

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»

ВІСНИК

НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ «ХПІ»

Серія: Технології в машинобудуванні

№ 5 (1177) 2016

Збірник наукових праць

Видання засноване у 1961 р.

Харків
НТУ «ХПІ», 2016

Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Серія: Технології в машинобудуванні. – Х. : НТУ «ХПІ». – 2016. – № 5 (1177). – 118 с.

Державне видання

Свідоцтво Держкомітету з інформаційної політики України

КВ № 5256 від 2 липня 2001 року

Мова статей – українська, російська, англійська.

Вісник Національного технічного університету «ХПІ» внесено до «Переліку наукових фахових видань України, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук», затвердженого наказом МОН України від 21.12.2015 № 1328 «Про затвердження рішень Атестаційної колегії Міністерства щодо діяльності спеціалізованих вчених рад від 15 грудня 2015 року»

Координаційна рада:

Л. Л. ТОВАЖНЯНСЬКИЙ, д-р техн. наук, проф. (**голова**);

К. О. ГОРБУНОВ, канд. техн. наук, доц. (**секретар**);

А. П. МАРЧЕНКО, д-р техн. наук, проф.; Є. І. СОКОЛ, д-р техн. наук, чл.-кор. НАН України;

Є. Є. АЛЕКСАНДРОВ, д-р техн. наук, проф.; А. В. БОЙКО, д-р техн. наук, проф.;

Ф. Ф. ГЛАДКИЙ, д-р техн. наук, проф.; М. Д. ГОДЛЕВСЬКИЙ, д-р техн. наук, проф.;

А. І. ГРАБЧЕНКО, д-р техн. наук, проф.; В. Г. ДАНЬКО, д-р техн. наук, проф.;

В. Д. ДМИТРИЄНКО, д-р техн. наук, проф.; І. Ф. ДОМНІН, д-р техн. наук, проф.;

В. В. СПІФАНОВ, канд. техн. наук, проф.; Ю. І. ЗАЙЦЕВ, канд. техн. наук, проф.;

П. О. КАЧАНОВ, д-р техн. наук, проф.; В. Б. КЛЕПІКОВ, д-р техн. наук, проф.;

С. І. КОНДРАШОВ, д-р техн. наук, проф.; М. А. ТКАЧУК, д-р техн. наук, проф.;

В. І. КРАВЧЕНКО, д-р техн. наук, проф.; Г. В. ЛІСАЧУК, д-р техн. наук, проф.;

О. К. МОРАЧКОВСЬКИЙ, д-р техн. наук, проф.; В. І. НІКОЛАЄНКО, канд. іст. наук, проф.;

П. Г. ПЕРЕРВА, д-р екон. наук, проф.; В. А. ПУЛЯЄВ, д-р техн. наук, проф.;

М. І. РИЩЕНКО, д-р техн. наук, проф.; В. Б. САМОРОДОВ, д-р техн. наук, проф.;

Г. М. СУЧКОВ, д-р техн. наук, проф.; Ю. В. ТИМОФІЄВ, д-р техн. наук, проф..

Редакційна колегія серії:

Відповідальний редактор: Ю.В. Тимофієв, д-р техн. наук, проф.

Заст. відповідального редактора: О. О. Клочко, д-р техн. наук, проф.

Відповідальний секретар: Є. В. Басова, канд. техн. наук, доц.

Члени редколегії: С.С. Добротворський, д-р техн. наук, проф.; О.А. Мельніченко, д-р

техн. наук, проф.; О.Я. Мовшович, д-р техн. наук, проф.; О.А. Пермяков, д-р техн. наук,

проф.; Ю.А. Сизий, д-р техн. наук, проф.; Д.В. Сталінський, д-р техн. наук.;

М.С. Степанов, д-р техн. наук, проф.; В.А. Фадєєв, д-р техн. наук, проф.;

В.Д. Хіцан, д-р техн. наук, проф.; О.М. Шелковий, д-р техн. наук, проф.

*У квітні 2013 р. Вісник Національного технічного університету «ХПІ», серія «Технології в машинобудуванні», включений у довідник періодичних видань бази даних **Ulrich's Periodicals Directory (New Jersey, USA)**.*

Рекомендовано до друку Вченою радою НТУ «ХПІ».

Протокол №6 від 08«липня» 2016 р.

© Національний технічний університет «ХПІ», 2016

NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY
«KHARKIV POLYTECHNIC INSTITUTE»

BULLETIN
OF THE NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY
«KHARKIV POLYTECHNIC INSTITUTE»

Series: «Technologies in mechanical engineering»

№ 5 (1177) 2016

Collected Works

The publication was founded in 1961

Kharkov
NTU «KhPI»

Collected Works. Series: Technologies in mechanical engineering. – Kharkiv: NTU «KhPI» – 2016. – № 5 (1177). – 118 p.

State edition

Certificate of State Committee of Ukraine for Information Policy KB № 5256 from July 2, 2001

The collection is published in Ukrainian and Russian.

Bulletin of National Technical University «KhPI» included in the «List of scientific professional editions of Ukraine, which can be published results of dissertations for the degree of doctor and candidate of sciences», approved by order of the (MES of Ukraine) of 21.12. 2015 № 1328 «On approval decisions Certifying Board of the Ministry for academic councils of 28 December 2015»

Coordinating Board:

L. L. Tovazhnyansky, Dr. Tech. Sci., Prof. (**chief**);
K. A. Gorbunov, PhD. Tech. Sci., Docent. (**secretary**);
A. P. Marchenko, Dr. Tech. Sci., Prof.; Ie.I. Sokol, member NAS of Ukraine, Dr. Tech. Sci., Prof.;
Ie. Ie. Aleksandrov, Dr. Tech. Sci., Prof.; A. V. Boiko, Dr. Tech. Sci., Prof.;
F. F. Hladkyi, Dr. Tech. Sci., Prof.; M. D. Hodlevskyi, Dr. Tech. Sci., Prof.;
A. I. Hrabchenko, Dr. Tech. Sci., Prof. V. H. Danko, Dr. Tech. Sci., Prof.;
V. D. Dmytryienko, Dr. Tech. Sci., Prof.; I. F. Domnin, Dr. Tech. Sci., Prof.;
V. V. Yepifanov, PhD. Tech. Sci., Prof.; Iu. I. Zaitsev Dr. Tech. Sci., Prof.;
P. O. Kachanov, Dr. Tech. Sci., Prof.; V. B. Klepikov, Dr. Tech. Sci., Prof.;
S. I. Kondrashov, Dr. Tech. Sci., Prof.; M. A. Tkachuk Dr. Tech. Sci., Prof.;
V. I. Kravchenko, Dr. Tech. Sci., Prof.; H. V. Lisachuk, Dr. Tech. Sci., Prof.;
O. K. Morachkovskyi, Dr. Tech. Sci., Prof.; V. I. Nikolaienko, Dr. Tech. Sci., Prof.;
P. H. Pererva, Dr. Tech. Sci., Prof.; V. A. Puliaiev, Dr. Tech. Sci., Prof.;
M. I. Ryshchenko, Dr. Tech. Sci., Prof.; V. B. Samorodov, Dr. Tech. Sci., Prof.;
H. M. Suchkov, Dr. Tech. Sci., Prof.; Iu. V. Tymofeev Dr. Tech. Sci., Prof.

Editorial Board:

Editor: Iu.V. Tymofeev, Dr. Tech. Sci., Prof.

Deputy editor: A. A. Klochko, Dr. Tech. Sci., Prof.

Secretary: Ie. V. Basova, PhD. Tech. Sci., Docent.

Members of the editorial board: S.S. Dobrotvorskyi, Dr. Tech. Sci., Prof.; O.A. Melnichenko, Dr. Tech. Sci., Prof.; A.Ia. Movshovych, Dr. Tech. Sci., Prof.; A.A. Permiakov, Dr. Tech. Sci., Prof.; Iu.A. Syzyi, Dr. Tech. Sci., Prof.; D.V. Stalinskyi, Dr. Tech. Sci.; M.S. Stepanov, Dr. Tech. Sci., Prof.; V.A. Fadieiev, Dr. Tech. Sci., Prof.; V.D. Khitsan Dr. Tech. Sci., Prof.; A.N. Shelkovyi, Dr. Tech. Sci., Prof.

*In April 2013 Bulletin of National Technical University «KhPI» series «Technologies in mechanical engineering» included in the directory database of periodicals **Ulrich's Periodicals Directory (New Jersey, USA)**.*

Recommended for publication by the Academic Council of NTU «KhPI».
Protocol No 6 of July 01, 2016

УДК 621.865.6

Г.И. КОСТЮК, О.О. БРУЯКА, О.М. МЕЛКОЗЕРОВА**ПЕРСПЕКТИВЫ ПОЛУЧЕНИЯ НАНОСТРУКТУР НА ТВЕРДОМ СПЛАВЕ ВК4 ЗА СЧЕТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ФЕМТО- И ПИКОСЕКУНДНЫХ ЛАЗЕРОВ**

Наведено результати теоретичного дослідження можливості отримання наноструктур (НС) на твердому сплаві ВК4 за рахунок оброблення фемто- і пікосекундними лазерами. Рішенням спільної задачі теплопровідності та термопружності в зоні дії іонізуючого випромінювання (ІВ) отримано залежності максимальних температур, швидкості росту температури, температурних напружень від щільності теплового потоку ($q = 10^{12} - 10^{16}$ Вт/м²) і за часів його дії ($\tau = 10^{12} - 10^{16}$ с). Подано залежності об'єму наноструктури від максимальної та мінімальної глибини залягання для твердого сплаву ВК4 при різних розмірах плями ($5 \cdot 10^7, 10^6$ м). Це дозволило, з урахуванням прийнятих критеріїв одержати нанозерна, отримати просторову картину залежності об'єму зерна від щільності теплового потоку і часу його дії. Отримано технологічні параметри для отримання нанозерна в твердому сплаві при дії ІВ.

Ключові слова: фемто- і піко секундні лазери, твердий сплав, об'єм нанозерна, глибина залягання нанозерна.

Представлены результаты теоретического исследования возможности получения наноструктур (НС) на твердом сплаве ВК4 за счет обработки фемто- и пикосекундными лазерами. Решением совместной задачи теплопроводности и термоупругости в зоне действия ионизирующего излучения (ИИ) получены зависимости максимальных температур, скорости роста температуры, температурных напряжений от плотности теплового потока ($q = 10^{12} - 10^{16}$ Вт/м²) и при временах его действия ($\tau = 10^{12} - 10^{16}$ с). Приведены зависимости объема наноструктуры от максимальной и минимальной глубины залегания для твердого сплава ВК4 при различных размерах пятна ($5 \cdot 10^7, 10^6$ м). Это позволило с учетом принятых критериев образования зерна получить пространственную картину зависимости объема зерна от плотности теплового потока и времени его действия. Найдены технологические параметры для образования нанозерна в твердом сплаве при действии ИИ.

