

УДК 621.9.01:531.3

В.С. ГУСАРЕВ, Ю.В. ЯРОВОЙ*Одесский национальный политехнический университет, Украина***ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ДЕЙСТВИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ОТ РЕЖИМОВ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ**

Предложен новый энергетический критерий действия технологической системы, который определяется как работа формообразования за интервал времени. Выведены выражения для определения действия технологической системы. На основе данных эксперимента определены эмпирические зависимости действия технологической системы от режимов резания (подачи, скорости резания и глубины резания). Выполнен анализ экспериментальных данных для чернового и чистового этапа обработки наружных цилиндрических поверхностей. Выполнено сравнение теоретических и экспериментальных данных. Показано, что наибольшее влияние на действие технологической системы оказывают величина подачи и скорости резания.

Ключевые слова: критерий, действие, технологическая система, точение, этап обработки, подача, скорость резания, глубина резания.

Введение

Выбор технологического метода обработки поверхности в технологии двигателестроения, машиностроения и приборостроения в основном осуществляется по критерию себестоимость и трудоемкость обработки [6, 10]. Ряд исследователей также выделяют энергетические критерии – энергоемкость и удельную работу формообразования [4, 7, 8, 9]. Также, следует заметить, что в работах В.К. Старкова рассматриваются два энергетических критерия отдельно для черновой и чистовой обработок [9]. Наличие разных энергетических критериев затрудняет использование их в технологии для оптимизации режимов резания и поиска оптимальных технологических процессов.

1. Теоретическая часть

Формообразование поверхностей деталей машин может производиться различными методами (точением, шлифованием, фрезерованием и т.д.). Каждый метод обработки позволяет получить определенные параметры качества поверхности и имеет свои преимущества и недостатки. Перед технологом всегда стоит задача выбора наиболее рационального метода обработки поверхности, а следовательно и проектирование перспективного технологического процесса.

Технологическая система состоит из ряда объектов, а именно: заготовки, режущего инструмента, технологического оборудования. В технологической системе присутствуют силы, которые воздействуют

на ее элементы. Поэтому данную систему можно рассматривать не только как технологическую, но как физическую и механическую.

Если технологическую систему рассматривать, как физическую и механическую, то к ней можно применить вариационные принципы механики. Одним из таких принципов является принцип наименьшего действия.

Его применение возможно также в исследовании различных биологических, химических, социальных систем [3], а также при выборе оборудования для переработки отходов минерального сырья [2].

Согласно этому принципу наименьшего действия, каждая механическая система характеризуется определенной функцией Лагранжа

$$L(x_1, x_2, \dots, x_i, \dot{x}_1, \dot{x}_2, \dots, \dot{x}_i, T), \quad (1)$$

или, в краткой записи,

$$L(x, \dot{x}, T), \quad (2)$$

где x – координаты системы;

\dot{x} – скорость системы;

T – время движения системы.

Действие механической системы определяется как интеграл по времени от функции Лагранжа данной механической системы. Действие механической системы в интервале времени описывается интегралом

$$D = \int_{T_1}^{T_2} L(x, \dot{x}, T) dT, \quad (3)$$

где T_1, T_2 – соответственно время начала и окончания движения системы.

Исходя из принципа наименьшего действия, действие любой системы должно стремиться к минимуму, т.е. $D \rightarrow \min$.

Функция Лагранжа является не только функцией координат, скорости и времени системы, но и разностью между кинетической и потенциальной энергиями системы [11]

$$L(x, \dot{x}, T) = K(x, \dot{x}, T) - U(x, T). \quad (4)$$

где K – кинетическая энергия системы;

U – потенциальная энергия системы.

Подставляя функцию Лагранжа (3) в уравнение (3) видим, что действие механической системы определяется интегралом разности кинетической и потенциальной энергий в промежутке времени от T_1 до T_2 :

$$D = \int_{T_1}^{T_2} (K(x, \dot{x}, T) - U(x, T)) dT. \quad (5)$$

Из выражения (5) можно сделать вывод, что действие есть энергия, которая затрачивается системой за некий отрезок времени, необходимый для совершения определенного перемещения. Мощность является производной действия. (Производная энергии по времени – мгновенная мощность).

