЛОЖЕНИЕ ПО РЕШЕНИЮ ПРОБЛЕМЫ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ В ЗОНЕ РЕЗАНИЯ МЕТАЛЛА

Связь температуры в зоне резания с параметрами процесса резания с достаточной точностью может быть аппроксимирована моделью вида (1), [1]:

$$\theta = C_{\theta} v^z s^y t_p^x, \quad (1)$$

где θ – температура в зоне резания металла, v – скорость резания, s – подача, t_p – глубина резания, C_{θ} – постоянная, характеризующая исходные условия обработки (обрабатываемый материал, геометрия и материал инструмента и т. п.), z, y, x – показатели степени при соответствующих параметрах.

Параметры модели (1) определяются по результатам экспериментов.

Недостатками модели (1) являются:

1. Модель описывает только статические характеристики связи параметров резания с температурой, хотя процесс нагрева является инерционным;

2. C_{θ} представляется коэффициентом, сущность которого не раскрыта в литературных источниках.

Метод измерения температуры в зоне резания по энергетическим параметрам электриче-

ской машины, совершающей процесс резания, позволяет определять температуру в зоне резания в ходе процесса резания по штатным измерительным устройствам, чаще всего имеющимся в комплекте электропривода, и не требует модернизации механической части станка. В основу метода заложен фундаментальный закон теплового равновесия (2).

$$P_{\text{рез}} dt = cm d\tau + F_T K_T \tau dt, \quad (2)$$

где $P_{\text{рез}} \cdot dt$ – тепло, поступающее в зону резания; $P_{\text{рез}}$ – мощность, расходуемая на процесс резания, определяется по энергетическим параметрам электрической машины с использованием типовых промышленных измерительных устройств; t – текущее время; $cm \cdot dt$ – тепло, поступающее в нагреваемое тело; c – удельная теплоемкость нагреваемого тела; m – масса нагреваемого тела; τ – температура нагреваемого тела относительно охлаждающей среды (среднее значение) (3):

$$\tau = \theta_{\text{HT}} - \theta_{\text{OC}}, \quad (3)$$

где θ_{HT} – температура нагреваемого тела (температура в зоне резания металла); θ_{OC} – температура охлаждающей среды, $F_T K_T \tau dt$ – тепло, поступающее в охлаждающую среду от нагреваемого тела; F_T – площадь теплоотдачи нагреваемого тела; K_T – коэффициент теплоотдачи нагреваемого тела в охлаждающую среду.

Масса нагреваемого тела. Под массой нагреваемого тела понимается масса деформируемой в процессе резания части заготовки, переходящей в стружку. Определение величины этой массы является проблемой, которую предполагается решать.

Определение массы нагреваемого тела.

Для определения массы нагреваемого тела предлагается следующая гипотеза. Объем нагреваемого тела представляет собой в простейшем случае параллелепипед (рис. 2).

В процессе резания резец снимает стружку шириной s и толщиной t_p .

Под воздействием силы резания P_Z резец перемещается от CC_1 до AA_1 за время t_{CA} , при этом стружка проходит расстояние от CC_1 до BB_1 и выходит из зоны действия силы резания P_Z . Длина отрезка CA равна длине отрезка CB . Время прохождения резца от CC_1 до AA_1 равно t_{CA} :

$$t_{CA} = \frac{CA}{v}. \quad (4)$$

Масса нагреваемого тела равна произведению плотности ρ обрабатываемого материала на объем нагреваемого тела V_{HT} сечением $ACBD$ и длиной s (5):