Ключевые слова: фемто- и пикосекундные лазеры, твердый сплав, объем нанозерна, глубина залегания нанозерна

Presents the results of theoretical research opportunities nanostructures (NS) on the carbide VC4 by treatment with femtosecond and picosecond lasers. Decision of the joint problem of heat conduction and thermoelasticity in ionizing radiation zone (IR) obtained according to the maximum temperature, the temperature of the growth rate, temperature stress on the heat flux density ($q = 10^{12} - 10^{16}$, W/m²), and at times his actions ($\tau = 10^{12} - 10^{16}$ s). The dependences of the volume of the nanostructure of the maximum and minimum depth for carbide VC4 with different spot sizes ($5 \cdot 10^7, 10^6$ m). This allowed, based on the criteria adopted by the grain formation, to get a picture of the spatial dependence of the grain volume of the heat flux density and the time of its action. Obtain technological parameters for nanograin solid alloy under the influence of IR.

Keywords: femtosecond and picosecond lasers, solid carbide, nanograin volume, depth of nanograin.

Введение. В настоящее время широко начинают использоваться лазеры с ультракороткими импульсами. К таким лазерам относятся фемтосекундные лазеры. Применяются такие типы фемтосекундных лазеров:

- твердотельные лазеры на объёмных кристаллах, обеспечивающие длительность импульса от 5 до 30 фс со средней мощностью 0,1...1 Вт (лазеры при допировании неодимом и иттербием), тогда как титан-сапфировые лазеры могут использоваться для создания импульса менее 10 фс (иногда 5 фс). Частота следования импульса от 50 до 500 МГц (миниатюрные лазеры позволяют получить десятки ГГц);

- волоконные лазеры: длительностью от 50 до 500 фс и частотой 10...100 МГц при мощности в несколько милливат;

- лазеры на красителях: позволяют получать длительность импульсов до 10 фс;

- полупроводниковые лазеры: могут реализовать фемтосекундную длительность и высокую частоту следования, высокую среднюю мощность при малых энергиях импульса.

Существуют также лазеры с фемтосекундным диапазоном: лазеры на центрах окраски и лазеры на свободных электронах (последние могут излучать фемтосекундные импульсы даже в рентгеновском диапазоне волн).

Сейчас уже применяются фемтосекундные лазеры для получения поверхностей, не подвергающихся обледенению, повышения адгезионных и механических свойств, уменьшения коэффициента трения в

4–5 раз – для сухого трения и в 2 раза – для жидкостного (машинное масло). Очевидно, все эти свойства связаны с образованием наноструктур на поверхности деталей, а значит, есть перспективы расширения возможности применения фемтосекундных лазеров для получения наноструктур с новыми свойствами. Следует ожидать повышения физико-механических характеристик, а именно: микротвёрдости, предела текучести, предела прочности (предположительно модуль упругости будет снижаться), а также усталостной прочности, способности выдерживать ударные нагрузки.

Всё изложенное выше говорит о перспективности применения фемтосекундных лазеров для получения наноструктур, а значит, необходимо оценить технологические параметры светолучевых потоков, при которых есть вероятность получения наноструктур.

1. Состояние вопроса

В настоящее время ещё недостаточно теоретических разработок, позволяющих с высокой достоверностью определить физические процессы, реализующиеся при действии излучения лазера с фемтосекундным диапазоном времен действия. Всё это очевидно связано с тем, что при малых временах действия лазерная энергия сначала тратится на термоупругое и термопластическое деформирование, а затем при релаксации напряжения эта энергия преобразуется в тепловую, что изменяет характер теплообмена, а, следовательно, влияет на результат расчёта полей температур и напряжений в зоне действия лазерного луча. Несмотря на то, что существует ряд теоретических моделей, которые описывают действие концентрирован-

ных потоков энергии на материалы [1–8], аналогичных исследований для случая действия лазерного излучения (ЛИ) ультрамалой длительности нет. В настоящей статье, проведя учёт физических явлений, реализующихся в этом случае, мы построили модель действия лазерного излучения сверхмалой длительности на конструкционные материалы и материалы для режущих инструментов. Исследования действия лазерного излучения малой длительности на твёрдые сплавы являются актуальными, так как характер их влияния на структуру и физико-механические характеристики материала режущего инструмента (РИ) не изучен.

Настоящая статья посвящена исследованию действия лазерного излучения малой длительности, включая и фемтосекундное, на твёрдый сплав ВК4, что позволит найти технологические режимы, необходимые для образования наноструктур в поверхностном слое РИ.

2. Физика процессов при действии лазерного излучения на конструкционные материалы

2.1. Особенности описания источника тепла при действии лазера на непрозрачные материалы

В технологических целях используют фокусированный источник когерентного излучения, плотность теплового потока которого распределена в фокальной плоскости таким образом:

$$q(r) = q_0 \left[\frac{2I_1(Br)}{(Br)^2} \right]^2, \quad (1)$$

где $I_1(Br)$ – функция Бесселя первого рода первого порядка;

$$B = I_1 D / \lambda F. \quad (2)$$

Здесь D – диаметр линзы; λ – длина волны излучения; F – фокусное расстояние; q_0 – интенсивность в центре пятна, рассчитываемая по формуле

$$q_0 = \frac{I_1 D^2}{4\lambda^2 F^2} P_0, \quad (3)$$

где P_0 – мощность излучения, поглощенная материалом.

Плотность теплового потока может быть получена от произведения функции, зависящей только от времени, и функции координат поверхности:

$$q_n(r\tau) = A\phi(\tau)q(r). \quad (4)$$

Здесь A – поглощательная способность обрабатываемого материала, зависящая в общем случае как от состояния поверхности (степени обработки, шероховатости), так и от ее температуры; $q(r)$ – пространственное распределение мощности излучения, рассчитываемое по формуле (1) с учетом (2) и (3); $\phi(\tau)$ – описывает временную структуру импульса; например, для импульса лазера, работающего в пучковом режиме с упорядоченной генерацией, функция может быть представлена в виде

$$\phi(\tau) = (1 - \cos \omega\tau). \quad (5)$$

Для огибающей пичков справедливо выражение

$$\phi(\tau) = \tau^n \exp(br^m), \quad (6)$$

где n и m – некоторые числа (целые или дробные).

Модулирование добротности лазера позволяет получить моноимпульсы излучения длительностью $\approx 10^{-8}$ с, временная структура которых может быть описана функцией, близкой к треугольной, крутизна переднего фронта может быть отлична от заднего.

Падающий на поверхность материала световой поток частично отражается, а остальная часть его проходит внутрь объема тела и поглощается. Внутри и на поверхности тела действует тепловой источник, распределенный в пространстве и времени.

Плотность поглощенного теплового потока практически для всех технологических применений лазера изменяется внутри объема материала по закону Бугера

$$q_V(z) = q_{V0} (1 - R)e^{-\alpha z}, \quad (7)$$

где $q_V(z)$, q_{V0} – соответственно объемные плотности теплового потока излучения на расстоянии z и на поверхности $x = 0$, Вт/см³,

$$q_{V0} = \frac{q_n(r, \tau)}{0,1\delta}. \quad (8)$$

Здесь $\delta \approx 10^{-4} \dots 10^{-5}$ м – слой, в котором световой поток поглощается при взаимодействии с электронами проводимости; R и α – соответственно отражательная способность и коэффициент поглощения света.

2.2. Модель взаимодействия светолучевых потоков и конструкционных материалов

С учетом действия объемного источника и облучения, объемная плотность которого рассчитывается по выражению (7) с учетом (8), и поверхностного источника тепла с плотностью теплового потока по выражению (4) с учетом (5), (6) решаются уравнения теплопроводности.

2.2.1. Баланс тепла в элементарном объеме детали

Баланс тепла представлен в выражении

$$\begin{aligned} C[T]\gamma[T] \frac{dT(x, y, z, t)}{dt} + C[T]\gamma[T] \frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial y} V_n + \\ + C[T]\gamma[T] \tau_p \frac{d^2 T(x, y, z, t)}{dt^2} = \nabla \lambda [T] \nabla T(x, y, z, t) + \\ + C[T]\gamma[T] V_{TM} \frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial x} - AL_j \ddot{E} \gamma[T] \frac{dV_i \ddot{e}}{dt} + \\ + B \frac{q_n(r, \tau)}{0,1\delta} \pm D \frac{dW(x, y, z, t)}{dt} \pm \\ \pm m_a C_a [T_a] \frac{dn_a}{dt} (T_a - T(x, y, z, t)) \pm \end{aligned} \quad (9)$$

$$\pm P_{T.X.D} (n_A, n_B, T, t_a) \frac{dn_{A(B)}}{dt} L_{T.X.P} + q_V(z) + \dot{A}_{\dot{e}\dot{o}},$$

где $C[T]$ и $\gamma[T]$ – теплоемкость и плотность материала мишени, соответствующие температуре T ; $E_{кр}$ – энергия, затрачиваемая на кристаллизацию; τ_p – время релаксации температуры на один Кельвин; V_n – скорость перемещения плазменного потока лазерного излучения или мишени относительно него; $L_{пл}$ и $L_{T.X.P}$ – удельные теплота плавления и термодинамической

реакции; $V_f[T]$ – скорость смещения фронта испарения; $V_{пл}$ – объем расплавленного металла; $W(x, y, z, t)$ – энергия деформирования единичного объема мишени; m_a – масса диффундирующего атома; $C_a[T_a]$ – теплоемкость диффундирующего материала при температуре T_a ; $P_{т.х}(n_A, n_B, T, t_{вз})$ – вероятность термохимической реакции, зависящая от концентрации реагентов n_A и n_B , температуры T и времени взаимодействия $t_{вз}$; n_A и n_B – концентрация реагентов, определяющих возможность реакции.

Изменение количества тепла в единичном объеме (первое слагаемое в левой части равенства) реализуется за счет перемещения потока лазерного излучения вдоль обрабатываемой поверхности или перемещения мишени относительно потока лазерного излучения со скоростью V_n (второе слагаемое); теплофизических процессов: влияния на теплообмен конечной скорости распространения тепла (третье слагаемое), теплопроводности (первое слагаемое справа), смещения фронта испарения (второе слагаемое), плавления (третье слагаемое); столкновительных процессов: объемного источника тепла за счет действия лазерного излучения (четвертое слагаемое), термоупругих, термопластических и термоусталостных процессов, определяющих энергию деформирования материала элементарного объема (пятое слагаемое); диффузионных процессов, определяющих теплоперенос диффундирующим материалом (шестое слагаемое); термохимических процессов, связанных с реализацией химических реакций между материалом детали и материалом покрытия или же между компонентами сплавов и композитных материалов, объемного источника тепла за счет действия светолучевого потока.