Действие технологической системы для операций формообразования поверхности можно описать обобщенной формулой:

$$D = \int_{T_n}^{T_k} P l dT, \quad (6)$$

где P – сила резания, которая затрачивается на формообразование поверхности;

l – длина обрабатываемой поверхности;

T_n, T_k – время начала и окончания обработки.

Усилие резания и длина обрабатываемой поверхности при формообразовании являются скалярными величинами, поэтому выражение (6) можно записать следующим образом:

$$D = A \Delta T, \quad (7)$$

где A – работа формообразования поверхности;

ΔT – интервал времени, в котором выполняется формообразование поверхности.

При установленном режиме обработки работу формообразования можно представить в виде

$$A = NT, \quad (8)$$

где N – мощность, затрачиваемая на формообразование поверхности

T – время обработки (формообразования) поверхности.

Интервал времени, в котором выполняется формообразование поверхности, будем рассматривать как время формообразования (основное время обработки).

Подставим выражение для работы формообразования (8) в выражение действия технологической (7). В результате выражение для действия технологической системы выглядит следующим образом:

$$D = N T \Delta T = N T^2. \quad (9)$$

Анализ данного выражения показывает, что действие технологической системы будет минимальным в следующих случаях: мощность резания и время формообразования стремятся к минимуму ($N \rightarrow \min, T \rightarrow \min$); мощность резания стремится к максимуму, а время формообразования – к минимуму ($N \rightarrow \max, T \rightarrow \min$).

Если представить мощность резания в виде зависимости от режимов резания (скорости резания, подачи и глубины резания), то выражение (9) приводится к целевой функции $D \rightarrow \min$, содержащей в качестве аргументов управляемые технологические факторы.

Представим действие технологической системы D как целевую функцию. Для этого воспользуемся широко применяемыми методиками определения мощности резания и времени формообразования.

Мощность резания при формообразовании поверхностей лезвийным инструментом зависит от тангенциальной составляющей силы резания и скорости резания:

$$N = \frac{P_z v}{1020 \cdot 60}, \quad (10)$$

где P_z – тангенциальная составляющая силы резания;

v – скорость резания;

C_1 – постоянная (константа).

В выражении (9) учитывается время, которое затрачивается на процесс образования новой поверхности с заданными параметрами качества. Время формообразования, или основное (машинное) время для любого процесса механической обработки рассчитывают следующим образом [6]:

$$T_o = \frac{L}{ns} i, \quad (11)$$

где L – длина обрабатываемой поверхности с учетом величины врезания и перебега;

i – количество проходов;

n – частота вращения шпинделя.

Подставляя в выражение действия механической системы (9) формулы мощности резания (10) и основного времени (11), которые учитывают управляемые параметры формообразования и выполнив преобразования, получим целевую функцию в следующем виде:

$$D = C_4 t^{x-2} s^{y-2} v^{n-1} K_p K_{обp}, \quad (12)$$

где C_4 – постоянная;

$K_{обр}$ – коэффициент учитывающий параметры обработки (диаметр, длину и глубину резания).

Выражение (12) имеет общий вид для обработки деталей машин из различных материалов на токарном оборудовании.

Используя полученное выражение действия технологической системы в виде целевой функции, можно выполнить оптимизацию параметров режимов резания. Причем при оптимизации режимов резания необходимо стремиться к минимальному действию.

2. Экспериментальная часть

Полученное выражение (12) описывает зависимость действия технологического процесса от режимов резания. Математическое моделирование позволило отметить, что на действие оказывают наибольшее влияние параметр подачи и скорости резания.

Для подтверждения теоретических исследований проведено ряд экспериментов. Эксперименты выполнялись для исследования токарной обработки (черновой и чистовой этапы). Исследуемый материал сталь 45 (диаметр 50 мм, длина резания 100 мм), режущий инструмент – токарный проходной резец с пластиной из твердого сплава T15K6. Оборудование токарно-винторезный станок 16K20. Потребляемая станком электрическая мощность измерялась сертифицированным прибором (датчик мощности), который присоединялся к клеммам электродвигателя приводов главного движения.

