УДК 621.91.01

С. О. Приступа аспірант, **С.А. Мороз** канд. техн. наук,
Луцький національний технічний університет, Україна
E-mail: slavik.prystupa@gmail.com

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОГО БАЛАНСУ ЗОНИ РІЗАННЯ В ПРОЦЕСІ МЕХАНІЧНОГО ОБРОБЛЕННЯ ДЕТАЛЕЙ МАШИН.

В статті проведенні теоретичні дослідження, які стосуються формування енергозатрат під час механічного оброблення робочих поверхонь деталей машин. Проаналізовано енергетичний баланс зони різання. Складено систему диференційних рівнянь, які описують фізичні та термодинамічні перетворення енергії, в осередку механічного оброблення. Запропоновано показники енергоефективності, які дають змогу оцінити ККД процесу різання та зручного порівняння альтернативних маршрутів оброблення і параметрів окремих операцій. Зроблені висновки містять рекомендації, які дають змогу досягнути максимальної продуктивності процесу механічного оброблення.

Ключові слова: *деформація, поверхня, різання, тепло, енергетичний баланс*.

Вступ

Сучасний рівень розвитку науки і техніки зумовлює необхідність створення та реалізації технологічних процесів, під час застосування яких забезпечуються необхідні якісні показники та експлуатаційні властивості деталей машин та механізмів. Разом з тим в процесі механічного оброблення деталей слід досягати оптимального енергетичного балансу для досягнення необхідних змін в структурі оброблюваних поверхонь. Однак внаслідок складних структурних та фізичних перетворень, які відбуваються в осередку механічного оброблення, визначення витрат та руху енергії в зоні різання є досить складним завданням. Тому встановлення чітких закономірностей використання потужностей технологічного обладнання та затраченої енергії на руйнування та зміцнення поверхневого шару є актуальною науково-технічною проблемою.

Виклад основного матеріалу

Згідно сучасних уявлень процеси зміцнення та руйнування, які відбуваються в металах під час механічного оброблення є кінетично необоротними процесами та не залежать від фізико-хімічної природи металу, його структури, а також умов навантаження. З точки зору кінематики процесу, руйнування твердих тіл умовно розділяють на два періоди. В першому періоді в поверхневому шарі металу, що деформується зароджуються та накопичуються різного роду дефекти (вакансії дислокації). Другий період, характеризується накопиченням в локальному мікрооб'ємі матеріалу критичної густини енергії $\Delta U_к$ після чого в процесі різання відбувається відділення стружки від заготовки. Фактично $\Delta U_к$ це мінімальна кількість енергії, яку необхідно затратити, щоб тим чи іншим способом (відривом, крученням тощо) порушити цілісність матеріалу та отримати нову поверхню. Величина $\Delta U_к$ визначається властивостями матеріалу, що відповідають, за опір руйнуванню, початковим рівнем внутрішньої енергії, та геометричними розмірами заготовки. Для

© Приступа С.О., Мороз С.А., 2014

кількісної оцінки величини $\Delta U_к$ — потрібно враховувати особливості процесу механічного оброблення.

На сьогоднішній день теоретично та експериментально встановлено, що процес руйнування матеріалів лезовим і абразивним інструментом є динамічним і супроводжується великими затратами механічної енергії, яка необоротно перетворюється в інші види енергії. Це твердження дозволяє застосовувати закони і принципи термодинаміки необоротних процесів для дослідження закономірностей пластичного деформування та руйнування металів в процесі механічного оброблення [1].

В процесі різання в зоні первинної деформації (перед ріжучою кромкою (рис. 1)) і в зоні вторинної деформації (тертя стружки і деталі об передню і задню поверхні інструменту) деформації можуть набувати критичних значень. Ріст внутрішньої енергії $U_в$, призводить до утворення в системі різання нових дисипативних структур, які визначають механізм деформації шару металу, що зрізується, вид стружки, стійкість інструменту, якість поверхні і точність оброблення [2].