Теперь рассмотрим подробнее, как рассчитать каждое значение в формуле (9). Используя дискретные значения теплоемкости при различной температуре, зависимость теплоемкости от температуры можно выразить эмпирической формулой

$$C[T] = \left(a + b(T - 273) + c(T - 273)^2 \right) \cdot 4186,8, \quad (10)$$

где a , b , c – коэффициенты, значения которых приведены в табл. 1 для различных материалов.

Таблица 1 – Коэффициенты a , b и c для расчета теплоемкости в выражении (10)

Материал	a	$b \cdot 10^4$	$c \cdot 10^8$
Для чистых металлов			
Al	0,214	1	0
W	0,032	0,047	0
Fe	0,105	0,8	0
Cu	0,0926	0,208	0
Mo	0,0603	0,14	0
Ni	0,1023	1,12	0
Ti	0,13	0,53	0
Для хромистых нержавеющих сталей		Для сталей (1X13, 4X13)	
X18H9	0,1095	0,193	6
X18H25C2	0,117	0,58	2,1

Для определения зависимости изменения плотности материала от температуры можно также пользоваться эмпирической формулой

$$\gamma[\rho] = d - e(T - 273), \quad (11)$$

где d и e – коэффициенты, выбираемые в зависимости от материала. Так, например, для хромистых нержавеющих сталей 1X13, 2X13, 3X13 и 4X13 $d = 7700$, $e = 0,286$, а для аустенитных хромоникелевых сплавов X18H9 и X18H25C2 $d = 7920$, $e = 0,410$.

В случае когда поток лазерного излучения не перемещается вдоль поверхности мишени, второе слагаемое слева в формуле (9) обращается в нуль. Если же имеется перемещение потока параллельно обрабатываемой поверхности, то V_n – это скорость по координате y .

В третьем слагаемом слева учитывается конечная скорость распространения тепла. Время релаксации тепловых колебаний можно вычислить по формуле

$$\tau_{\delta} = \frac{\eta}{G}, \quad (12)$$

где η – коэффициент вязкости (внутреннего трения); G – модуль упругости 2-го рода (модуль сдвига), его можно вычислить через модуль упругости 1-го рода:

$$G = E / 2(1 + \mu),$$

где μ – коэффициент Пуассона.

Так, например, для железа $\eta = 14 \cdot 10^9$ кг/(м·с), $G = 4,6 \cdot 10^{10}$ Н/м², откуда $\tau_p \approx 3 \cdot 10^{-3}$ с; для алюминия $\eta = 1,25 \cdot 10^9$ кг/(м·с), $G = 6,85 \cdot 10^{10}$ Н/м², $\mu = 0,365$, откуда $\tau_p = 2,67 \cdot 10^{-4}$ с.

В первом слагаемом справа учтено изменение количества тепла за счет теплопроводности. Зависимость коэффициента теплопроводности λ от температуры в каждый момент времени представляется эмпирическими зависимостями, различными для различных материалов. Для аустенитных хромоникелевых сплавов зависимость λ от T имеет вид

$$\lambda = (13,3 - a + (1,1 + b) \cdot 2(T - 273)) \cdot 1,163, \quad (13)$$

где $a = 10(\sigma - 0,5)$; $b = 1,15(\sigma - 0,5)$; $\sigma = C/12 + Si/28 + Mn/55 + Cr/52 + Ni/59 + W/184 + Nb/93 + Mo/96$.

Здесь вместо названия элемента подставляется процентное значение содержания данного элемента в сплаве. Так, для стали X18H9 (ЭЯ-1) $\sigma = 0,14 / 12 + 0,8 / 28 + 2 / 55 + 18 / 52 + 10 / 59 = 0,592$, тогда $a = 0,92$, $b = 0,1058$.

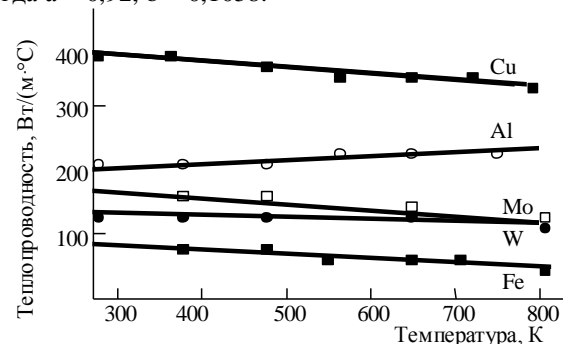


Рис. 1 – Зависимость теплопроводности от температуры материала

Для чистых металлов можно воспользоваться аппроксимацией табличных значений справочников. На графиках рис. 1 нанесены значения теплопроводности в зависимости от температуры. Из рисунка видно, что приближенно аппроксимировать эту зависимость можно линейной функцией вида

$$\lambda = -c\dot{O} + e. \quad (14)$$

Для вычисления коэффициентов c и e можно воспользоваться программой аппроксимации табличных значений методом наименьших квадратов для степенной функции. В данной функции размер базиса равен единице. Значения коэффициентов приведены в табл. 2.

Таблица 2 – Значения коэффициентов c и e в формуле (14)

Материал	c	e
Al	-0,0512	209,34
W	0,0785	159,33
Fe	0,0978	94,203
Mo	0,0291	140,72

Видно, что из этих материалов только у алюминия с ростом температуры понижается теплопроводность, у остальных она растет.

Во втором слагаемом справа формулы (9), учитывающем смещение фронта испарения, скорость испарения материала $V_{исп}$ при температуре, меньшей температуры плавления материала детали (ленгмюровский механизм), рассчитывается по формуле Дэшмана

$$V_{TM} = \frac{10^4}{\gamma_m} \sqrt{\frac{M}{2\pi RT}} \left(\exp\left(A - \frac{B}{T}\right) - P_i, \dot{O} \right), \quad (15)$$

где A и B – табулированные константы, значения которых приведены в табл. 3; R – газовая постоянная; γ_m – плотность материала детали; M – молекулярный вес материала детали; $P_{ост}$ – остаточное давление газов.

Таблица 3 – Коэффициенты A и B в выражении (15)

Материал	Cu	Al	Ti	Zr	Mo	W	Fe
A	11,69	11,79	12,50	12,33	11,64	12,40	12,44
$B \cdot 10^{-3}$	16,98	110,94	23,22	30,26	30,85	40,68	19,97

При испарении из слоя расплавленного металла (френкелевский механизм) скорость испарения определяется по формуле

$$V_{\delta} = V_0 \exp\left(\frac{T^*}{T(O, x, y, z, t)}\right), \quad (16)$$

где V_0 и T^* – критическая скорость испарения и температура поверхности.

Чтобы определить эти величины воспользуемся аппроксимацией графиков зависимости V_0 и T^* от плотности теплового потока q , показанных на рис. 2. Для хорошей аппроксимации подходит квадратичная функция, коэффициенты которой можно определить по программе аппроксимации функции со степенным базисом по методу наименьших квадратов. На графиках значения q и V_0 указаны по логарифмической шкале, поэтому воспользуемся такими подстановками:

$$V_0 = 10^{z-3}; \quad q = 10^{s+8}; \quad \Rightarrow \quad S = \lg q - 8. \quad (17)$$

Величину плотности теплового потока q можно определить по формуле (2).

Зависимости V_0 и T^* от q через вспомогательные переменные имеют такой вид:

$$\begin{aligned} Z &= (nS^2 + kS + p) \cdot 10^{-1}; \\ T^* &= (mS^2 + rS + f) \cdot 10^{-2}. \end{aligned} \quad (18)$$

Коэффициенты в формулах (18) для различных материалов приведены в табл. 4.

Таблица 4 – Коэффициенты n, k, p, m, r, f в формуле (18)

Материал	n	k	p	m	r	f
Al	1,619	3,0952	8,8571	1,4048	2,5833	3,2321
W	1,7143	10,2857	9,9997	3,2857	3,4428	1,8032
Fe	1,751	3,2502	10,5021	3,2849	-1,9286	37,942
Mo	0,8928	4,7321	10,9731	4,5357	-1,6752	53,652
Cu	-0,0858	1,1319	1,0605	0,8451	3,9713	19,116

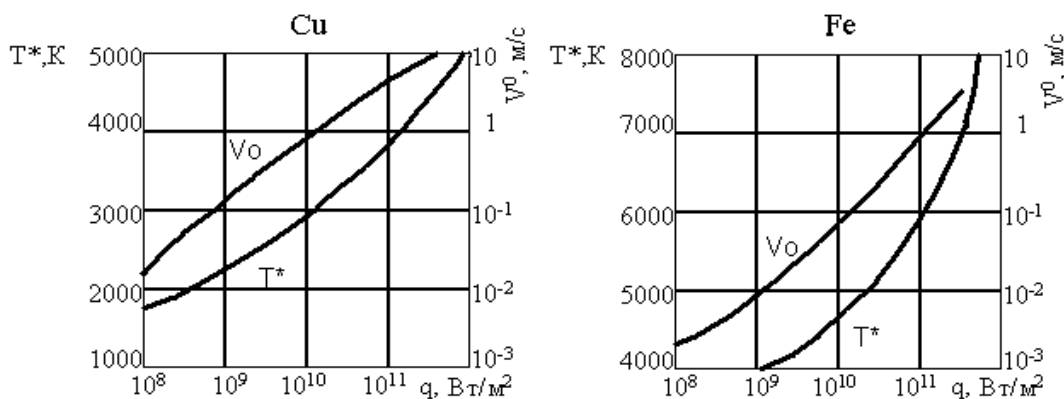


Рис. 2 – Графики зависимостей значений T^* и V_0 в формуле (8) от плотности теплового потока для ряда материалов