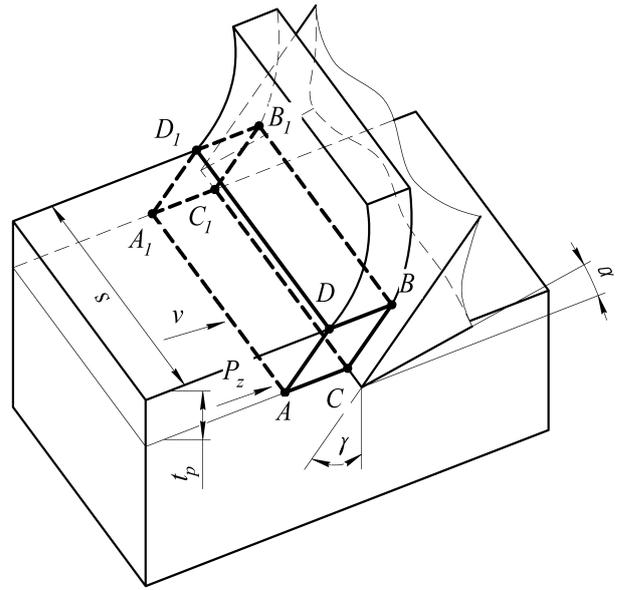


Рис. 2. Схема определения объема нагреваемого тела.

$$m = V_{\text{HT}} \rho. \quad (5)$$

Длина отрезка CA может быть представлена выражением (6) через глубину резания t_p и передний угол резца γ :

$$CA = \frac{t_p}{\cos \gamma}. \quad (6)$$

Объем нагреваемого тела может быть определен по выражению (7):

$$V_{\text{HT}} = \frac{t_p^2}{\cos \gamma} s. \quad (7)$$

С учетом зависимостей (4), (6) время t_{CA} будет равным (8):

$$t_{CA} = \frac{t_p}{v \cos \gamma}. \quad (8)$$

Для определения температуры массы нагреваемого тела найдем количество тепла, поступающего в стружку за время t_{CA} по выражению: $P_Z \cdot v \cdot t_{CA}$.

Тогда температура нагреваемого тела относительно охлаждающей среды $\tau = P_Z \cdot v \cdot t_{CA} / (c \cdot m)$. В данном случае предполагается, что удельная теплоемкость c является величиной постоянной и не зависит от температуры, то есть это среднее значение теплоемкости за период нагрева. Охлаждающей средой являются: заготовка детали, резец, стружка, смазочно-охлаждающая жидкость (СОЖ). Для упрощения понимания метода делается допущение, что количество тепла, $F_T K_T \tau \cdot dt$, поступающего в окружающую

среду от нагреваемого тела, незначительно. Тогда величина dt в уравнении (2) равна t .

По параметрам параллелепипеда с учетом плотности материала определяется масса нагреваемого тела. Зная массу и параметры объема нагреваемого тела, можно рассчитать температуру τ нагреваемого тела относительно охлаждающей среды. Удельная теплоемкость c для каждого материала своя, определяется по справочнику.

Уравнение (2) дает возможность рассчитать величину τ при названных допущениях.

Нагрев исследуемого тела. Процесс нагрева исследуемого тела описывается дифференциальным уравнением первого порядка, что дает возможность представить процесс нагрева в виде динамического звена. Для этого левую и правую части уравнения (2) необходимо разделить на dt (9):

$$P_{\text{рез}} = cm \frac{d\tau}{dt} + F_T K_T \tau. \quad (9)$$

Уравнение (9) необходимо представить в операторной форме, используя оператор Лапласа (p):

$$P_{\text{рез}}(p) = cm p \tau(p) + F_T K_T \tau(p). \quad (10)$$

По уравнению (10) составляется передаточная функция $W(p)$ звена передачи мощности в температуру τ нагреваемого тела относительно охлаждающей среды (11):

$$W(p) = \frac{\tau(p)}{P_{\text{рез}}(p)} = \frac{1}{F_T K_T \left(\frac{cm p}{F_T K_T} + 1 \right)}. \quad (11)$$

Выражение (11) представляет собой уравнение передаточной функции типового инерционного звена первого порядка, которое имеет вид:

$$W(p) = \frac{\tau(p)}{P_{\text{рез}}(p)} = \frac{K_{\text{HT}}}{T_{\text{HT}} p + 1},$$

где $K_{\text{HT}} = 1/(F_T - K_T)$ – коэффициент передачи динамического звена. K_{HT} является статической характеристикой динамического звена, а также является составляющим элементом, представляющим собой физическую сущность коэффициента C_0 в уравнении (1). $T_{\text{HT}} = c \cdot m / (F_T - K_T)$ – постоянная времени динамического звена. Постоянная времени T_{HT} характеризует динамические свойства процесса, описываемого уравнением (1) связи температуры в зоне резания с параметрами процесса резания.

