

Российской Федерации). 3. Рейки звичайні для залізниць широкої колії. Загальні технічні умови. (Рельсы обычные для железных дорог широкой колеи. Общие технические условия) ДСТУ 4344:2004 – [Дата введення в действие 2005-10-01]. – К.: Держспоживстандарт України 2004. – IX, 28 с. – (Национальный стандарт Украины). 4. Рейки залізничні. Метод оцінки макроструктури. (Рельсы железнодорожные. Метод оценки макроструктуры) ДСТУ 3123-95 – [Дата введення в действие 01.07.1996]. – К.: Держспоживстандарт України. – 106 с. – (Национальный стандарт Украины).

Bibliography (transliterated): 1. Railway applications – Track – Rail – Part 1: Vignole railway rails 46 kgm and above. (Zheleznye dorogi – Put' – Rel'sy. Chast' 1: Rel'sy Vin'olja 46 kgm i bolee) EN 13674-1:2011 – [Data vvedeniya v dejstvie 2011-02-09]. 2. Rel'sy zheleznodorozhnye. Obshhie tehniczeskie uslovija GOST R 51685-2013 – [Data vvedeniya v dejstvie 01.07.2014] – 102 p. – (Nacional'nyj standart Rossijskoj Federacii). 3. Rejky zvyčajni dlja zaliznyč' šyrokoj kolii'. Zagal'ni tehnični umovy. (Rel'sy obyčnye dlja zheleznyh dorog širokoj kolei. Obshhie tehniczeskie uslovija) DSTU 4344:2004 – [Data vvedeniya v dejstvie 2005-10-01]. – Kyev: Derzhspozhivstandart Ukraini 2004. – IX, 28 p. – (Nacional'nyj standart Ukrainy). 4. Rejky zaliznyčni. Metod ocenki makrostruktury. (Rel'sy zheleznodorozhnye. Metod ocenki makrostruktury) DSTU 3123-95 – [Data vvedeniya v dejstvie 01.07.1996]. – Kyev: Derzhspozhivstandart Ukraini. – 106 p. – (Nacional'nyj standart Ukrainy).

Поступила (received) 10.11.2014

УДК 621.923

И. А. РЯБЕНКОВ, канд. техн. наук, ГП ХМЗ «ФЭД», Харьков;
Ф. В. НОВИКОВ, докт. техн. наук, ХНЭУ, Харьков

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭНЕРГОЕМКОСТИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСЛОВИЙ ЕЕ УМЕНЬШЕНИЯ

В работе получены аналитические зависимости для определения энергоемкости обработки при резании лезвийными и абразивными инструментами. Установлено, что при шлифовании энергоемкость обработки всегда больше, чем при резании лезвийными инструментами в связи с отрицательными передними углами режущих абразивных зерен и трением связки круга с обрабатываемым материалом. Показано, что на энергоемкость обработки существенное влияние оказывает радиальная составляющая силы резания. Полученные теоретические решения использованы при выборе оптимальных методов механической обработки деталей машин.

Ключевые слова: механическая обработка, шлифование, точение, обрабатываемый материал, энергоемкость обработки, сила резания, производительность обработки, единичное зерно.

Введение. Создание конкурентоспособной машиностроительной продукции требует обеспечения условий высококачественной обработки деталей машин за счет существенного снижения силовой и тепловой напряженности процесса резания лезвийными и абразивными инструментами. Это достигается применением прогрессивных конструкций инструментов и оптимальных условий обработки, снижающих интенсивность трения в зоне резания и обеспечивающих высокую остроту режущих кромок инструмента, в результате чего снижается энергоемкость обработки – обобщенный показатель

процессов механической обработки, определяющий в конечном итоге все технико-экономические показатели обработки. В связи с этим важно знать технологические закономерности изменения энергоемкости обработки с целью определения возможностей ее уменьшения, что требует проведения теоретических исследований в этом направлении.

