

Научная статья  
УДК 621.7  
doi: 10.30987/2223-4608-2025-8-21-30

## Повышение качества обработки на операциях термофрикционного резания за счет оптимальной стохастической диагностики и управления съемом припуска

Николай Иванович Покинтелица<sup>1</sup>, Д.Т.Н.  
Сергей Михайлович Братан<sup>2</sup>, Д.Т.Н.  
Анастасия Сергеевна Часовитина<sup>3</sup>, К.Т.Н.  
Чингиз Февзиевич Якубов<sup>4</sup>, К.Т.Н.

<sup>1, 2, 3, 4</sup> Севастопольский государственный университет, Севастополь, Россия

<sup>1</sup> nik.pokintelitsa@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0277-9252>

<sup>2</sup> serg.bratan@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-9033-1174>

<sup>3</sup> aschasovitina@sevsu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6800-9392>

<sup>4</sup> yakubov\_chingiz@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9483-8677>

**Аннотация.** Рассмотрен подход, обеспечивающий повышение качества обработки заготовок на операциях термофрикционного резания. Процесс термофрикционного резания представлен как синергетический объект, находящийся в неравновесных условиях, ввиду влияния анизотропных свойств конструкционных материалов, что приводит к нестабильности качества поверхности изделий. В работе выполнено математическое описание объекта, построены динамические уравнения и объект представлен в форме пространства состояний. Для повышения качества обработки изделий на операциях термофрикционного резания предложен подход, основанный на синтезе следящей системы с наблюдателем Льюинбергера, которая обеспечивает получение рабочей информации с минимально допустимой среднеквадратической ошибкой. Применение классического подхода к синтезу стохастических наблюдателей приводит к существенным погрешностям ввиду многократного дифференцирования шумов измерителей. Для устранения этого недостатка предложен метод, включающий процесс многократного дифференцирования, путем перестройки системы, не содержащей в своей структуре шумов измерителей. Для этого в пространстве состояний введено уравнение восстановления. На основании полученной рабочей информации построена система динамической стабилизации процесса ТФР. Испытание предложенной системы осуществили на станке модели OPTIMUM F3 CNC, оснащённом комплексом измерительной аппаратуры для измерения относительных колебаний инструмента, заготовки и температуры в зоне контакта. Анализ полученных результатов показывает, что для повышения качества обработки на операциях термофрикционного резания целесообразно использовать системы с обратной связью, оснащённые блоками стохастического оптимального оценивания и управления выходными показателями в процессе съема припуска на обработку. Выполнение испытания предложенных систем управления свидетельствуют об улучшении качества обработанной поверхности, например снижении шероховатости в два раза по показателю Rz и повышению стабильности показателя микротвёрдости в 2–8 раз при ТФР образцов из стали 45.

**Ключевые слова:** термофрикционное резание, зона контакта, поля температур, стохастический наблюдатель, анизотропная среда, синергетический подход

**Для цитирования:** Покинтелица Н.И., Братан С.М., Часовитина А.С., Якубов Ч.Ф. Повышение качества обработки на операциях термофрикционного резания за счет оптимальной стохастической диагностики и управления съемом припуска // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2025. № 8 (170). С. 21–30. doi: 10.30987/2223-4608-2025-8-21-30

## Upgrading of thermal friction cutting operations due to optimal stochastic diagnostics and stock removal control

Nikolai I. Pokintelitsa<sup>1</sup>, D.Eng.  
Sergey M. Bratan<sup>2</sup>, D.Eng.  
Anastasia S. Chasovitina<sup>3</sup>, Ph.D. Eng.  
Genghis F. Yakubov<sup>4</sup>, Ph.D. Eng.

<sup>1, 2, 3, 4</sup> Sevastopol State University, Sevastopol, Russia

<sup>1</sup> nik.pokintelitsa@mail.ru

<sup>2</sup> serg.bratan@gmail.com

<sup>3</sup> aschasovitina@sevsu.ru

<sup>4</sup> yakubov\_chingiz@mail.ru

**Abstract.** An approach that improves the quality of work on a workpiece under thermal friction cutting operations is viewed. The thermal friction cutting is presented as a synergetic object in nonequilibrium conditions, due to the influence of anisotropic properties of structural materials, that results in instability of the surface quality of products. The paper provides a mathematical description of the object, dynamic equations are constructed, and the object is represented in the form of a state space. To upgrade machining under thermal friction cutting operations, an approach based on the synthesis of a tracking system with a Lewinberger observer is proposed, which provides operational information with the minimum allowable RMS error. The application of the classical approach to the synthesis of stochastic observers leads to significant errors due to the multiple differentiation of measurement noise. To eliminate this disadvantage, a method has been proposed that eliminates the process of multiple differentiation by rebuilding a system that does not contain instrument noise in its structure. For that purpose, a renewal equation is introduced in the state space. Based on the received operational information, a system of dynamic stabilization of the TFC process has been built. The proposed system was tested on an OPTIMUS F3 CNC machine, equipped with a set of metering equipment for measuring the relative motion of the tool, the workpiece and the temperature change in the contact area. An analysis of the results shows that for machining upgrading under thermal friction cutting operations, it is advisable to use feedback systems equipped with stochastic optimal estimation and output control units during stock removal control. Testing of the proposed control systems gives evidence of bettering the quality of the machined surface, for example, a reduction in roughness by half in terms of Rz and an increase in the stability of the microhardness index by 2 to 8 times in the TFC of 45 steel samples.