Переходная функция динамического звена

первого порядка представляет собой экспоненту, уравнение которой имеет вид:

$$\tau(t) = \Delta P_{\text{рез}} K_{\text{HT}} \left(1 - e^{-\frac{t}{T_{\text{HT}}}} \right),$$

где $\Delta P_{\text{рез}}$ – единичный скачок мощности резания.

Учитывая, что в уравнении (2) масса нагреваемого тела гипотетическая, произведена проверка для ее сравнения с массой, полученной по экспериментальным данным.

ЭКСПЕРИМЕНТ ПО ПРОВЕРКЕ ГИПОТЕЗЫ

Эксперимент проведен для материалов: резец ВК6М – деталь ХН77ТЮР без использования СОЖ. По параметрам режима резания и геометрии инструмента определены геометрический объем нагреваемого тела V_{HT} по уравнению (7) и теоретическая масса нагреваемого тела m_T по уравнению (5). По справочным данным определены удельная теплоемкость c исследуемого материала детали. Мощность процесса резания $P_{\text{рез}}$ определена по выражению: $P_{\text{рез}} = P_Z v$. Для расчета силы резания P_Z при заданных параметрах резания в [5] предлагается использовать уравнение (12):

$$P_Z = 10 \times C_P t_P^{x_1} s^{y_1} v^n K_P, \quad (12)$$

где коэффициент C_P и показатели степени x_1 , y_1 , n определены по таблицам для конкретных условий обработки; K_P – поправочный коэффициент, представляет собой произведение ряда коэффициентов ($K_P = K_{MP} K_{\phi P} K_{\gamma P} K_{\lambda P} K_{rP}$); коэффициенты K_{MP} , $K_{\phi P}$, $K_{\gamma P}$, $K_{\lambda P}$, K_{rP} , учитывающие фактические условия резания, также определены по соответствующим таблицам; t_P – глубина резания; s – подача; v – скорость резания.

Сила резания определена для оптимальной температуры в зоне резания металла, то есть температура нагреваемого тела $\theta_{\text{HT}} = \theta = \theta_0$.

Из уравнения связи температуры резания с режимами резания (1) при известных величинах подачи s и глубины резания t_P возможно вычислить скорость резания v , соответствующую оптимальной температуре резания θ_0 .

По известной мощности резания $P_{\text{рез}}$ и удельной теплоемкости c материала определяется экспериментальная масса m_{Σ} нагреваемого тела по выражению: $m_{\Sigma} = P_{\text{рез}} t_{CA} / (c \tau_0)$, где значение t_{CA} определено по выражению (8), а оптимальное значение температуры τ_0 нагреваемого тела относительно охлаждающей среды определено по выражению (3).

Учитывая, что резание производится без использования СОЖ, в данном эксперименте $\theta_{oc} = 20^\circ \text{C}$.

Произведено сравнение величины теоретической m_T и экспериментальной m_{Σ} масс при различных значениях подачи. Результаты сравнения представлены на рис. 3.

Анализ зависимостей. По графикам рис. 3 можно сделать вывод о том, что расчет температуры в зоне резания по уравнению теплового равновесия (2) имеет с учетом допущений, сделанных в эксперименте, хорошую сходимость (в диапазоне $s = (0,06 \dots 1)$ мм/об разница составляет не более 12 %) с расчетом температуры по уравнению (1), полученному экспериментальным путем [1]. Это подтверждает возможность определения температуры резания по уравнению теплового равновесия (2), то есть по энергетическим параметрам процесса резания.