Анализ последних достижений и литературы. Энергоемкость обработки, равная отношению работы резания к объему снятого материала, является важнейшим параметром процесса резания. Вместе с тем, его исследованию в научно-технической литературе уделено мало внимания. Кроме того, известны в основном работы, посвященные экспериментальному исследованию энергоемкости обработки, и фактически отсутствуют работы, раскрывающие физическую сущность этой величины и, тем более, посвященные ее аналитическому описанию и анализу. В учебниках по резанию материалов [1, 2] и технологии машиностроения [3] также фактически отсутствуют сведения о закономерностях изменения этого важнейшего для механической обработки параметра. Однако, как показывает практика, выбор наиболее эффективных методов обработки конкретных поверхностей деталей (лезвийной или абразивной обработки) производится по критерию наименьшей энергоемкости. Поэтому знание количественных пределов изменения этого параметра для различных методов обработки имеет большое теоретическое и практическое значение, позволяет обосновать условия повышения производительности, качества и других технико-экономических показателей обработки. В особой мере это относится к изготовлению высокоточных деталей авиационного назначения. В связи с этим, в настоящей работе решается актуальная для технологии машиностроения задача теоретического определения энергоемкости обработки и условий ее уменьшения при выборе наиболее эффективных методов механической обработки.

Цель работы, постановка проблемы. Целью работы является аналитическое описание и общий анализ энергоемкости механической обработки применительно к процессам резания лезвийными и абразивными инструментами. В связи с этим в работе решается проблема определения условий уменьшения энергоемкости механической обработки.

Материалы исследований. В общем виде энергоемкость механической обработки \mathcal{E} может быть описана зависимостью:

$$\mathcal{E} = \frac{A}{\mathcal{Q}} = \frac{N \cdot \tau}{Q \cdot \tau} = \frac{N}{Q}, \quad (1)$$

где $A = N \cdot \tau$ – работа резания, Дж;

N – мощность резания, Вт;

τ – время обработки, с;

$\mathcal{Q} = Q \cdot \tau$ – объем снятого материала, м³;

Q – производительность обработки, м³/с.

В свою очередь [4]:

$$N = P_z \cdot V = \sigma \cdot F \cdot V, \quad (2)$$

где $P_z = \sigma \cdot F$ – тангенциальная составляющая силы резания, Н;

σ – условное напряжение резания, Н/м²;

$F = a \cdot b = S \cdot t$ – площадь поперечного сечения среза (при точении), м²;

a, b – соответственно толщина и ширина среза, м;

S – подача, м/об;

t – глубина резания, м;

V – скорость резания, м/с.

Производительность обработки Q выражается зависимостью

$$Q = S \cdot t \cdot V. \quad (3)$$

С учетом зависимостей (2) и (3) энергоемкость обработки \mathcal{E} равна

$$\mathcal{E} = \frac{P_z \cdot V}{S \cdot t \cdot V} = \frac{\sigma \cdot S \cdot t}{S \cdot t} = \sigma. \quad (4)$$

Как видно, энергоемкость обработки \mathcal{E} численно равна условному напряжению резания σ . Размерность величины \mathcal{E} с учетом Дж=Н·м принимает вид размерности условного напряжения резания σ , а именно Н/м². Из этого можно заключить, что с физической точки зрения энергоемкость механической обработки \mathcal{E} обусловлена интенсивностью силовой напряженности процесса резания, определяемой условным напряжением резания σ . Причем, данная закономерность справедлива для процессов как лезвийной, так и абразивной обработки. Так, например, при шлифовании

$$N = P_z \cdot V_{кр}, \quad (5)$$

где $V_{кр}$ – скорость круга, м/с.

Если представить снятый при шлифовании за время τ материал в виде ленты длиной $l = V_{кр} \cdot \tau$ и площадью поперечного сечения $S_{сум}$, то объем снятого материала выразится

$$V = S_{сум} l = S_{сум} V_{кр} \tau. \quad (6)$$

По физической сути $S_{\text{сум}}$ определяет суммарную мгновенную площадь поперечного сечения среза всеми одновременно работающими зернами шлифовального круга, м^2 . Соответственно производительность обработки Q определится

$$Q = S_{\text{сум}} \cdot V_{\text{кр}}. \quad (7)$$

Подставляя зависимости (5) и (7) в (1), имеем

$$\mathcal{E} = \frac{P_z \cdot V_{\text{кр}}}{S_{\text{сум}} \cdot V_{\text{кр}}} = \frac{P_z}{S_{\text{сум}}} = \sigma. \quad (8)$$

Очевидно, отношение тангенциальной составляющей силы резания P_z и $S_{\text{сум}}$ равно условному напряжению резания σ . Следовательно, и при шлифовании энергоёмкость обработки \mathcal{E} численно равна условному напряжению резания σ . Таким образом, исследование и анализ энергоёмкости обработки \mathcal{E} к определению условного напряжения резания σ , которое при шлифовании и при микрорезании единичным зерном будут принципиально отличаться.