**Keywords:** thermal friction cutting (TFC), contact zone, temperature fields, stochastic observer, anisotropic medium, synergetic approach

**For citation:** Pokintelitsa N.I., Bratan S.M., Chasovitina A.S., Yakubov G.F. Upgrading of thermal friction cutting operations due to optimal stochastic diagnostics and stock removal control / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2025. № 8 (170). P. 21–30. doi: 10.30987/2223-4608-2025-8-21-30

## Введение

Качество обрабатываемых изделий зависит как от качества заготовки, технологии обработки, так и от свойств технологической системы. В настоящее время для черновой и получистовой обработки заготовок стал широко применяться метод термофрикционного резания, который по экономическим критериям имеет значительные преимущества в сравнении с традиционными операциями, такими как фрезерование, обдирочное шлифование и др. [1 – 3].

Процесс термофрикционного резания (ТФР) представляет процесс формообразования путем механического удаления нагретого до определённой температуры слоя материала режущим диском. Резание материалов сопровождается высокой степенью и скоростью пластической деформации на фоне интенсивных тепловых потоков и активной технологической среды. Процесс пластической деформации и контактного взаимодействия обрабатываемого материала с материалом режущего диска генерирует ряд физико-химических явлений, таких как термоэлектрические, магнитные, диффузионные, химические и другие. Все это указывает на высокую степень неравновесности, вызванных наведением различных градиентных соотношений, которые вызывают развитие энергетических потоков различной природы, в том числе

массопереноса на разных масштабных структурных уровнях [7, 8, 10].

Технологическая система «термофрикционное резание» встроена в более глобальную технологическую систему механического оборудования, которую можно представить как совокупность распределённых масс, объединённых упругими и диссипативными и инерционными связями. Все динамические возмущения в глобальной технологической системе возникают только в системе, которая создает в ней стохастические связи и приводит к образованию неравновесные состояния. С математической точки зрения неравновесное состояние технологической системы можно описать системой линейных дифференциальных уравнений взаимодействия распределённых масс механического оборудования, воспринимающих динамические возмущения от процесса резания.

При решении такой системы в качестве обобщённой координаты принимается направление, оказывающее наиболее сильное влияние на точность и качество механической обработки.

Такую систему по всем формальным признакам можно отнести к категории неравновесной и синергетической. Неравновесность системы резания определяется в первую очередь деформационными процессами стружкообразования и контактного взаимодействия, а также активной ролью технологической среды.

Сам процесс ТФР материалов можно разбить на отдельные алгоритмы, протекающие в динамическом единстве на разных масштабных структурных уровнях, при этом все они могут быть разбиты по конкурирующим парам. Такое разделение алгоритмов с философской точки зрения отвечает закону единства и борьбы противоположностей, и раскрывает их роль в обеспечении принципа наименьшего принуждения и других синергетических парадигм [1, 4, 5]. Соблюдение баланса между конкурирующими алгоритмами обеспечивает динамическую стабильность и устойчивость функционирования всей системы резания.

Сама система резания является термодинамически неравновесной, в которой подводимая механическая энергия расходуется на высокоскоростную пластическую деформацию, внутреннее трение и процесса контактно-фрикционного взаимодействия, а затем превращается в поля напряжений, деформаций и температур зоны резания, тепловой поток и поглощенную внутреннюю энергию.

Динамические возмущения механической обработки являются выходными параметрами неравновесной системы самого процесса резания, в котором формально можно различить инерционные, диссипативные и упругие связи, объединенные дифференциальными уравнениями. Они оказывают существенное влияние на эксплуатационные свойства изделий. С течением времени нарушается нормальный ход протека-

ния процесса ТФР, увеличиваются величины отклонений выходных показателей от их номинальных значений. Технологическая система теряет стабильность, нарушаются пространственно-временные связи, снижается качество выпускаемой продукции и увеличивается процент брака.

Анализ современных исследований в области обработки материалов резанием показывает, что одним из путей повышения качества обработки на операциях термофрикционного резания является синтез систем стохастической диагностики позволяющих получить рабочую информацию об процессе обработки с наименьшей из возможных дисперсий, на основе которых может быть синтезирована система управления по отклонению, которая путем обработки полученных оценок оптимальным образом осуществляет стабилизацию выходных показателей качества [6, 9].