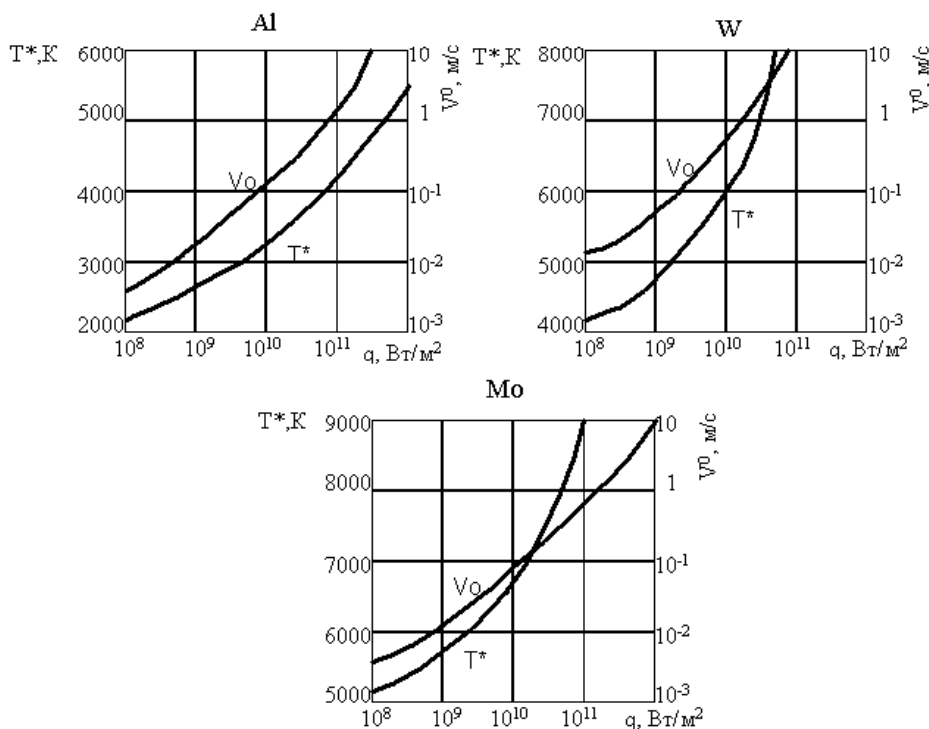


Рис. 2 – Окончание

В третьем слагаемом справа формулы (9) учитывается изменение количества тепла при плавлении и рассчитывается для того объема материал $V_{пл}$, в котором рассчитываемая температура превышает температуру плавления. Удельную теплоту плавления $L_{пл}$ можно вычислить по формуле

$$L_i \ddot{e} = nT_i \ddot{e} f(T_i \ddot{e}) \cdot 4186,8, \quad (19)$$

где n – число атомов в молекуле; $f(T_{пл})$ – функция зависимости $L_{пл}$ от $T_{пл}$, которую приближенно можно выразить как линейную зависимость вида

$$f(T_i \ddot{e}) = (1,57 \partial_i \ddot{e} + 1428) \cdot 10^{-3}. \quad (20)$$

Например, для железа $f(T_{пл}) = 3,5$ кал/г. Удельная теплота плавления $L_{пл}$ в формуле (12) измеряется в калориях на грамм.

В четвертом слагаемом формулы (9) вычисляется изменение количества тепла за счет действия лазерного излучения как объемного источника тепла.

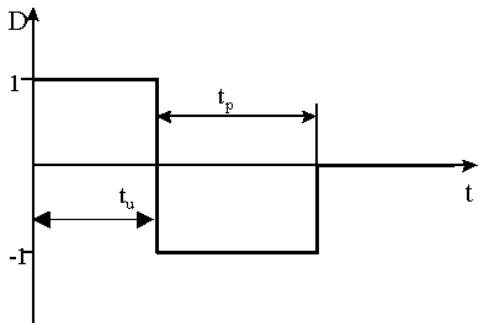


Рис. 3 – Значения коэффициента D в разные моменты времени

Пятое слагаемое формулы (9) учитывает энергию, затрачиваемую на деформирование тела за время действия теплового источника t_u , и возвращаемую материалу энергию при релаксации напряжений (за время, большее

t_u и меньшее $t_u + \tau_p$). На рис. 3 показано значение коэффициента D в различные моменты времени.

Энергию деформирования единичного объема определим по формуле [11]

$$W = G \left[\begin{aligned} &\varepsilon_{xx}^2 + \varepsilon_{yy}^2 + \varepsilon_{zz}^2 + 2(\varepsilon_{xy}^2 + \varepsilon_{yz}^2 + \varepsilon_{zx}^2) + \\ &+ \frac{\mu}{1-\mu} \ell^2 - \frac{2(1+\mu)\alpha_1}{1-2\mu} \ell (T(x, y, z, t) - T) \end{aligned} \right], \quad (21)$$

где $2\varepsilon_{ik} = 2\varepsilon_{ki} = \frac{\partial u_k}{\partial i} + \frac{\partial u_i}{\partial k}$ ($k, i = x, y, z$);

$$\ell = \varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy} + \varepsilon_{zz};$$

$\varepsilon_{xx}, \varepsilon_{yy}, \varepsilon_{zz}$ – удлинения; $\varepsilon_{xy}, \varepsilon_{yz}, \varepsilon_{zx}$ – сдвиги относительно соответствующих осей; u_x, u_y, u_z – перемещения относительно соответствующих осей; α_1 – коэффициент линейного расширения материала мишени; μ – коэффициент Пуассона (отношение поперечной деформации к продольной, значения μ заключены между 0,1 и 0,5); G – модуль сдвига (модуль второго рода) (для железа $G = 3,5 \dots 10,3 \cdot 10^{10}$ Н/м², $\mu = 0,23 \dots 0,31$); T_n – начальная температура.

Зависимость коэффициента линейного расширения материала от температуры аппроксимируется линейной функций вида

$$\alpha_1 [\dot{O}] = v + w(T - 273), \quad (10^6 / 1^\circ \tilde{N}) \quad (22)$$

где v и w – коэффициенты, значения которых приведены в табл. 5.

Таблица 5 – Коэффициенты V и W в выражении (22)

Элемент	Al	W	Fe	Cu	Mo	Ni	Ti
v	22.6	4.3	11.3	16.7	10.1	13.4	7.7
w · 10 ⁹	8.8	0.71	8.6	3.6	0.965	1.0	3.8

Деформации сдвигов ε_{jk} не могут задаваться произ-

вольно, они связаны дифференциальными соотношениями – условиями совместности:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 \varepsilon_{xx}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon_{yy}}{\partial x^2} &= 2 \frac{\partial^2 \varepsilon_{xy}}{\partial x \partial y}; & \frac{\partial^2 \varepsilon_{xx}}{\partial y \partial z} &= \frac{\partial}{\partial x} \left[-\frac{\partial \varepsilon_{yz}}{\partial x} + \frac{\partial \varepsilon_{zx}}{\partial y} + \frac{\partial \varepsilon_{xy}}{\partial z} \right]; \\ \frac{\partial^2 \varepsilon_{yy}}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon_{zz}}{\partial y^2} &= 2 \frac{\partial^2 \varepsilon_{xy}}{\partial z \partial y}; & \frac{\partial^2 \varepsilon_{yy}}{xy \partial z} &= \frac{\partial}{\partial y} \left[-\frac{\partial \varepsilon_{zx}}{\partial y} + \frac{\partial \varepsilon_{xy}}{\partial z} + \frac{\partial \varepsilon_{yz}}{\partial x} \right]; \\ \frac{\partial^2 \varepsilon_{xx}}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon_{zz}}{\partial x^2} &= 2 \frac{\partial^2 \varepsilon_{zx}}{xz}; & \frac{\partial^2 \varepsilon_{zz}}{\partial y \partial x} &= \frac{\partial}{\partial z} \left[-\frac{\partial \varepsilon_{yx}}{\partial z} + \frac{\partial \varepsilon_{yz}}{\partial x} + \frac{\partial \varepsilon_{xz}}{\partial y} \right]. \end{aligned} \quad (23)$$

Этими условиями проверяется правильность определения удлинений и сдвигов, а их корректировка – вводом дополнительных напряжений.

Для определения удлинений ε_{xx} , ε_{yy} , ε_{zz} и сдвигов ε_{xy} , ε_{yz} , ε_{zx} воспользуемся выражением термоупругого потенциала перемещений Φ :

$$\Delta \hat{\Phi} - \frac{1-2\mu}{2(1-\mu)} \frac{\gamma}{G} \frac{\partial^2 \hat{\Phi}}{\partial t^2} = \frac{1+\mu}{1-\mu} \alpha_1 [T(x, y, z, t) - \hat{\Phi}_f], \quad (24)$$

где γ – плотность материала мишени.

Учитывая, что решение задачи проводится в подвижной системе координат и при выходе на стационарный или близкий к нему режим второе слагаемое в левой части уравнения (24) становится незначительным, получим:

$$\Delta \hat{\Phi} = \frac{1+\mu}{1-\mu} \alpha_1 [T(x, y, z, t) - \hat{\Phi}_f]. \quad (25)$$

По величине термоупругого потенциала перемещений и по известным соотношениям находим величины удлинений и сдвигов:

$$\varepsilon_{ik} = \frac{\partial^2 \hat{\Phi}}{\partial i \partial k}, \quad (i, k = x, y, z). \quad (26)$$

Величины температурных напряжений определим по выражению

$$\sigma_{ik} = 2G \left(\frac{\partial^2 \hat{\Phi}}{\partial i \partial k} - \Delta \hat{\Phi} \cdot \delta_{ik} \right), \quad (27)$$

где δ_{ik} подчиняется таким условиям: $\delta_{ik} = 0$ при $i \neq k$ ($i, k = x, y, z$); $\delta_{ik} = 1$ при $i = k$.

В седьмом слагаемом формулы (9), учитывающем теплоперенос диффундирующим материалом, масса диффундирующего атома определяется по формуле

$$m_a = M m_p, \quad (28)$$

где M – атомный вес наносимого материала; m_p – масса протона.

Изменение концентрации диффундирующих атомов в единицу времени можно определить по выражениям:

$$\begin{aligned} - \text{при at } t < t_k: & \frac{dn_a}{dt} = \frac{j_a}{ez\sqrt{\alpha t}}; \\ - \text{при at } t \geq t_k: & \frac{dn_a}{dt} = \frac{j}{ezL_D}, \end{aligned} \quad (29)$$

где j – плотность тока вносимых атомов; e – заряд электрона; z – зарядовое число наносимого материала; L_D – толщина детали; t_k – время, за которое деталь прогреется

на всю толщину, $t_k = \frac{L_D^2}{\alpha}$; α – коэффициент температу-

ропроводности.

Формула для расчета коэффициента диффузии имеет вид:

$$\hat{E} \hat{a} \hat{d} \hat{\delta} = a_d d_y^2 V_0 \exp(-U / (kT)), \quad (30)$$

где a_d – множитель порядка 0,1, определяемый типом кристаллической решетки; d_y – расстояние между ближайшими эквивалентными положениями вакансий в кристалле; V_0 – величина порядка частоты атомных колебаний в кристалле ($10^{12} \dots 10^{14} \text{ c}^{-1}$); U – потенциальный барьер, который необходимо преодолеть вакансии при смещении в соседнее положение; k – постоянная Больцмана; T – абсолютная температура.