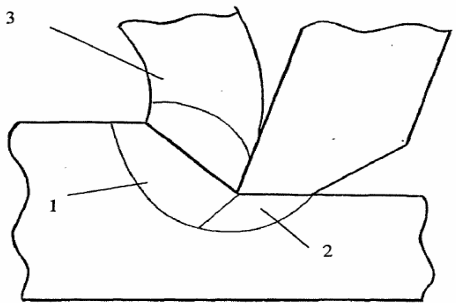

Рис. 1 Схема оброблення деталі різцем. 1 — зона деформації металу перед ріжучою кромкою; 2 — зона контакту поверхневого шару деталі із задньою поверхнею інструменту; 3 — зона контакту стружки з передньою поверхнею інструменту

У відповідності з термодинамічною теорією, накопичена в деформованому елементі внутрішня енергія U_B визначається сумою двох складових: пружною (потенціальною) $U_П$ і тепловою (кінетичною) U_T.

$$\Delta U_B = \Delta U_П + U_T. \tag{1}$$

В зв'язку з цим, згідно першого закону термодинаміки — закону перетворення та збереження енергії, процес руйнування та зміцнення, що відбувається під час механічного оброблення можна представити у вигляді системи диференційних рівнянь:

$$\dot{e} = \dot{U}_{1B} + \dot{U}_{2Bд.} + \dot{U}_{2Bз.г.} + \dot{U}_{2Bп.з.} + \dot{U}_{3Bп.г.} + \dot{U}_{3Bст.} + \dot{U}_{3Bп.ст.} + \sum \bar{q}_B, \tag{2}$$

$$\left.\begin{aligned} \dot{U}_{1B} &= \dot{U}_{1П} + \dot{U}_{2T} \\ \dot{U}_{2Bд.} &= \dot{U}_{2Пд.} + \dot{U}_{2Tд.} \\ \dot{U}_{2Bз.г.} &= \dot{U}_{2Пз.г.} + \dot{U}_{2Tз.г.} \\ \dot{U}_{3Bст.} &= \dot{U}_{3Пст.} + \dot{U}_{3Tст.} \end{aligned}\right\}, \tag{3}$$

$$\sum \vec{q}_B = \vec{q}_{1B} + \vec{q}_{2B} + \vec{q}_{3B}, \tag{4}$$

де $\dot{e}$ – питома потужність різання, U_{1B} – швидкість зміни внутрішньої енергії в об'ємі матеріалу перед ріжучою кромкою (перша зона див. рис. 1); $\dot{U}_{2Bд.}$, $\dot{U}_{2Bз.г.}$ – швидкість

зміни внутрішньої енергії в стружці і передній поверхні інструменту (друга зона); $\dot{U}_{3Bcm.}$, $\dot{U}_{3Bn.ст.}$ – швидкість зміни внутрішньої енергії в стружці і передній поверхні інструменту (третя зона); $\dot{U}_{2Bз.г.}$ – швидкість зміни енергії повороту субзерен в поверхневому шарі деталі (друга зона); $\dot{U}_{3Bn.cm.}$ – швидкість зміни енергії повороту субзерен стружки (третя зона) $\sum \vec{q}_B$ – сумарна швидкість відводу теплової енергії з першої $\vec{q}_{1B}$ другої $\vec{q}_{2B}$ і третьої $\vec{q}_{3B}$ зон різання.

Система рівнянь (2) – (4), описує складну картину фізичних явищ, що протікають в зоні механічного оброблення деталі. Розділивши ліву і праву частину цих рівностей на питому потужність різання $\dot{e}$ отримаємо відносне значення термодинамічних параметрів процесу механічного оброблення.

$$\delta_{1B} + \delta_{2Bд.} + \delta_{2Bз.г.} + \delta_{2Bn.з.} + \delta_{3Bn.г.} + \delta_{3Bcm.} + \delta_{3Bn.cm.} + \sum \dot{q}_{qB} = 1, \tag{5}$$

$$\left.\begin{aligned} \delta_{1B} &= \delta_{1П} + \delta_{2T} \\ \delta_{2Bд.} &= \delta_{2Пд.} + \delta_{2Tд.} \\ \delta_{2Bз.г.} &= \delta_{2Пз.г.} + \delta_{2Tз.г.} \\ \delta_{3Bcm.} &= \delta_{3Пcm.} + \delta_{3Tcm.} \end{aligned}\right\}, \tag{6}$$

$$\sum \vec{\delta}_B = \vec{\delta}_{1B} + \vec{\delta}_{2B} + \vec{\delta}_{3B}, \tag{7}$$

Під час розроблення оптимальної технології необхідно, щоб накопичена внутрішня енергія і її відносна величина в першій і другій зонах різання прямувала до свого оптимального значення, а в третій зоні — до мінімуму. Таке енергетичне співвідношення забезпечить необхідне зміцнення оброблюваної поверхні деталі, мінімальний наклеп стружки та стійкість інструменту. При цьому необхідно забезпечити максимальний відвід тепла з зони різання $\sum \vec{q}_B$ за рахунок застосування сучасних типів ЗОР і способів її віддачі.