Синтез такой системы является целью данной работы. Для этого необходимо математическое описание процесса, характеризующего динамику взаимодействия шлифовального круга и заготовки.

## Материалы и методы

Для моделирования динамики процесса ТФО рассмотрим схему, представленную на рис. 1.

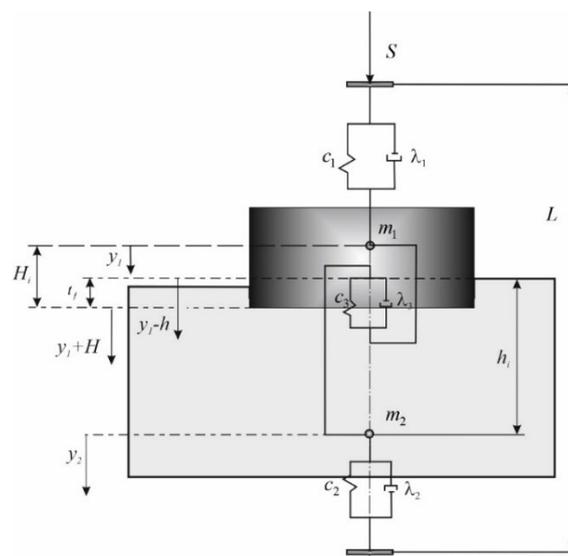


Рис. 1. Расчетная схема для построения модели динамики процесса ТФО

Fig. 1. Calculation scheme for constructing a model of the turn-milling process dynamics

На основе принципа возможных перемещений, для системы, представленной на рис. 1, построено ее представление в виде совокупности дифференциальных уравнений,

$$\begin{cases} \dot{y}_1 = y_2 \\ \dot{y}_2 = \frac{-1}{m_1} \left( [(c_1 + c_3)y_1 + (\lambda_1 + \lambda_3)y_2 - c_3y_3 - \lambda_3y_4] - [c_3(\Delta H + \Delta h) + \lambda_3(\dot{H} + \dot{h})] + [\lambda_1\dot{S} + c_1S] \right) \\ \dot{y}_3 = y_4 \\ \dot{y}_4 = \frac{-1}{m_2} \left( [(c_2 + c_3)y_3 + (\lambda_2 + \lambda_3)y_4 - c_3y_1 - \lambda_3y_2] + [c_3(\Delta H + \Delta h) + \lambda_3(\dot{H} + \dot{h})] \right) \end{cases} \quad (1)$$

где  $m_1, m_2$  – приведенные массы систем «заготовка» и «инструмент»;  $\lambda_1$  – коэффициент демпфирования  $i$ -го звена;  $c_i$  – параметр жесткости  $i$ -го звена;  $y_1, y_2$  – приращения координат центра масс инструмента и центра масс заготовки соответственно;  $\Delta H, \Delta h$  – приращения расстояний от положения центра масс инструмента и заготовки, соответственно, вызванные

характеризующих динамику перемещений центров круга и детали в процессе круглого наружного шлифования:

торцевым биением инструмента и неравномерностью припуска на заготовке;  $L, \Delta L$  расстояние между центрами масс и его изменение.

Для упрощения записи приращений координат и их производных в зависимостях (1), опущен предшествующий им знак приращения  $\Delta$ .

$$\begin{aligned} \dot{Y}_0 &= A_0 \cdot Y_0 + B_0 \cdot \Psi + C_0 \cdot U; \\ Z_0 &= E_0 \cdot Y_0 + F_0 \cdot V_0; \\ T_0 &= Q_0 \cdot Z_0, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $\dot{Y}_0 = \begin{bmatrix} \dot{y}_1 \\ \dot{y}_2 \\ \dot{y}_3 \\ \dot{y}_4 \end{bmatrix}$  – вектор производных состояний системы;  $Y_0 = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ y_4 \end{bmatrix}$  – вектор (матрица-столбец), представляющая вектор состояния системы;  $B_0 = [B_{01} \ B_{02}]$  – матрица параметров влияния торцевого биения, инструмента и неравномерности припуска заготовки;  $\Psi$  – вектор состояний отклонений значений торцевого биения инструмента и неравномерности припуска от заданных значений  $\Psi = \begin{bmatrix} \Psi_1 \\ \Psi_2 \end{bmatrix}$ ,

$\Psi_1 = [\Delta R + \Delta r]$ ,  $\Psi_2 = [\dot{R} + \dot{r}]$ ;  $U = \begin{bmatrix} S \\ \dot{S} \end{bmatrix}$  – вектор управления глубиной резания, связанный с температурой зоны контакта заготовки и инструмента;

$$A_0 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\frac{c_1+c_3}{m_1} & -\frac{h_1+h_3}{m_1} & \frac{c_3}{m_1} & \frac{h_3}{m_1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{c_3}{m_2} & \frac{h_3}{m_2} & -\frac{c_2+c_3}{m_2} & -\frac{h_2+h_3}{m_2} \end{bmatrix} -$$