При исследовании процессов резания многие зависимости традиционно представляют уравнениями степенного вида. Сделаем предположение о том, что зависимость действия технологической системы от исследуемых факторов (глубины резания, подачи и скорости резания) можно представить уравнением регрессии степенного вида

$$D = c s^{\alpha} t^{\beta} v^{\gamma}, \quad (13)$$

где c – постоянный коэффициент;

α, β, γ – показатели степени.

Уравнение (11) после логарифмирования получает вид

$$\ln D = \ln c + \alpha \ln s + \beta \ln t + \gamma \ln v. \quad (14)$$

Результаты эксперимента выражаются в полиномиальном виде [1, 5].

Справедливость зависимости действия технологической системы от режимов резания можно установить проверкой адекватности линейной части полинома. Для определения коэффициентов уравнения проведен факторный эксперимент типа 2^3 . По каждой точке выполнялось три повторения. Для

каждого этапа обработки был определен интервал варьирования: черновой этап – скорость резания от 62,8 до 98,9 м/мин, подача от 0,195 до 0,61 мм/об, глубина резания от 3 до 5 мм; чистовой этап – скорость резания от 127,95 до 157 м/мин, подача от 0,084 до 0,3 мм/об, глубина резания от 0,25 до 1 мм. Принятые интервалы варьирования поддерживаются технологическим оборудованием.

Поскольку во всех точках эксперимента имеется одинаковое число повторений опыта, для проверки однородности дисперсии воспользовались критерием Кохрена. Критерий Кохрена подтвердил гипотезу об однородности дисперсии, как для чернового, так и чистового этапов обработки. Доверительный интервал найден с использованием табличного критерия Стьюдента. После исключения незначимых коэффициентов из уравнения получили

$$y = 0,98 - 0,61x_1 + 0,69x_2 - 0,23x_3, \quad (15)$$

$$y = 0,94 - 0,69x_1 + 0,591x_2 - 0,24x_3. \quad (16)$$

Уравнение (15) описывает черновую обработку, а (16) – чистовую. Адекватность уравнений проведена по F-критерию. Так как линейная модель адекватна, следовательно, зависимость действия технологической системы от исследуемых факторов процесса токарной обработки можно представить с достаточной точностью уравнением (13).

Выполнив преобразования находим зависимость действия технологической системы от исследуемых факторов при токарной обработке:

$$D = 6,2s^{-1,07}t^{0,84}v^{-1,02}, \quad (17)$$

$$D = 6,4s^{-1,08}t^{0,85}v^{-1,04}. \quad (18)$$

Экспериментальные зависимости близки друг к другу, так как этапы обработки отличаются только интервалами варьирования.

На основе полученных экспериментальных выражений выполнено математическое моделирование зависимости действия технологической системы от подачи, глубины и скорости резания для рассмотренных этапов обработки. Анализ графических зависимостей (рис. 1–3) показывает, что увеличение продольной подачи на этапах обработки наружных цилиндрических поверхностей приводит к уменьшению действия технологической системы в 1,5–3 раза (на 30–70 %) в зависимости от этапа обработки и используемого режущего инструмента.

Увеличение глубины резания на этапах обработки наружных цилиндрических поверхностей приводит к возрастанию действия в 2–3 раза (на 50–70 %) в зависимости от этапа обработки. Такое существенное возрастание действия при изменении глубины резания в первую очередь связано с изменением мощности резания. Изменение глубины резания не приводит к изменению времени обработки.

Увеличение скорости резания на черновом и чистовом этапах обработки приводит к уменьшению действия в 1,2 раза (на 15 %). Сопоставление экспериментальных и теоретических данных позволяет сделать вывод о линейной зависимости действия технологической системы от глубины и скорости резания (рис. 1, 2). Можно предположить, что линейная зависимость действия технологической системы от глубины и скорости резания будет характерна не только для рассмотренных видов обработки, но и для всей лезвийной обработки.