Результаты исследований. Как показано в работе [5], в связи с интенсивным трением связки круга с обрабатываемым материалом значения σ при шлифовании больше, чем при микрорезании единичным абразивным зерном. В зависимости от условий обработки значения σ могут отличаться от 10 до 100 раз. Примерно такое же отличие значений σ имеет место при сравнении процессов шлифования и точения, т.е. при шлифовании условное напряжение резания σ значительно больше, чем при лезвийной обработке. В работе [6] показано, что в общем случае условное напряжение резания σ описывается аналитической зависимостью

$$\sigma = \frac{\sigma_{\text{сж}}}{K_{\text{рез}}} \cdot \left(1 + \sqrt{1 + K_{\text{рез}}^2}\right), \quad (9)$$

где $\sigma_{\text{сж}}$ – предел прочности на сжатие обрабатываемого материала, Н/м^2 ;

$$K_{\text{рез}} = P_z / P_y;$$

P_z , P_y – тангенциальная и радиальная составляющие силы резания, Н.

Исходя из приведенной зависимости (9), уменьшить σ можно однозначно увеличением коэффициента $K_{\text{рез}}$, который при лезвийной обработке определяется $K_{\text{рез}} = \text{ctg}(\psi - \gamma)$, а при шлифовании – $K_{\text{рез}} = \text{ctg}(\psi + \gamma)$, где ψ – условный угол трения на передней поверхности резца ($\text{tg}\psi = f$ – коэффициент

трения); γ – передний угол (положительный для резца и отрицательный для абразивного зерна).

Очевидно, коэффициент $K_{рез}$ при точении (лезвийной обработке) больше, чем при шлифовании. Следовательно, будет меньше условное напряжение резания σ , описываемое зависимостью (9). Подтверждением тому являются известные экспериментальные данные, согласно которым коэффициент $K_{рез}$ при лезвийной обработке всегда больше, чем при шлифовании (микрорезании абразивными зернами). Так, установлено, что при шлифовании $K_{рез} < 1$, тогда как при точении $K_{рез} \geq 1$ (изменяется в пределах 1...8). Очевидно, при таких больших значениях $K_{рез}$, достигаемых при точении, зависимость (9) может быть упрощена: $\sigma \approx \sigma_{сж}$. В итоге установлено, что условное напряжение резания σ стремится принять значение, равное $\sigma_{сж}$. В этом случае процесс резания по физической сути идентичен процессу разрушения при сжатию прямолинейного образца.

При шлифовании (микрорезании абразивными зернами), когда $K_{рез} < 1$, зависимость (9) также может быть упрощена и сведена к виду:

$$\sigma = \frac{\sigma_{сж}}{K_{рез}}. \quad (10)$$

В этом случае условное напряжение резания σ принимает значения, превышающие предел прочности на сжатие обрабатываемого материала $\sigma_{сж}$. Причем, при небольших значениях $K_{рез}$, например, при $K_{рез} = 0,1$ (что имеет место на практике), условное напряжение резания σ принимает весьма большие значения, существенно превышающие $\sigma_{сж}$. С физической точки зрения это связано с присутствием не только тангенциальной P_z , но и радиальной P_y составляющих силы резания. Полученные теоретические решения прошли широкую апробацию и использованы при разработке и внедрении на ГП Харьковский машиностроительный завод «ФЭД» эффективных технологий механической обработки высокоточных деталей авиационного назначения [7].

Выводы. Приведены аналитические зависимости для определения энергоемкости обработки при резании лезвийными и абразивными инструментами. Теоретически показано, что при шлифовании энергоемкость обработки всегда больше, чем при точении в связи с отрицательными передними углами режущих абразивных зерен и трением связки круга с обрабатываемым материалом. Установлено, что на энергоемкость обработки

существенное влияние оказывает радиальная составляющая силы резания. Поэтому основным условием уменьшения энергоёмкости необходимо рассматривать в первую очередь уменьшение радиальной составляющей силы резания. Полученные теоретические решения могут быть использованы при выборе оптимальных методов механической обработки деталей машин.