матрица, характеризующая динамические

свойства системы;  $C_0 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \frac{c_1}{m_1} & \frac{h_1}{m_1} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$  – матрица

управления температурой в зоне резания (за счет поперечной подачи;  $E_0 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$  – матрица состояния процесса измерений;

$F_0 = \begin{bmatrix} f_{11} & f_{12} \\ f_{21} & f_{22} \end{bmatrix}$  – матрица интенсивностей (погрешностей измерителей);  $V_0 = \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix}$  – матрица шумов измерителей единичной интенсивности;  $T_0 = [T(t_f)]$  – температурная матрица;  $Q_0 = [-1 \ 1]$  – матрица интенсивности совокупных измерений.

Полученные данные о значениях температуры в зоне резания отличаются от реальных значений температуры зоны контакта из-за качества процесса измерений и погрешностей измерителей, а также от случайных факторов вызванных отклонениями значений припуска и торцевого биения диска от номинальных значений. Поэтому непосредственное получение скорости изменения температуры  $\frac{dT(t_f)}{dt}$  дифференцированием температурной функции нецелесообразно вследствие присутствия аддитивных шумов в совокупных измерениях.

Для решения задачи оценки температуры в зоне резания и скорости ее изменения может быть использована теория стохастических наблюдателей, на основе которой может быть построена стохастический наблюдатель Льюинбергера.

Однако, непосредственное использование существующих методик синтеза стохастических наблюдателей невозможно из-за наличия шумов в канале управления и значительных вычислительных ошибках с погрешностями многократного дифференцирования отклонений торцевого биения и неравномерности припуска.

Непосредственное применение матричных представлений (3) при моделировании нецелесообразно вследствие необходимости дифференцирования. Это не является ни особенностью матричного представления модели, ни описания динамической системы в отклонениях, а проявляется уже в исходном представлении (1)

технологической системы.

Для разрешения вышеописанной задачи преобразуем вектор состояния системы к виду:

$$X_0 = D_0 \cdot Y_0, \quad (3)$$

где  $D_0$  – матрица интенсивности оценок параметров состояния процесса ТФО;

Тогда модифицированный вектор состояния процесса ТФР примет вид:

$$F = Y_0 - B_{02} \cdot \Psi_1. \quad (4)$$

Из соотношения следует

$$Y_0 = F + B_{02} \cdot \Psi_1. \quad (5)$$

Тогда вектор  $\dot{Y}_0$  характеризующий скорость изменения состояния системы ТФР может быть описан выражением вида:

$$\dot{Y}_0 = \dot{F} + \dot{B}_{02} \cdot \Psi_1 + B_{02} \cdot \dot{\Psi}_2. \quad (6)$$

С учетом преобразований, матричное уравнение (2) запишется:

$$\dot{Y}_0 = A_0 \cdot Y_0 + B_{01} \cdot \Psi_1 + B_{02} \cdot \Psi_2 + C_0 \cdot U. \quad (7)$$

После подстановки выражения  $(F + B_{02} \cdot \Psi_1)$  в уравнение (7) получим:

$$\dot{Y}_0 = A_0 \cdot F + (B_{02} \cdot \Psi_1) + B_{01} \cdot \Psi_1 + B_{02} \cdot \Psi_2 + C_0 \cdot U.$$

На основе выражений (6) и (7) запишем равенство:

$$\dot{F} + \dot{B}_{02} \cdot \Psi_1 + B_{02} \cdot \dot{\Psi}_2 = A_0 \cdot [F + B_{02} \cdot \Psi_1] + B_{01} \cdot \Psi_1 + B_{02} \cdot \Psi_2 + C_0 \cdot U. \quad (8)$$

На основании полученного результата после преобразований запишем модифицированное математическое выражение характеризующее состояние процесса ТФР, не содержащее шумов

измерений  $\Psi_2$ . В связи с чем исключается необходимость в дифференцировании  $\Psi_1$ :

$$\dot{F} = A_0 \cdot F + [A_0 \cdot B_{02} + B_{01} - \dot{B}_{02}] \cdot \Psi_1 + C_0 \cdot U. \quad (9)$$

Процедура сравнения уравнений (9) и (3) позволяет определить коэффициент, стоящий перед матрицей  $\Psi_1$ , и интерпретировать модифицированную матрицу влияния отклонения торцевого биения инструмента и неравномерности припуска заготовки:

$$B_1 = [A_0 \cdot B_{02} + B_{01} - \dot{B}_{02}] \quad (10)$$

Для этих условий модифицированное математическое выражение, характеризующее состояние процесса ТФР примет вид:

$$\dot{F} = A_0 \cdot F + B_1 \cdot \Psi_1 + C_0 \cdot U. \quad (11)$$

Полученное соотношение и первое уравнение системы (2) являются эквивалентными в

смысле Ляпунова.