Восьмое слагаемое формулы (9) учитывает влияние химических процессов на баланс тепла в мишени. При взаимодействии лазерного излучения с веществами, состоящими из многоатомных молекул, возможен целый цикл химических превращений, таких, как возбуждение молекулы с последующей диссоциацией (разложением) ее на активные частицы (ионы), перегруппировка атомов в структуре молекулы; перемещение отдельных атомов из одной части конфигурации молекулы в другую; присоединение к возбужденной молекуле другой молекулы; передача энергии возбуждения от одной молекулы к другой; захват электронов с образованием отрицательных ионов; рекомбинация иона с электроном или иона с молекулой. Концентрация химических превращений в первом приближении прямо пропорциональна плотности поглощенной энергии и химическому выходу (среднее число химических превращений при поглощении единичной энергии). В результате химических реакций между ионами и радикалами плазмообразующего газа и атомами материала возможно удаление материала в виде летучих соединений, что используется при плазмохимическом травлении (так, добавление к аргону 10 % кислорода может увеличить скорость удаления материала за счет химических реакций в 10–15 раз). Скорости плазмохимического травления составляют 2...10 нм/с. При обработке элементов W, Te, Mo, Ta фторсодержащими газами образуются летучие фториды, а при обработке Al хлорсодержащими газами – летуче хлориды. Термо- и плазмохимические реакции также могут способствовать увеличению массы и объема обрабатываемой детали за счет образования химических соединений с реакционным газом. Лазерное облучение в атмосфере химически активного газа либо в смеси инертного и химически активного газов, например O_2 , $Ar + N_2$, $Ar + N_2$ и т. п., сопровождается такими процессами, обеспечивающими рост пленки химического соединения: реакция между химически активными ионами А и атомами мишени В с последующим переносом молекул АВ на подложку; реакция между атомами и ионами химически активного газа А, A^+ , A^- и атомами наносимого покрытия; реакция между атомами и ионами А, A^+ , A^- и распыленными частицами В в газовой фазе с последующим осаждением молекул АВ на поверхности мишени.

Когда лазерному облучению подвергается многокомпонентное вещество АВ (химическое соединение, сплав), в установившемся процессе отношение поверхностных концентраций будет таким:

$$\frac{n_A(0)}{n_B(0)} = \frac{n_{A,V}}{n_{B,V}} \left(\frac{M_A}{M_B} \right)^{1/4}, \quad (31)$$

где $n_{A,V}$ и $n_{B,V}$ – концентрации атомов А и В объеме мишени.

Происходит обогащение приповерхностного слоя более тяжелым компонентом.

Если рабочее вещество непрерывно поступает на поверхность и разлагается там под действием облучения, то в простейшем случае скорость изменения поверхностной концентрации вступивших N_1 и не вступивших N_2 в реакцию молекул соединения будет определяться уравнениями

$$\frac{dN_1}{dt} = \frac{N_0 \sigma_p J_e}{e}, \quad (32)$$

$$\frac{dN_0}{dt} = n_0 - \frac{N_0}{\tau_0} - \frac{dN_1}{dt}, \quad (33)$$

где σ_p – сечение реакции, зависящее от свойств соединения и энергии лазерного излучения; n_0 – число молекул, поступающих на единицу площади поверхности в единицу времени; τ_0 – среднее время, в течение которого непрореагировавшие молекулы находятся на поверхности до испарения.

Проинтегрировав систему уравнений (27)–(33) в случае малого потока n_0 , получаем

$$N_0(t) = n_0 \sigma_h \tau_0 J_\ell \left(e + \sigma_h \tau_0 J_\ell \right)^{-1}. \quad (34)$$

Здесь введено обозначение $\frac{1}{\tau_1} = \frac{1}{\tau_0} + \frac{\sigma_p J_e}{e}$, а

$N_0(t)$ – начальная концентрация молекул в момент включения лазерного облучения при $t=0$. Через промежуток времени $t \gg \tau_1$ установится равновесная концентрация, равная $n_0 \tau_1$, и реакция будет протекать с постоянной скоростью

$$dN_1 / dt = n_0 \sigma_p \tau_0 J_e \left(e + \sigma_p \tau_0 J_\ell \right)^{-1}. \quad (35)$$

В общем случае эта скорость зависит от всех параметров процесса (E_e , J_ℓ , T , n_0), однако если реакция происходит при достаточно низких T и высоких J_ℓ , так что $\sigma_p \tau_0 J_\ell \gg 1$, то скорость реакции определяется только скоростью поступления адсорбата и для малого значения n_0 не очень высока. При высоких плотностях в потоке n_0 , достаточных для создания более толстого покрытия, чем монослой, скорость реакции определяется только режимом облучения и не зависит от n_0 и T :

$$dN_1 / dt = N_0 \sigma_p J_\ell / e \quad \text{при} \quad n_0 \tau_1 \gg N_0. \quad (36)$$

2.3. Теплообмен на поверхности детали

Тепловой поток на поверхности мишени создается за счет таких факторов (9):

– столкновительные процессы: тепло, выделяемое на поверхности вследствие действия лазерного излучения (первое слагаемое справа), теплового потока, отводимого с термоэлектронами (второе слагае-

мое), и вторичными фотонами (третье слагаемое);

– теплофизические процессы: отвод теплового потока с испаренным материалом (четвертое слагаемое), ушедшим материалом в жидкой фазе, если создаются условия для его выброса (пятое слагаемое), тепловым излучением нагретой поверхности (шестое слагаемое) и конденсированными атомами, ранее испаренными (седьмое слагаемое);

– плазмохимические процессы, реализующиеся за счет реакций потока лазерного излучения с испаренным материалом детали или адсорбированными газами (восьмое слагаемое); эта энергия передается излучением.

Передача энергии осуществляется также за счет излучения потока квантов лазерного излучения (последнее слагаемое):

$$-\lambda [T] \frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial x} = F_{\ell, r} - F_{m \dot{y}} - F_{\dot{y} \dot{o}} - F_{\dot{e} \dot{n} \dot{i}} - F_m - \sigma \varepsilon \dot{o}(0, y, z, t) \pm F_{\dot{e} \dot{i} \dot{a}} + F_{\dot{i} \dot{o}} + \sigma \varepsilon \dot{n} \dot{n}, \quad (37)$$

где σ – постоянная Стефана – Больцмана; ε и ε_c – степень черноты поверхности мишени и среды; T_c – температура среды.

Рассмотрим более подробно каждое слагаемое в формуле (37).

Плотность теплового потока вследствие действия лазерного излучения

$$F_{\dot{e} \dot{e}} = \frac{I_i D^2}{4\pi \lambda^2 F^2} P_0. \quad (38)$$

Второе слагаемое учитывает отвод теплового потока за счет испускания электронов нагретой поверхностью мишени – термоэлектронной эмиссии. Плотность теплового потока, отводимого с электронами,

$$F_{\dot{O} \dot{Y}} = J_Y \phi(T), \quad (39)$$

где $\phi(T)$ – работа выхода электрона, эВ, при температуре поверхности T ; J_Y – плотность эмиссионного тока, которая определяется с помощью уравнения Ричардсона

$$J_Y = (1 - \bar{r}) A \cdot T^2 \cdot \exp(-e\phi_0/kT). \quad (40)$$

Здесь \bar{r} – усредненный по энергиям электронов коэффициент отражения от потенциального барьера на границе “твердое тело – вакуум”, он может достигать нескольких процентов для чистых металлов; A – постоянная Ричардсона,

$A = 4\pi m_e k^2 e/h^3 = 1,204 \cdot 10^6 \text{ A/m}^2(\text{K})^2$; ϕ_0 – работа выхода электрона при $T = 273 \text{ K}$; k – постоянная Больцмана.

Для большинства металлов ϕ лежит в диапазоне 4...5 эВ.

3. Результаты расчётов температур, температурных напряжений, скорости роста температуры для фемтосекундного лазера.

Рассмотрены результаты расчётов полей температур, температурных напряжений, скорости роста температуры при действии лазерного излучения с

плотностями теплового потока от 10^{11} до 10^{17} Вт/м², при временах действия от 10^{-16} до 10^{-10} с на твёрдый

сплав ВК4, результаты которого показаны на рис. 4.