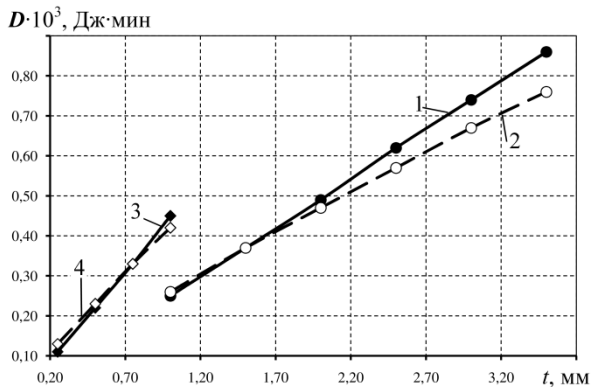


Рис. 1. Зависимость действия технологической системы от глубины резания: 1, 2 – теоретическая и экспериментальная зависимость (черновой этап); 3, 4 – теоретическая и экспериментальная зависимость (чистовой этап)

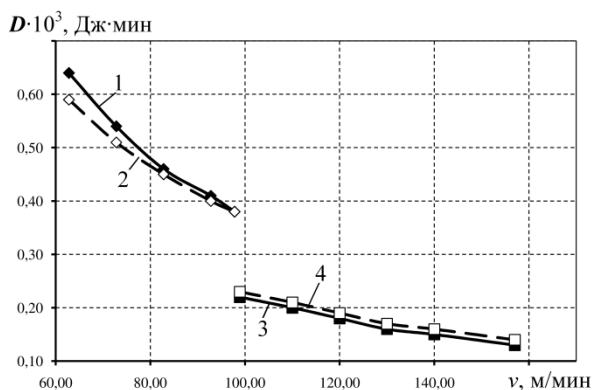


Рис. 2. Зависимость действия технологической системы от скорости резания: 1, 2 – теоретическая и экспериментальная зависимость (черновой этап); 3, 4 – теоретическая и экспериментальная зависимость (чистового этап)

Сравнение результатов математического моделирования и экспериментальных зависимостей действия технологической системы, а также их графический анализ показывают высокую точность экспериментальных зависимостей. Графические зависимости обоих видов размещены довольно близко, что подтверждает адекватность полученных математических моделей для расчета действия технологиче-

ской системы. Отличие экспериментальных данных от теоретических не превышает пяти процентов.

С целью снижения действия технологической системы обработку наружных цилиндрических поверхностей следует производить с максимально допустимыми скоростями главного движения и подачи.

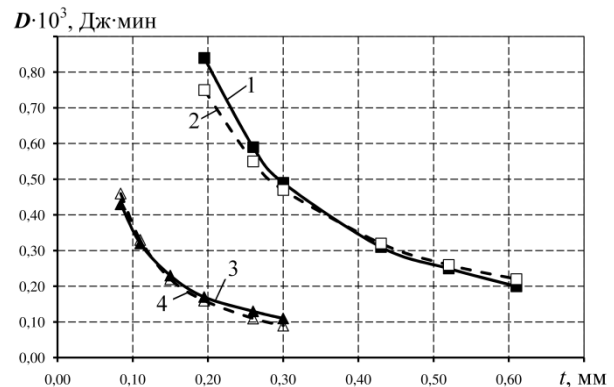


Рис. 3. Зависимость действия технологической системы от подачи: 1, 2 – теоретическая и экспериментальная зависимость чернового этапа; 3, 4 – теоретическая и экспериментальная зависимость (чистовой этап)

Заключение

Экспериментальные и теоретические исследования проводились для стали 45, которая широко используется в общем машиностроении. Ввод в обиход технолога нового критерия действия технологической системы позволяет определить оптимальные режимы резания для обеспечения наименьшей энергоемкости производства, а также связать между собой энергетические и технико-экономические критерии. Данный критерий может в дальнейшем использоваться для сравнения и поиска оптимального варианта технологического процесса.

Литература

1. Адлер, Ю.П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий [Текст] / Ю.П. Адлер, Е.В. Макарова, Ю.В. Грановский. – М.: Наука, 1976. – 279 с
2. Вэньчже, Ян. Применение принципа наименьшего действия при выборе оборудования для переработки отходов минерального сырья [Текст] / Ян Вэньчже // Вестник машиностроителя. – 2002. – № 9. – С. 79-80.
3. Горелов, А.П. О физических принципах развития [Текст] / А.П. Горелов, Р.Г. Савченко // Вопросы кибернетики / под ред. Б.В. Бирюкова, В.А. Веникова. – М.: Наука, 1977. – Вып. 32. Энергетический подход к исследованию систем. – С. 90-102.