Тогда на основании выражений (7), (4) и (11) получим соотношение для оценки состояния  $X_0$ :

$$X_0 = D_0 \cdot F + D_0 \cdot B_{02} \cdot \Psi_1 \quad (12)$$

где  $F$  – модифицированный вектор состояния, определяется из (11).

### Результаты и их обсуждение

Рассмотрим разработанный подход для синтеза стохастического наблюдателя Льюинбергера по форме фильтра

Калмана-Бюсси.

Выполним преобразование произведени матриц  $C_0, U_0$  системы (11) к виду

$$C_0 \cdot U_0 = C_{00} \cdot S + C_{01} \cdot \dot{S},$$

$$\text{где } C_{00} = \begin{bmatrix} c_1 \\ m_1 \end{bmatrix}^T, C_{01} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{h_1}{m_1} & 0 & 0 \end{bmatrix}^T,$$

и перестроим модель системы (8) в форме, не требующей дифференцирования сигнала управления.

При этом также необходимо преобразовать и уравнения наблюдения системы с целью восстановления состояний подлежащих контролю, что позволяет получить:

$$\begin{aligned} \dot{F} &= A_0 \cdot F + B_1 \cdot \Psi_1 + C_1 \cdot U; \\ Z_0 &= E_0 \cdot F + F_0 \cdot V_0 + D_M \cdot S; \\ T_0 &= Q_0 \cdot Z_0, \end{aligned} \quad (13)$$

$$\text{где } \dot{F} = [\dot{F}_1 \quad \dot{F}_2 \quad \dot{F}_3 \quad \dot{F}_3]^T, C_1 = \left[ 0 \quad \frac{h_3 h_2}{m_1 m_2} \quad 0 \quad \frac{(h_3 + h_2) h_2}{m_2^2} - \frac{c_2}{m_2} \right]^T, D_M = \left[ 0 \quad \frac{h_2}{m_2} \right]^T.$$

Неравномерность припуска на поверхности заготовки и случайные колебания торца диска от заданных значений в процессе термофрикционного резания могут быть смоделированы в виде марковских случайных процессов второго порядка с корреляционными функциями типа:

$$R(v\tau) = D e^{(-\alpha v|\tau|)} \cos(\beta v\tau), \quad (14)$$

где  $D$  – дисперсия высот неровностей рельефа заготовки,  $v$  – скорость движения инструмента в процессе ТФР,  $\alpha, \beta$  – соответствующие коэффициенты корреляции.

Для условий ТФР плоских заготовок построен расширенный формирующий фильтр, которому в пространстве состояний соответствует система, состоящая из трех уравнений:

$$\begin{aligned} \dot{G} &= A_f G + B_f w; \\ R &= C_f \cdot G; \\ H_f &= Q_f \cdot R, \end{aligned} \quad (15)$$

$$\text{где } G = \begin{bmatrix} G_1 \\ G_2 \end{bmatrix}, \dot{G} = \begin{bmatrix} \dot{G}_1 \\ \dot{G}_2 \end{bmatrix}, A_f = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{1}{T_1^2} & -\frac{T_2}{T_1^2} \end{bmatrix}, B_f = \begin{bmatrix} KT_3 \\ -1 - KT_2 T_3 \end{bmatrix}, Q_f = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$w$  – единичный гауссовский белый шум, и соотношение, представляющее наблюдатель:  $R = C_f G, C_f = [1 \quad 0]$ ,  $y$  – выходная координата

формирующего фильтра, реализующего коррелированный шум с характеристиками, соответствующими профилю рельефа, представленному зависимостью (14),

$$T_1 = \frac{1}{v^2(\alpha^2 + \beta^2)}, T_2 = \frac{2\alpha}{v(\alpha^2 + \beta^2)}, T_3 = \frac{1}{v(\alpha^2 + \beta^2)}, K = \sqrt{2} \sqrt{\frac{D\alpha}{v(\alpha^2 + \beta^2)}}.$$

С учетом (15) расширенная модель системы (3) приобретает вид:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{F} \\ \dot{G}_f \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} A_0 & B_1 \cdot Q_f \\ 0 & A_f \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} F \\ G_f \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_1 \\ 0 \end{bmatrix} \cdot U + \begin{bmatrix} 0 \\ B_f \end{bmatrix} \cdot W; \\ Z_0 &= E_0 \cdot Q_0 \begin{bmatrix} F \\ G_f \end{bmatrix} + F_0 \cdot V_0 + D_M \cdot U; \\ T_0 &= Q_0 \cdot Z_0, \end{aligned} \quad (16)$$

где  $Q_f = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$ .