Як показують експериментальні дослідження енергетичного балансу процесу механооброблення [4] найбільше значення поглинутої енергії U_{1B} спостерігається в першій зоні різання (рис.1). Її відносна величина досягає 25-30%. Накопичення енергії в поверхневому шарі деталі U_{2B}, інструменті $\dot{U}_{2Bз.г.}$ та енергетичні затрати на поворот субблоків (зерен) $\dot{U}_{2Bn.з.}$ протікає менш інтенсивно.

Для забезпечення високої якості оброблюваної поверхні, а саме відсутності структурних змін та термічних тріщин необхідно, щоб сума швидкості відведеної із зони різання теплової енергії $\sum \vec{q}_B$ і її відносна величина $\sum \vec{\delta}_B$ були оптимальними для кожного конкретного випадку механічного оброблення.

Енергетичний баланс процесу різання (2) дозволяє запропонувати критерії для оцінки його ефективності.

В якості показника енергетичної ефективності механічного оброблення приймають питому роботу різання e, роботу, що затрачається на зняття одиниці об'єму матеріалу:

$$e = \frac{A_{різ}}{V} = \frac{\dot{W}}{\dot{Y}} \tag{8}$$

де $A_{різ}$ – робота різання; V – об'єм матеріалу, що перетворився в стружку; $\dot{W}$, $\dot{Y}$ – потужність та продуктивність процесу механічного оброблення.

Питома робота різання e не залежить ні від часу оброблення, ні від розмірів і об'єму заготовки. За значенням e можна порівнювати енергетичну ефективність альтернативних маршрутів оброблення і параметрів окремих операцій.

Величина $\Delta U_к$ характеризує потенційну енергоємність процесу різання. Енергія, що передається, заготовці витрачається на пружнопластичне деформування її поверхневого шару, диспергування, тертя стружки об передню грань і тертя поверхні різання об задню грань інструменту. В цьому зв'язку робота різання $A_{різ}$ завжди перевищує $\Delta U_к$, внаслідок чого:

$$K_\eta = \frac{\Delta U_к}{A_{різ}} < 1 \tag{9}$$

Оскільки $\Delta U_к$ характеризує потенційну енергоємність процесу різання, а $A_{різ}$ – фактичну, то показник K_η показує енергетичну оцінку ефективності механічного оброблення – коефіцієнт корисної дії процесу (операції). Розділивши чисельник і знаменник на об'єм V, переходимо до питомих значень енергозатрат.

$$K_\eta = \frac{\Delta U_к}{A_{різ}} = \frac{\Delta u}{e} < 1 \tag{10}$$

де – Δu питома енергія руйнування одиниці об'єму металу.

Оскільки K_η показує енергетичний ККД процесу різання, слід встановити, які складові енергетичного балансу механічного оброблення прийняти за корисну роботу $\Delta U_к$. Згідно структурної моделі (рис 2), яка створена відповідно до (2) – (4) робота різання $A_{різ}$, що затрачається на пружнопластичну деформацію шару металу, який зрізується і утворення поверхонь розподілу в заготовці, трансформується в тепло Q і у внутрішню енергію ΔU_B (інструменту ΔU_{BI}, деталі ΔU_{B2} і стружки ΔU_{B3}). Енергію $\Delta U_к$ приймаємо рівною критичній питомій роботі деформації $e_{деф}$, що являє добуток дотичних напружень різання в площинах зсуву на величину відносної деформації: $e_{деф} = \tau \cdot \varepsilon$. Якщо $\varepsilon = \varepsilon_i \approx 2{,}5$ дотичне напруження τ досягають межі міцності нам зсув $\tau = \tau_p$, тому:

$$\Delta U_к = e_{деф} = \tau_p \cdot \varepsilon_i \left(1 - \frac{T_0}{T_S}\right), \tag{11}$$

де T_S – температура плавлення металу, що обробляється; $\left(1 - \frac{T_0}{T_S}\right)$ множник введений для врахування зменшення міцності з підвищенням початкової температури T_0. Якщо попередній нагрів відсутній, то $\left(1 - \frac{T_0}{T_S}\right) \approx 1$. Рівність (9) з урахуванням (11) і виконанням деяких математичних операцій набуде вигляду:

$$K_\eta = \frac{\tau_p \cdot \varepsilon_i \cdot (T_S - T_0)}{A_{різ} T_S} \quad (12)$$

Таким чином, КПД процесу механічного оброблення показує, яка частка від загальної потужності йде безпосередньо на руйнування матеріалу деталі.