Список литературы: 1. Бобров В.Ф. Основы теории резания металлов / В.Ф. Бобров. – М.: Машиностроение, 1975. – 343 с. 2. Грановский Г.И. Резание металлов: учебник / Г.И. Грановский, В.Г. Грановский. – М.: Высшая школа, 1985. – 304 с. 3. Маталин А.А. Технология машиностроения: учебник / А.А. Маталин. – Л.: Машиностроение, 1985. – 496 с. 4. Новиков Ф.В. Теорія високоякісної обробки деталей машин: монографія / Ф.В. Новиков. – Х. : Вид. ХНЕУ, 2013. – 384 с. 5. Новиков Г.В. Элементы теории энергоёмкости процессов механической обработки / Г.В. Новиков // Високі технології в машинобудуванні: Зб. наук. пр. – Харків: НТУ«ХПІ», 2006. – Вип. 2 (13). – С. 74–86. 6. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения / Под общ. ред. Ф.В. Новикова и А.В. Якимова. В десяти томах. – Т. 1. «Механика резания материалов» – Одесса: ОНПУ, 2002. – 580 с. 7. Новиков Ф.В. Повышение эффективности механической обработки отверстий в деталях гидравлической аппаратуры / Ф.В. Новиков, В.И. Полянский, И.А. Рябенков и др. // Новые и нетрадиционные технологии в ресурсо- и энергосбережении: материалы научн.-техн. конф., 19-22 сентября 2011 г., Одесса. – Киев: АТМ України, 2011. – С. 156–159.

Bibliography (transliterated): 1. Bobrov V.F. Osnovy teorii rezaniya metallov V.F. Bobrov. – Moscow: Mashinostroenie, 1975. – 343 p. 2. Granovskiy G.I. Rezanie metalov: uchebnyy G.I. Granovskiy, V.G. Granovskiy. – Moscow: Vysshaya shkola, 1985. – 304 p. 3. Matalin A.A. Tekhnologiya mashinostroeniya: uchebnyy A.A. Matalin. – Leningrad: Mashinostroenie, 1985. – 496 p. 4. Novikov F.V. Teoriya vysokoiakisnoi obrobky detalei mashyn: monografiya F.V. Novikov. – Kharkiv: Vyd. KhNEU, 2013. – 384 p. 5. Novikov G.V. Elementy teorii energoyemkosti protsessov mekhanicheskoy obrabotki G.V. Novikov Vysoki tekhnologii v mashynobuduvanni: Zb. nauk. prats – Kharkiv: NTU «KhPI», 2006. – Vyp. 2(13). – P. 74–86. 6. Fiziko-matematicheskaya teoriya protsessov obrabotki materialov i tekhnologii mashinostroeniya Pod obsh. red. F.V. Novikova i A.V. Yakimova. V 10 tomakh. – T. 1. «Mekhanika rezaniya materialov» – Odessa: ONPU, 2002. – 580 p. 7. Novikov F.V. Povyshenie effektivnosti mekhanicheskoy obrabotki otverstiy v detalyakh gidravlicheskoj apparatury F.V. Novikov, V.I. Polyanskiy, I.A. Ryabenkov i dr. Novye i netraditsionnye tekhnologii v resurso- i energosberezhenii: materialy nauchn.-tekhn. konf., 19–22 sentyabrya 2011 g., Odessa. – Kiev: ATM Ukrainy, 2011. – P. 156–159.

Надійшла до редколегії 23.10.2014р.

УДК 621.762.4

Д. В. САВЕЛОВ, канд. техн. наук, доц., КрНУ им. М. Остроградского, Кременчуг

ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИКИ ПРОЦЕССА ПРЕССОВАНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКОГО ПОРОШКА НА ВИБРОСТОЛЕ С «ЖЕСТКОЙ» МАТРИЦЕЙ И ОДНОВРЕМЕННЫМ СТАТИЧЕСКИМ ПРИГРУЖЕНИЕМ

В статье предложена математическая модель динамической системы «вибростол – металлический порошок – пригружающий пуансон», в которой металлический порошок представлен в виде системы