Для компактности записи модели первые два уравнения системы (16) приведем к форме:

$$\begin{aligned} X &= A \cdot X + B \cdot U + E \cdot W \\ Z &= C \cdot X + R \cdot V \end{aligned} \quad (17)$$

На основе математического описания объекта (16) может быть построен стохастический наблюдатель, позволяющий получать оптимальные в среднеквадратическом смысле оценки значений температуры в зоне резания при ТФР, путем решения матричного уравнения Риккати:

$$\dot{\tilde{V}} = A \cdot \tilde{V} + \tilde{V} \cdot A^T + E \cdot \Psi_w \cdot E^T - \tilde{V} \cdot C^T \cdot \Psi_v^{-1} \cdot C \cdot \tilde{V}. \quad (18)$$

Матрица коэффициентов усиления фильтра Калмана определяется следующей зависимостью

$$K = \tilde{V} \cdot C \cdot \Psi_v^{-1} \quad (19)$$

Тогда алгоритм фильтрации наблюдений определяется матричными уравнениями

$$\hat{\dot{Y}} = A \cdot \hat{Y} + B \cdot U + K \cdot [Z - B \cdot U - C \cdot \hat{X}] \quad (20)$$

$$\begin{bmatrix} \hat{T}(t_f) \\ \hat{T}(\dot{t}_f) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \hat{Y}$$

Соотношения (18), (19) позволяют использовать результаты измерений координат в процессе обработки детали с целью построения оценок параметров процесса обработки. Эти оценки являются оптимальными при условии гауссовости шумов измерений и возмущений.

Для процессов механической обработки эффективное управление объектом возможно за счет совместного решения задач оценивания состояния и регулирования, которые должны быть включены в единый процесс. Такое решение может быть получено на основе теории стохастического управления, в соответствии с принципом разделения реализуется последовательным соединением оптимального фильтра,

оценивающего состояние системы и оптимального детерминированного регулятора.

Осуществим синтез такой системы для термофрикционного резания.

Для синтеза оптимального детерминированного регулятора может быть использован подход, изложенный в работе [2]. Данная методика предполагает выбор критерия эффективности.

В нашем случае регулятор должен оптимальным образом отслеживать номинальный алгоритм движения объекта, при котором должен поддерживаться заданный температурный режим. Для этих целей может быть выбран среднеквадратический критерий вида:

$$I = M \left[ \frac{1}{2} x^T(t) Q_1 x(t) + \frac{1}{2} \int_0^{t_f} (x^T Q_2 x + u^T Q_3^{-1} u) dt \right] \quad (21)$$

где  $Q_1, Q_2, Q_3$ , соответствующие весовые матрицы качества управления.

Матрица коэффициентов усиления управления регулятора определяется следующей зависимостью:

$$u^*(t) = -B_1 \hat{x}(t), \quad (22)$$

$$\text{где } \hat{x}(t) = \begin{bmatrix} \hat{T}(t_f) \\ \hat{T}(\dot{t}_f) \end{bmatrix}, B_1 = Q_3^{-1} G^T \tilde{P}_1, \text{ а матрица } \tilde{P}_1$$

удовлетворяет уравнению Риккати:

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{P}}_1 = & -\tilde{P}_1 \cdot \begin{bmatrix} F_0 & 0 & 0 \\ 0 & F_\psi & 0 \\ 0 & 0 & F_\phi \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} F_0 & 0 & 0 \\ 0 & F_\psi & 0 \\ 0 & 0 & F_\phi \end{bmatrix}^T \tilde{P}_1 + \tilde{P}_1 \cdot \begin{bmatrix} I & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T \times \\ & \times Q_3^{-1} \cdot \begin{bmatrix} I & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T \cdot \tilde{P}_1 - Q_3, \quad \tilde{P}_1(0) = \tilde{P}_{10} \end{aligned}$$

В соответствии с (21), (22) и (20) модель системы с регулятором приобретает вид:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{\hat{Y}} \\ \dot{\hat{\Psi}} \\ \dot{\hat{\Phi}} \end{bmatrix} = & \begin{bmatrix} F_0 & 0 & 0 \\ 0 & F_\psi & 0 \\ 0 & 0 & F_\phi \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \hat{Y} \\ \hat{\Psi} \\ \hat{\Phi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} I & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot Q_3^{-1} \begin{bmatrix} G_0 & 0 & 0 \\ 0 & G_\psi & 0 \\ 0 & 0 & G_\phi \end{bmatrix}^T P_1 \cdot \begin{bmatrix} \hat{Y} \\ \hat{\Psi} \\ \hat{\Phi} \end{bmatrix} + \\ & + P \cdot \begin{bmatrix} I & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & I \end{bmatrix}^T \cdot \Omega^{-1} \times \left[ z(t) - \begin{bmatrix} I & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & I \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \hat{Y} \\ \hat{\Psi} \\ \hat{\Phi} \end{bmatrix} \right], \hat{X}(0) = \bar{X}(0). \end{aligned} \quad (23)$$