Рівняння (5) з деякими математичними перетвореннями прийме вигляд:

$$K_\eta = 1 - \delta_{2Bд.} - \delta_{2Bз.г.} - \delta_{2Bп.з.} - \delta_{3Bп.г.} - \delta_{3Bст.} - \delta_{3Bп.ст.} - \sum \delta_{qB} \quad (13)$$

З рівняння (13) можна зробити висновок, що за постійної потужності оброблення ККД тим вищий, чим менша частина витрачається на зміцнення та розігрів поверхневого шару заготовки.

Рис 2. Структурна модель трансформації енергії в зоні різання

Аналіз рівнянь (9) – (13) показує, що для досягнення максимальної продуктивності процесу механічного оброблення необхідно прагнути до збільшення ККД, який в свою чергу призводить до підвищення продуктивності $\dot{Y}$ і зменшення машинного часу оброблення конкретної деталі. Збільшення ККД за постійної продуктивності веде до зниження потужності (енергетичних затрат), сили різання і температури в зоні механічного оброблення, що підвищує стійкість інструменту, точність оброблюваних деталей, а також ймовірність утворення припіків та мікротріщин на оброблюваних поверхнях. Підвищити ж продуктивність за $\dot{W} = const$, можна за рахунок збільшення початкового рівня внутрішньої енергії в шарі матеріалу, що зрізується. Досягнути цього можна двома шляхами: 1) підвищенням початкового рівня пружної енергії $U_{П0}$ (попереднім пластичним деформуванням, електрохімічним розчиненням, шару що зрізується, накладанням ультразвукових коливань) або 2) збільшенням початкового рівня теплової складової внутрішньої енергії U_{T0}

(нагрівання шару металу, що зрізується плазмотроном, лазером, електроконтактним методом тощо) [3].

Висновок

Викладений енергетичний підхід до оцінки та прогнозування ефективності процесів механічного оброблення металів дозволяє аналітично пов'язати продуктивність процесу з параметрами, що характеризують режими та умови оброблення, а також з енергетичними характеристиками, що відображають властивості оброблюваного матеріалу. Такий метод оцінки процесів механічного оброблення дозволяє оцінити ефективність оброблення, не розглядаючи детально структуру та складну природу механізмів і фізико-хімічних явищ, що відбуваються в реальних матеріалах під час їх деформування та руйнування в процесі механічного оброблення.

Список літератури:

1. Грановский Г.И. Резание металлов: учебник для вузов / Г.И. Грановский, В.Г. Грановский. — М.: Высш. шк., 1985. — 304 с., ил.

2. Коршунов В. Я. Обеспечение качества поверхностного слоя деталей на основе прогнозирования рациональных структурно-энергетических параметров материала и технологических условий механической обработки: дис. … д-ра техн. наук: спец. 05.22.07 / В. Я. Коршунов Азово-Черноморская государственная агроинженерная академия. — Зерноград, 2006. — 321 с.

3. Приступа С. О. Характеристика оброблюваності металів різанням в контексті оптимізації енерговитрат в процесі механічного оброблення / С.О. Приступа // Технологічні комплекси. — 2013. — №2(8). — С. 160-163.

4. Старков В.К. Физика и оптимизация резания металлов / В.К. Старков. — М.: Машиностроение, 2009. — 640 с.

Надійшла до редакції 20.02.2014

С.О. Приступа, С.А. Мороз

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО БАЛАНСА ЗОНЫ РЕЗАНИЯ В ПРОЦЕССЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

В статье проведены теоретические исследования, касающиеся формирования энергопотерь при механической обработки рабочих поверхностей деталей машин. Проанализирован энергетический баланс зоны резания. Составлена система дифференциальных уравнений, описывающих физические и термодинамические преобразования энергии, в очаге механической обработки. Предложены показатели энергоэффективности, позволяющие оценить КПД процесса резания и удобного сравнения альтернативных маршрутов обработки и параметров отдельных операций. Сделанные выводы содержат рекомендации, которые позволяют достичь максимальной производительности процесса механической обработки.

Ключевые слова: *деформация, поверхность, резка, тепло, энергетический баланс.*

S. Prystupa, S. Moroz

ENERGY BALANCE OF CUTTING ZONE IN THE PROCESS OF MACHINE PARTS MECHANICAL TREATMENT

The article provides theoretical studies concerning energy consumption during machining of working surfaces of machine parts. Energy balance of the cutting area is analyzed. A system of differential equations that describe physical and thermodynamic energy conversion in cell machining is given. The indexes of energy efficiency, which allow evaluating the efficiency of the cutting process and easy comparison of alternative routes and processing parameters of individual operations, are provided. Conclusions include recommendations that allow you maximizing the productivity of machining process.

Keywords: *deformation, surface, cutting, heat, energy balance.*