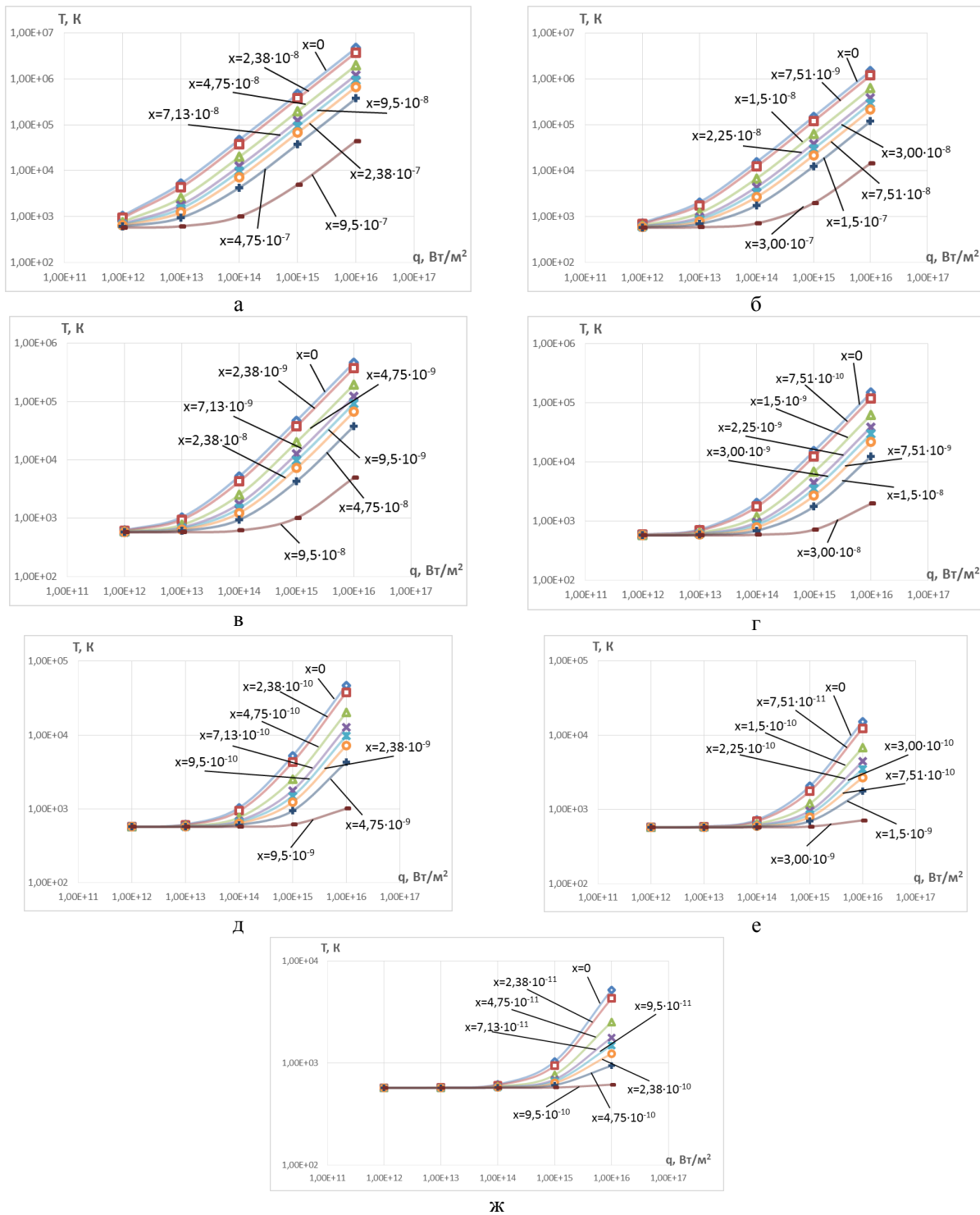


Рис. 4 – Зависимость максимальной температуры в зоне действия лазерного излучения на ВК4 от плотности теплового потока на разных глубинах при времени действия: а - $t=10^{-10}$ с; б - $t=10^{-11}$ с; в - $t=10^{-12}$ с; г - $t=10^{-13}$ с; д - $t=10^{-14}$ с; е - $t=10^{-15}$ с; ж - $t=10^{-16}$ с.

Видно, что с ростом плотности теплового потока температуры растут практически на всех исследованных глубинах – от 0 до $9,5 \cdot 10^{-7}$ м при времени действия 10^{-10} с. Действия с меньшими временами сохраняет практически тот же характер зависимости температуры от плотности теплового потока, характер со-

храняется, но величины температур существенно уменьшаются.

Полученные распределения температуры от плотности теплового потока показывают, что для меньших времён действия теплового потока реализуются более удачные распределения температур при больших плотностях теплового потока

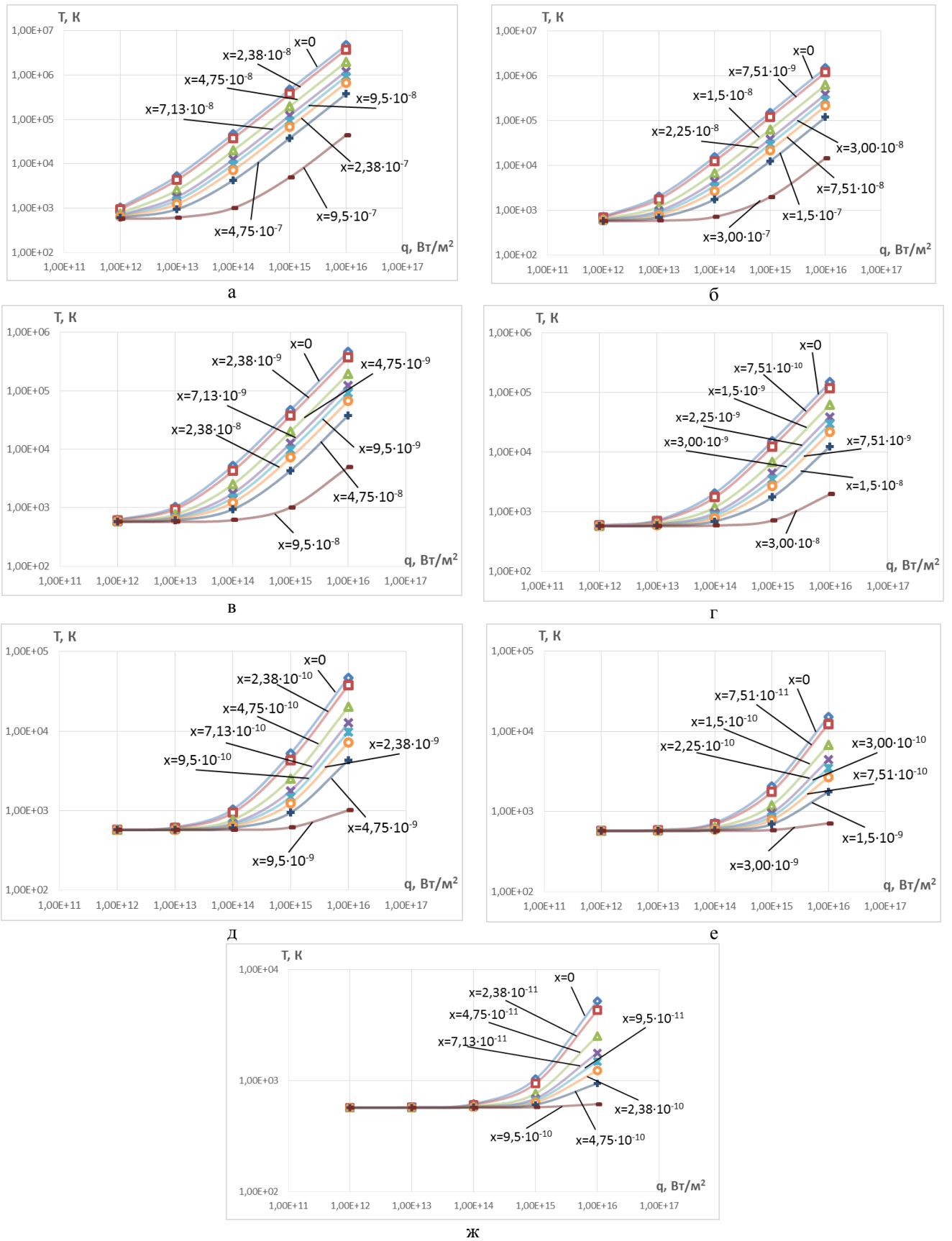
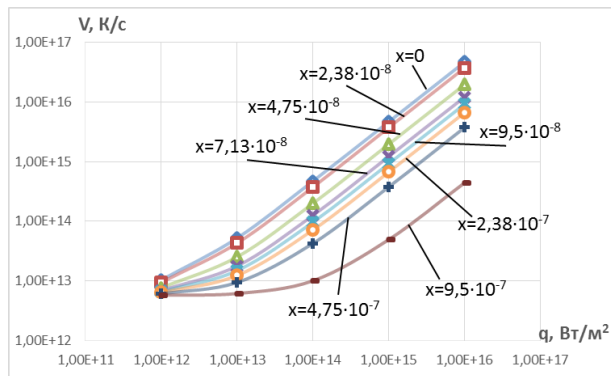


Рис. 4 – Зависимость максимальной температуры в зоне действия лазерного излучения на ВК4 от плотности теплового потока на разных глубинах при времени действия: а - $t=10^{-10}$ с; б - $t=10^{-11}$ с; в - $t=10^{-12}$ с; г - $t=10^{-13}$ с; д - $t=10^{-14}$ с; е - $t=10^{-15}$ с; ж - $t=10^{-16}$ с.

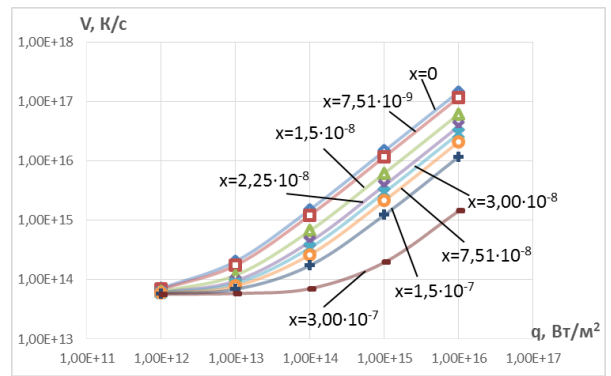
($10^{15} \dots 10^{16}$ Вт/м²), тоді як при 10^{-14} с дання область отримання наноструктур лежить уже при щільностях теплового потоку від 10^{13} до 10^{15} Вт/м², при більших временах 10^{-12} с з цю область переміщується в сторону менших щільностей теплового потоку і лежить в області від 10^{12} до 10^{14} Вт/м². Для времена 10^{-10} с з цю область лежить уже в діапазоні від 10^{12} до 10^{13} Вт/м².

По цим графікам можна оцінити можливість отримання наноструктур при малих временах дії, т.е. при фемтосекундному і пікосекундному діапазоні, але ці графіки не достаточні для оцінки можливості отримання наноструктур. Необхідно також визначити швидкість зростання температури від щільності теплового потоку при тих же временах (від 10^{-16} до 10^{-10} с).

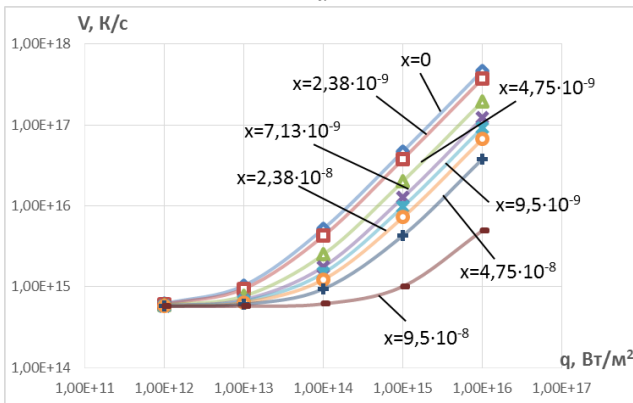
Аналіз залежності швидкості зміни температури во время дії від щільності теплового потоку на різних глибоинах і временах дії теплового потоку від 10^{-16} до 10^{-10} с (показано на рис. 5). Видно, що швидкість зміни температури змінюється в межах від 10^{13} до 10^{17} К/с, з зменшення времена дії ці швидкості зростають і при временах 10^{-12} с вони уже наближаються до $10^{15} \dots 10^{18}$ К/с. Далі зменшення времена до 10^{-14} с, швидкості наближаються до $10^{17} \dots 10^{19}$ К/с і при $t = 10^{-16}$ с швидкості зростання температури наближаються до $10^{19} \dots 10^{20}$ К/с. Видно, що такі великі швидкості зростання сприяють утворенню наноструктур і очевидно можуть значно прискорити цю процес.