На основании (17), (19) и (22), замкнутый контур регулирования, состоящий из объекта, фильтра и регулятора, для технологической

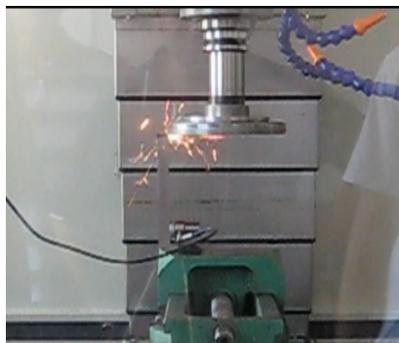
системы ТФР, характеризуется обобщенной системой дифференциальных уравнений:

$$\begin{bmatrix} \dot{X} \\ \dot{\hat{X}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F & -CB_1 \\ BH & F - CB_1 - BH \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} X \\ \hat{X} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} G \\ 0 \end{bmatrix} \times W + \begin{bmatrix} 0 \\ B \cdot \Omega \end{bmatrix} \cdot v$$

### Заключение

Испытание предложенной системы осуществили на станке модели OPTIMUM F3 CNC,

оснащённом комплексом измерительной аппаратуры для измерения относительных колебаний инструмента, заготовки и температуры в зоне контакта (рис. 2).



**Рис. 2. Обработка заготовки методом ТФР на станке модели OPTIMUM F3 CNC**

**Fig. 2. Machining by the TFC method on an OPTIMUS F3 CNC machine**

Обработку заготовок проводили на режимах, указанных в табл. 1.

## 1. Режимы резания

### 1. Cutting modes

Материал заготовки	Глубина резания, мм	Ширина обработки, мм			Интервал температуры контактной поверхности, °С
		60...70	80...90	90...100	
		Подача стола, мм/мин			
Сталь 45	2	200	180	160	800...1200
	2,5	180	160	125	
	3	160	125	100	

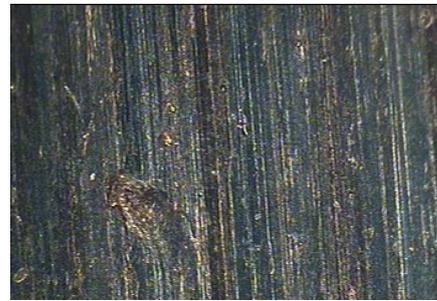
Фотографии поверхности образцов, обработанных методами программного управления и с помощью системы стохастического управления с обратной связью приведены на рис. 3.

В качестве образцов использовали заготовки из стали 45, на поверхности которых

после разметки были проведены измерения микротвердости в 10 точках с интервалом 5 мм (табл. 2).



*a)*



*б)*

**Рис. 3. Поверхность образцов после ТФР:**

*a* – без стохастического управления; *б* – с использованием стохастического регулятора

**Fig. 3. Sample surface after TFC:**

*a* – without stochastic control; *b* – using a stochastic regulator

## 2. Экспериментальные данные по измерению микротвердости заготовок из стали 45

### 2. Experimental data on measuring the microhardness of blanks made of 45 steel

Без стохастического управления										
Микротвердость поверхности в точках измерения, НВ										<i>Rz</i>
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
252	217	216	250	254	285	282	277	234	241	80
С стохастическим управлением										
251	255	253	252	252	251	255	254	251	250	40

Анализ полученных результатов показывает, что для повышения качества обработки на операциях термофрикционного резания целесообразно использовать системы с обратной связью, оснащённые блоками стохастического оптимального оценивания и управления выходными показателями в процессе съёма припуска на обработку.