Для определения сходимости результатов теоретических расчетов с экспериментальными данными для других материалов необходимо продолжить исследования. При исследовании данного вопроса следует иметь в виду, что использованные уравнения (1) и (12) являются эмпирическими и имеют ряд коэффициентов, полученных экспериментальным путем. В связи с этим, например, в [6] констатируется, что зависимость (1) имеет хорошее согласование температуры резания с параметрами режимов резания только по скорости резания и для труднообрабатываемых сталей, например, ХН77ТЮР. Поэтому для широкого применения зависимости температуры от параметров резания реко-

мендуется пользоваться уравнением, полученным аналитически в [6].

ВЫВОДЫ

В качестве основного параметра режимов резания предлагается использовать температуру в зоне резания металла, что позволяет обеспечить постоянный уровень R_z , h_c , N и остаточных напряжений вдоль всего обработанного полотна диска ГТД.

Установлена энергетическая связь электропривода главного движения и процесса резания металла.

Установлена физическая сущность связи мощности, расходуемой на процесс резания, и температурой в зоне резания металла.

Произведен анализ существующей модели связи температуры в зоне резания с параметрами резания. Определены недостатки данной модели.

Разработан метод измерения температуры резания по энергетическим параметрам электрической машины.

Процесс преобразования мощности, расходуемой на процесс резания, в температуру резания представлен в виде динамического звена.

Материалы статьи могут быть полезны специалистам-технологам при разработке технологий обработки деталей авиационных ГТД, специалистам, разрабатывающим системы автоматического управления температурой в зоне резания, а также студентам при курсовом, дипломном проектировании.

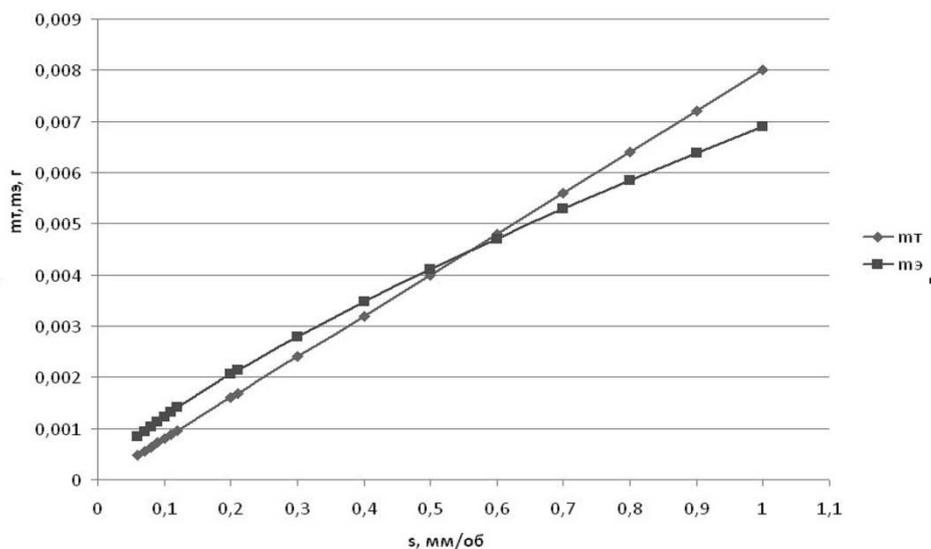


Рис. 3. Зависимости экспериментальной m_{Σ} и теоретической m_T масс нагреваемого тела от величины подачи s для пары материалов: деталь ХН77ТЮР–резец ВК6М