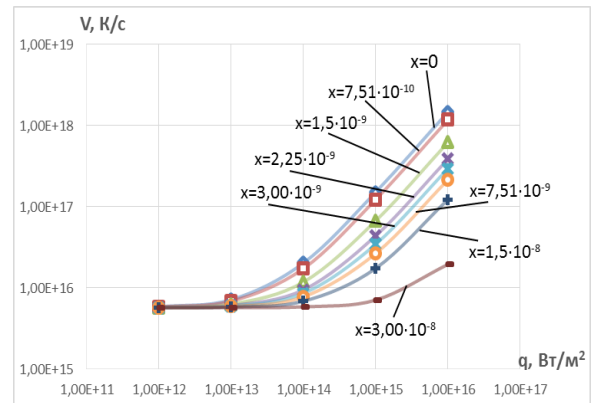
а



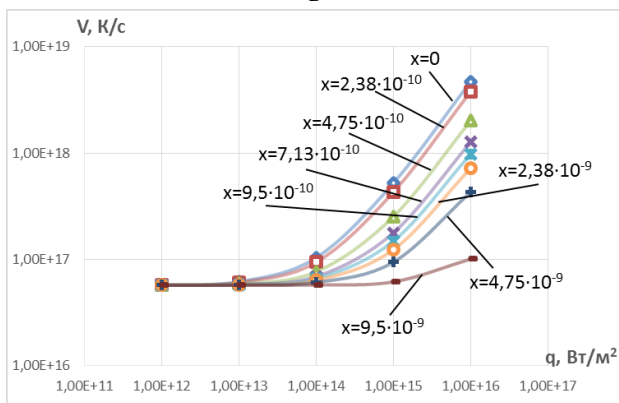
б



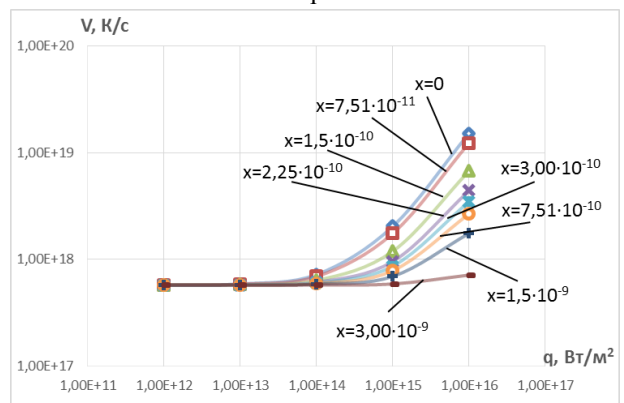
в



г

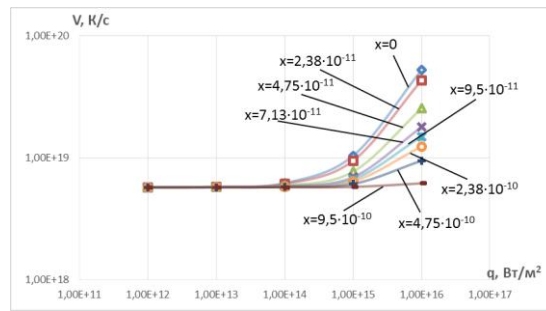


д

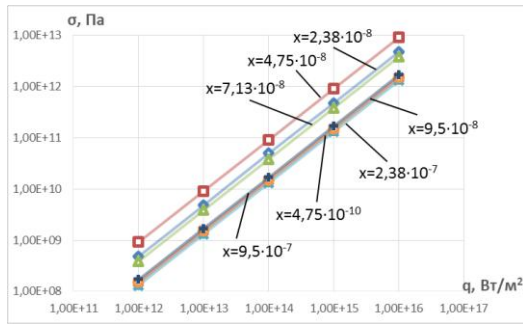


е

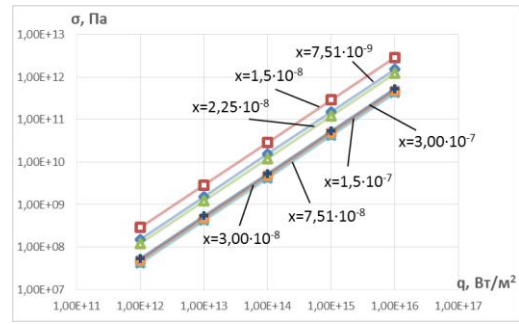
Рис. 5 – Залежність швидкості зміни температури в зоні дії лазерного випромінювання на BK4 від щільності теплового потоку на різних глибоинах при временах дії: а - $t=10^{-10}$ с; б - $t=10^{-11}$ с; в - $t=10^{-12}$ с; г - $t=10^{-13}$ с; д - $t=10^{-14}$ с; е - $t=10^{-15}$ с; ж - $t=10^{-16}$ с



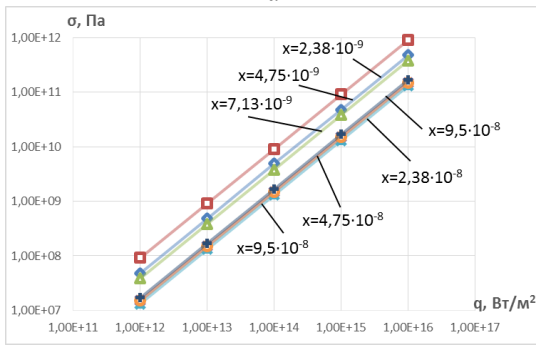
Ж
Рис.5 – Окончание



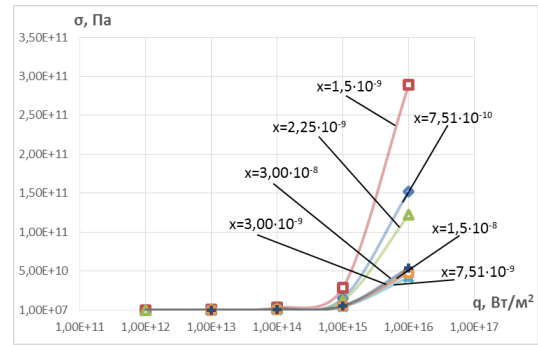
а



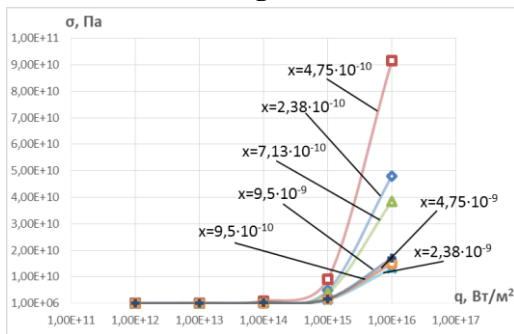
б



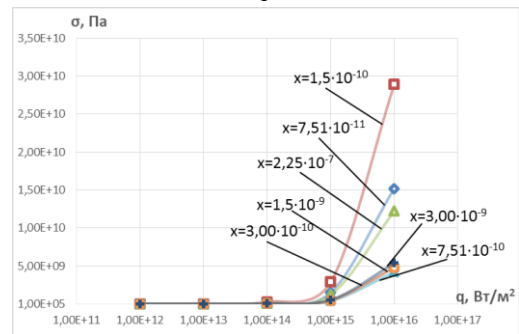
в



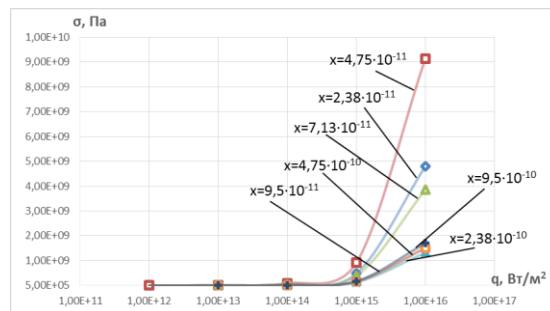
г



д



е



ж

Рис. 6 – Зависимость температурных напряжений в зоне действия лазерного излучения на ВК4 от плотности теплового потока на разных глубинах при времени действия: а - $t=10^{-10}$ с; б - $t=10^{-11}$ с; в - $t=10^{-12}$ с; г - $t=10^{-13}$ с; д - $t=10^{-14}$ с; е - $t=10^{-15}$ с; ж - $t=10^{-16}$ с.

На рис. 6 показаны зависимости температур на разных глубинах в зоне действия лазерного излучения на твёрдый сплав ВК4 от плотности теплового потока при тех же временах действия ($10^{-16} \dots 10^{-10}$ с). Видно, что с ростом плотности теплового потока величины температурных напряжений существенно увеличиваются от 10^8 до 10^{13} Па. Эти напряжения по абсолютной величине превышают предел прочности, но так как они действуют импульсно в короткое время, то разрушение не происходит (энергии деформирования недостаточно). При малых величинах теплового потока температурные напряжения ускоряют образования наноструктур, а при больших, начиная с $10^{14} \dots 10^{16}$ Вт/м², они могут самостоятельно образовывать наноструктуры за счёт деформирования атомной решётки материала.

На рис. 7 показаны зависимости максимальных температур от времени действия теплового потока на разных глубинах при всех исследованных плотностях

теплового потока. Видно, что эти зависимости можно использовать для выбора времени действия теплового источника, когда известны плотности теплового потока, создаваемые им. Так, для малых тепловых потоков в диапазоне от 10^{12} до 10^{14} Вт/м² можно, воспользовавшись этими зависимостями, найти необходимое время для получения наноструктур, но в диапазоне времени от 10^{-16} до 10^{-13} с вероятность получения наноструктур минимальная для плотности теплового потока 10^{12} Вт/м². При повышении плотности теплового потока до 10^{13} этот диапазон сужается до $10^{-16} \dots 10^{-14}$ с, а при плотности теплового потока 10^{14} Вт/м² этот диапазон ещё уменьшается до $10^{-16} - 10^{-15}$ с. При плотности теплового потока 10^{15} Вт/м² область получения наноструктур смещается в сторону малых времён и составляет $10^{-16} - 10^{-14}$ с, тогда как при больших временах есть высокая вероятность роста уже образовавшегося нанозерна до субмикро- и микрометровых размеров.