Выполнение испытания предложенных систем управления свидетельствуют об улучшении

качества обработанной поверхности, например снижении шероховатости в два раза по показателю *Rz* и повышению стабильности показателя микротвёрдости в 2 – 8 раз при ТФР образцов из стали 45. Полученные результаты могут быть использованы для синтеза систем управления операциями ТФР для других материалов и могут служить основой для создания более сложных систем.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Зарубицкий Е.У., Плахотник В.А., Покинтелица Н.И. и др. Оптимизация режимов термофрикционного резания // Вестник машиностроения. 1998. № 9. С. 54–56.
2. Покинтелица Н.И., Стреляная Ю.О., Братан М.И. Пластическое деформирование при термофрикционной обработке материалов // Ученые записки Крымского инженерно-педагогического университета. 2022. № 3 (77). С. 188–191. DOI 10.34771/UZCEPU.2022.77.3.036. EDN XHTITS.
3. Зарубицкий Е.У. Температура снимаемого припуска при термофрикционном резании // Оптимизация процессов резания жаропрочных и особо прочных материалов. Уфа: Изд-во УАИ, 1986. С. 106–110.
4. Волков О.А. Исследование теплodeформационного влияния при поверхностном упрочнении сталей термофрикционной обработкой // ВЕЖПТ. 2016. № 5 (80). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-teplodeformatsionnogo-vliyaniya-pri-poverhnostnom-uprochnenii-staley-termofriktsionnoy-obrabotkoy>.
5. Талантов Н.В. Физические основы процесса резания, изнашивания и разрушения инструмента. М.: Машиностроение, 1992. 240 с.
6. Костецкий Б.И., Натансон М.Э., Бершадский Л.И. Механико-химические процессы при граничном трении. М.: Наука, 1972. 170 с.
7. Балакин В.А. Трение и износ при высоких скоростях скольжения. - М.: Машиностроение, 1980. 136 с.
8. Братан С.М., Покинтелица Н.И., Якубов Ч.Ф., Часовитина А.С. Методика математического описания оценки геометрии инструмента с учетом теплофизических параметров // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2024. № 2 (364). С. 18–23. DOI 10.33979/2073-7408-2024-364-2-18-23.
9. Покинтелица Н.И., Братан М.И., Якубов Ч.Ф. Методология обеспечения повышения эффективности фрикционного формообразования поверхностей // Ученые записки Крымского инженерно-педагогического университета. 2023. № 1 (79). С. 252–260. DOI 10.34771/UZCEPU.2023.79.1.050. EDN FOCKNK.
10. Якубов Ч.Ф., Покинтелица Н.И., Братан С.М., Часовитина А.С. Моделирование процессов теплопередачи при термофрикционном резании в заготовках из конструкционных сталей // Научно-технические технологии в машиностроении. 2024. № 10 (160). С. 19–26. DOI 10.30987/2223-4608-2024-19-30.

REFERENCES

1. Zarubitsky E.U., Plakhotnik V.A., Pokintelitsa N.I. et.al. Optimization of thermal friction cutting modes // Bulletin of Mechanical Engineering. 1998, no. 9. pp. 54–56.1
2. Pokintelitsa N.I., Strelyanaya Yu.O., Bratan M.I. Plastic deformation during thermofriction processing of materials. Scientific notes of the Crimean Engineering Pedagogical University. 2022, no. 3 (77), pp. 188–191. DOI 10.34771/UZCEPU.2022.77.3.036.
3. Zarubitsky E.U. The temperature of the removable allowance under thermofriction cutting // Optimization of cutting processes of heat-resistant and extra strong materials. Ufa: UAI Publishing House, 1986, pp. 106–110.
4. Volkov O.A. Investigation of the thermal deformation effect during surface hardening of steels by thermal friction treatment // VEZHPT. 2016, no. 5 (80). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-teplodeformatsionnogo-vliyaniya-pri-poverhnostnom-uprochnenii-staley-termofriktsionnoy-obrabotkoy>.
5. Talantov N.V. The physical foundations of the process of cutting, tool wear and destruction. Moscow: Mashinostroenie, 1992, 240 p.
6. Kostetsky B.I., Natanson M.E., Bershadsky L.I. Mechanical and chemical processes under boundary friction. Moscow: Nauka, 1972, 170 p.
7. Balakin V.A. Friction and wear at high sliding speeds. Moscow: Mashinostroenie, 1980, 136 p.
8. Bratan S.M., Pokintelitsa N.I., Yakubov C.F., Chasovitina A.S. Method of mathematical description of tool geometry estimation taking into account thermophysical parameters // Fundamental and applied problems of engineering and technology. 2024, no. 2 (364), pp. 18–23. DOI 10.33979/2073-7408-2024-364-2-18-23.
9. Pokintelitsa N.I. Bratan M.I., Yakubov Ch.F. Methodology for ensuring the effectiveness of frictional shaping of rotations. Scientific notes of the Crimean Engineering Pedagogical University, 2023, no. 1 (79), pp. 252–260. DOI 10.34771/UZCEPU.2023.79.1.050.EDN FOCKNK.
10. Yakubov Ch.F., Pokintelitsa N.I., Bratan S.M., Chasovitina A.S. Modeling of heat transfer processes under thermal friction cutting in mild steel blanks // Science-intensive technologies in mechanical engineering. 2024, no. 10 (160), pp. 19–26. DOI 10.30987/2223-4608-2024-19-30.

**Вклад авторов:** все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Contribution of the authors:** the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 24.05.2025; одобрена после рецензирования 29.05.2025; принята к публикации 06.06.2025.

The article was submitted 24.05.2025; approved after reviewing 29.05.2025; assepted for publication 06.06.2025.