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Макаров А. Д.** Оптимизация процессов резания. М.: Машиностроение, 1976. 278 с. [[A. D. Makarov, *Optimization of cutting processes* (in Russian). Moscow: Mashinostroenie, 1976.]]
2. **Зориктуев В. Ц.** Автоматизация процессов резания на основе положения об оптимальной температуре резания // Вестник УГАТУ. 2009. Т. 12, № 4 (33). С. 14–19. [[V. Ts. Zoriktuev, "Automation of cutting processes based on the position of the optimal cutting temperature," (in Russian), in *Vestnik UGATU*, vol. 12, no. 4 (33), pp. 14-19, 2009.]]
3. **Мухин В. С., Зориктуев В. Ц.,** Остаточные напряжения и наклеп при торцовом точении // Вестник машиностроения. 1974. № 1. С. 60–63. [[V. S. Mukhin, V. Ts. Zoriktuev, "Residual stresses and hardening in face turning," (in Russian), in *Vestnik mashinostroeniya*, no. 1, pp. 60-63, 1974.]]
4. **Мухин В. С.** Поверхность. Технологические аспекты прочности деталей ГТД. М.: Наука, 2005. 296 с. [[V. S. Mukhin, *Surface. Technological aspects of strength GTE parts*, (in Russian). Moscow: Nauka, 2005.]]
5. **Справочник** технолога-машиностроителя / под ред. А. М. Дальского и др. М.: Машиностроение, 2003. Т. 2. 944 с. [[A. M. Dalskiy, *et al., Directory technologist-Machinist*, vol. 2, (in Russian). Moscow: Mashinostroenie, 2003.]]
6. **Таратынов О. В.** Влияние режима резания на контактную температуру и стойкость инструмента// СТН. 2004. № 11. С. 30–32. [O. V. Taratynov, "Influence of cutting conditions on the contact temperature and tool life," (in Russian), in *STN*, no. 11, pp. 30-32, 2004.]]

ОБ АВТОРАХ

ЛЮТОВ Алексей Германович, проф., зав. каф. автоматиз. технологич. процессов. Дипл. инж.-эл. (УАИ, 1985). Д-р техн. наук по сист. анализу, упр. и обр. инф. (УГАТУ, 2005). Иссл. в обл. автоматиз. и упр. сл. техн. объектами и процессами.

КОУРОВ Георгий Николаевич, доц. каф. автоматиз. технологич. процессов. Дипл. инж. по автоматиз. технологич. процессов и пр-в (СГИ, 1968). Канд. техн. наук по автоматиз. технологич. процессов и пр-в (СГИ, 1976). Иссл. в обл. автоматиз. технологич. процессов и пр-в.

РЕКА Надежда Георгиевна, асп. каф. автоматиз. технологич. процессов. Дипл. инж. по технол. машиностроения (УГАТУ, 2012). Готовит дис. в обл. повышения энергоэффективности процесса резания металлов.

METADATA

Title: Purpose of the modes turning details of gas-turbine engines on temperature in the cutting zone.

Authors: A. G. Lyutov¹, G. N. Kourov², N. G. Reka³

Affiliation:

Ufa State Aviation Technical University (UGATU), Russia.

Email: Kourova.89@mail.ru.

Language: Russian.

Source: Vestnik UGATU, vol. 19, no. 2 (68), pp.20-25, 2015. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).

Abstract: In the article are considered questions of purpose of the modes cutting at face turning the disks of the gas-turbine aviation engines (GTD), allowing to provide the fixed level R_z , hc , N and residual tension along all processed cloth a disk of the GTD. Primary parameter of the modes cutting allowing to receive the called qualities of processing of a surface disk is offered to use temperature in a metal cutting zone, which has to be optimum and stable. The method of measurement of temperature in a cutting zone, useful for industrial application is offered. The concept of the heated body is introduced. The hypothesis of a method determination of mass heated body is made, experiment on check of a hypothesis is conduct. Stabilization of temperature in the cutting zone is offered to realized the automatic control system, constructed using the offered method of measurement of temperature in a metal cutting zone.

Key words: disks of the turbine of gas-turbine aviation engines; optimum modes of cutting; turning; cutting process power; optimum temperature in the cutting zone; equation of thermal balance; heated body; transfer function.

About authors:

LYUTOV, Aleksey Germanovich, Prof., head of a Dept. of Automation of technological processes. Dipl. electronic engineer (UAI, 1985), Dr. of Tech. Sci. (UGATU, 2005).

KOUROV, Georgiy Nikolaevich, Assoc., Dept. of Automation of technological processes. Dipl. engineer of Automation of technological processes and manufactures (UAI, 1985). Cand. of Tech. Sci. (SGI, 1976).

REKA, Nadezhda Georgievna, Postgrad. (PhD) Student, Dept. of Automation of technological processes. Master of Engineering technology (UGATU, 2012).