4. Гусарев, В.С. Энергетическая эффективность технологических процессов [Текст] / В.С. Гусарев // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2000. – №. 14 – С. 41-44.

5. Зедгинидзе, И.Г. Планирование эксперимента при исследовании многокомпонентных систем [Текст] / И.Г. Зедгинидзе. – М.: Наука, 1976. – 390 с.

6. Маталин, А.А. Точность производительность и экономичность механической обработки [Текст] / А.А. Маталин, В.С. Рысцова. – М.-Л.: Машиз, 1963. – 352 с.

7. Силин, С.С. Методы подобия при резании металлов [Текст] / С.С. Силин. – М., Машиностроение, 1979. – 152 с.

8. Силин, С.С. Оптимизация операций механической обработки по энергетическим критериям [Текст] / С.С. Силин, А.В. Баранов // *Станки и инструменты*, 1999. – № 1. – С. 16-17.

9. Старков, В.К. Оптимизация процесса резания по энергетическим критериям [Текст] / В.К. Старков, М.В. Киселев // *Вестник машиностроения*, 1989. – №4. – С. 41-45.

10. Суслов, А.Г. Научные основы технологии машиностроения [Текст] / А.Г. Суслов, А.М. Дальский. – М.: Машиностроение, 2002. – 684 с.

11. Физические эффекты в машиностроении [Текст]: справ. / В.А. Лукьянец, З.И. Алмазова, Н.П. Бурмистрова и др.; под ред. В.А. Лукьянца. – М.: Машиностроение, 1993. – 224 с.

Поступила в редакцию 13.05.2013, рассмотрена на редколлегии 12.06.2013

Рецензент: д-р техн. наук, проф., проф. кафедры В.М. Тонконогий, Одесский национальный политехнический университет, Одесса.

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАЛЕЖНОСТІ ДІЇ ТЕХНОЛОГІЧНОЇ СИСТЕМИ ВІД РЕЖИМІВ ФОРМОУТВОРЕННЯ

В.С. Гусарев, Ю.В. Яровий

Запропоновано новий енергетичний критерій дія технології системи, який визначається як робота формоутворення за інтервал часу. Виведено вирази для визначення дії технологічної системи. На основі даних експерименту визначено емпіричні залежності дії технологічної системи від режимів різання (подачі, швидкості різання та глибина різання). Виконано аналіз експериментальних даних для чорнового та чистового етапів обробки зовнішніх циліндричних поверхонь. Виконано порівняння теоретичних та експериментальних даних. Найбільший вплив на дію технологічної системи оказує величина подачі та швидкість різання.

Ключові слова: критерій, дія, технологічна система, обточування, етапи обробки, подача, швидкість різання, глибина різання.

EXPERIMENTAL STUDY OF DEPENDENCE OF TECHNOLOGICAL SYSTEM ACTION OF FORM-BUILDING MODES

V.S. Gusarev, Yu. V. Yarovoy

New energy criterion of technological system action is proposed, it is defined as the work of form-building at the time interval. The expressions for technological system action determination are taken out. On the basis of experimental data the empirical dependences of technological system action for cutting modes (feed-motion, cutting speed and cutting depth) are determined. Analysis of experimental data for rough-working and finishing processing of external cylindrical surfaces is carried out. The comparison of theoretical and experimental data is performed. It is shown that feed-motion rate and cutting speed provide the greatest effect on technological system action.

Keywords: criterion, action, technological system, turning, stage of processing, feed-motion, cutting speed, cutting depth.

Гусарев Владимир Сергеевич – канд. техн. наук, доцент кафедры технологии машиностроения Одесского национального политехнического университета, Одесса, Украина.

Яровой Юрий Валентинович – старший преподаватель кафедры технологии машиностроения Одесского национального политехнического университета, Одесса, Украина, e-mail: yuraodua@ukr.net.