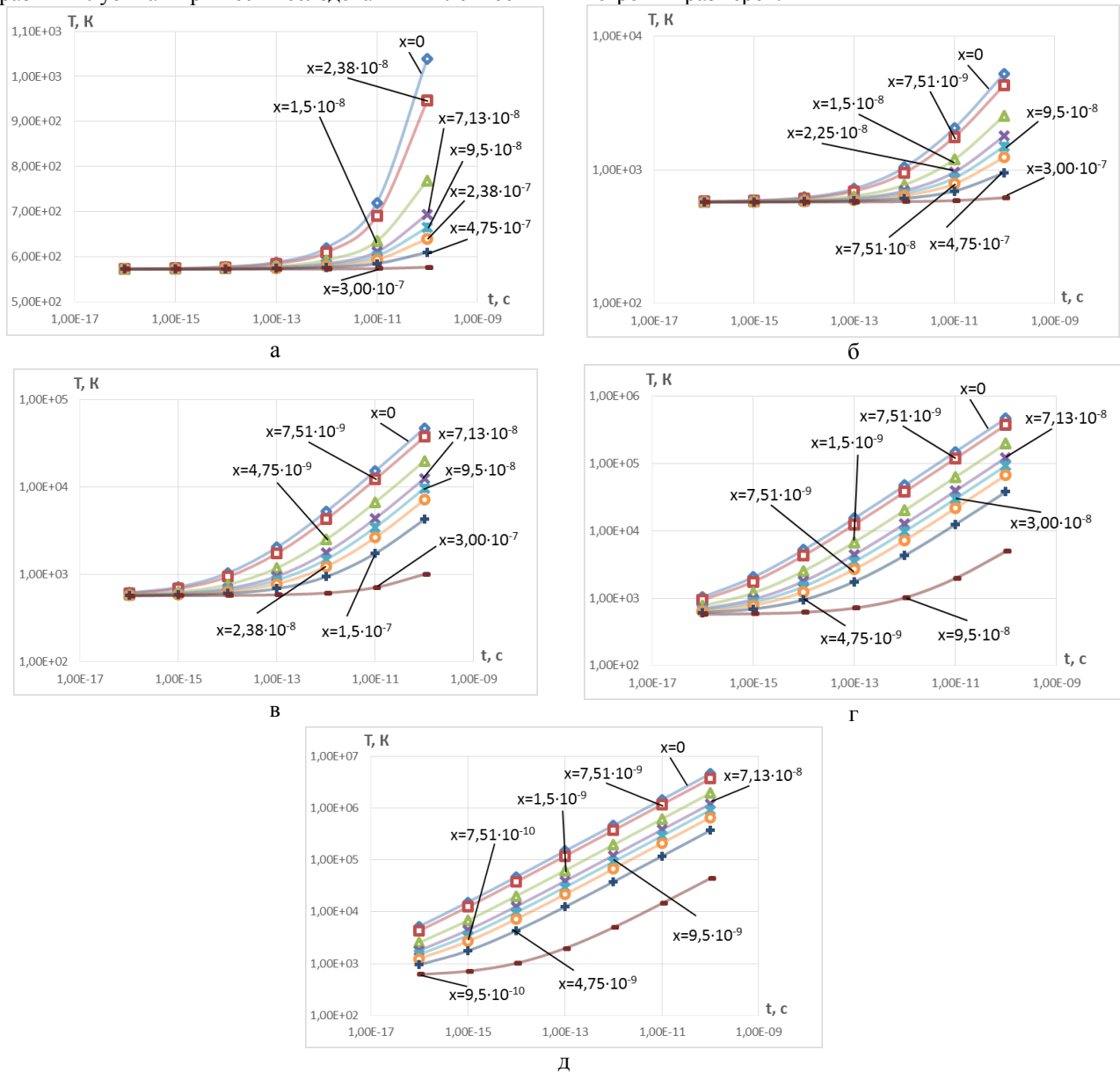


Рис. 7 – Зависимость максимальной температуры в зоне действия лазерного излучения на ВК4 от времени действия теплового потока на разных глубинах при плотностях теплового потока: а - $q=10^{12}$ Вт/м²; б - $q=10^{13}$ Вт/м²; в - $q=10^{14}$ Вт/м²; г - $q=10^{15}$ Вт/м²; д - $q=10^{16}$ Вт/м²

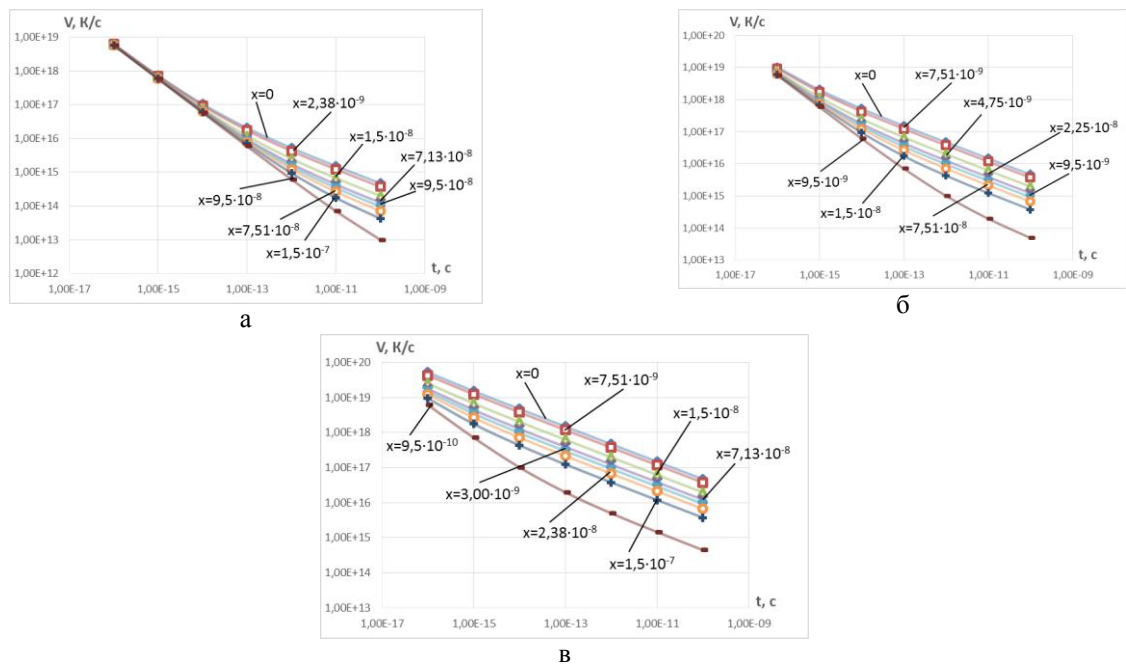


Рис.8 – Зависимость скорости изменения температуры в зоне действия лазерного излучения на ВК4 от времени действия теплового потока на разных глубинах при плотности теплового потока: а - $q=10^{14} \text{ Вт/м}^2$, б - $q=10^{15} \text{ Вт/м}^2$, в - $q=10^{16} \text{ Вт/м}^2$

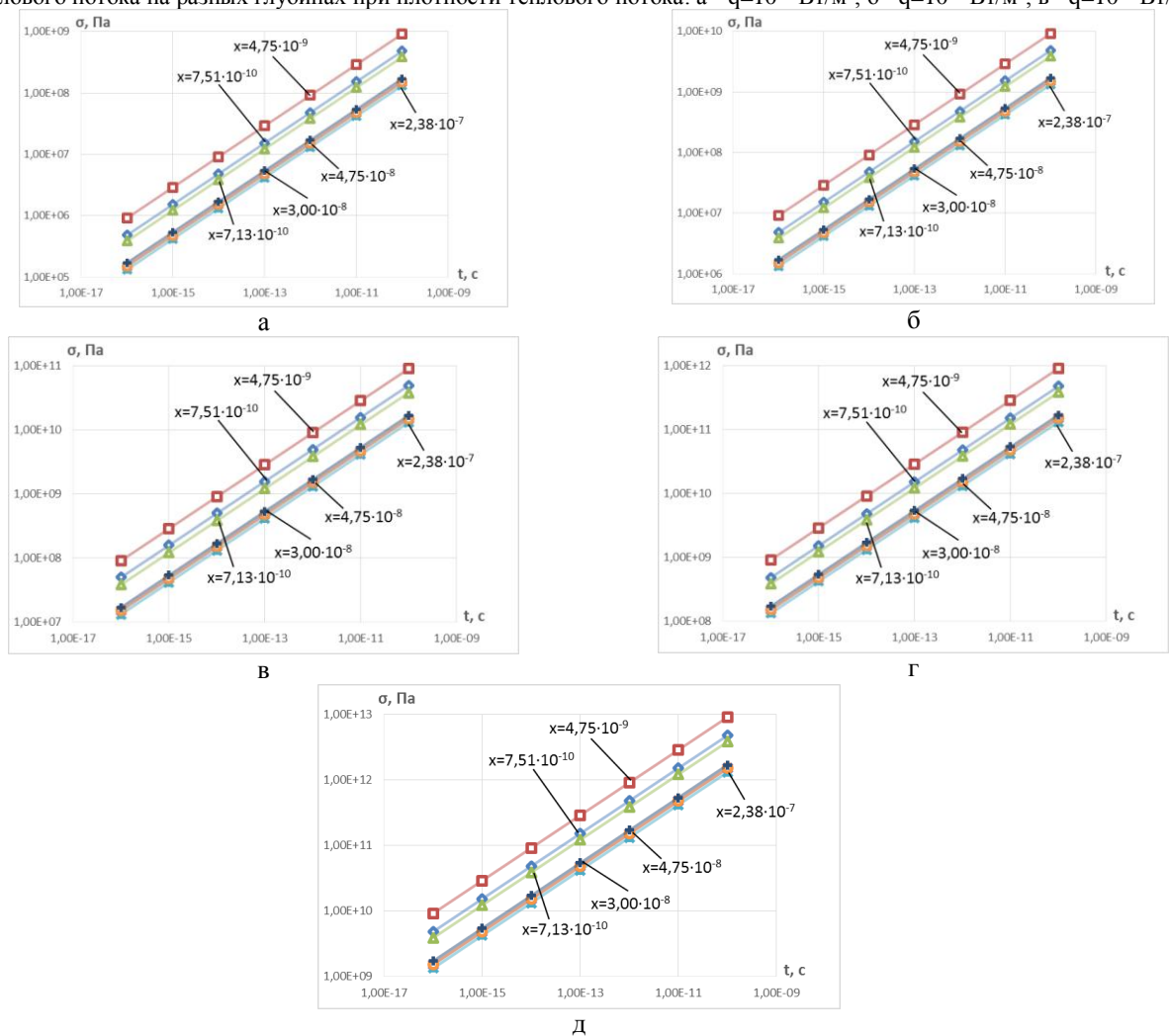


Рис. 9 – Зависимость температурных напряжений в зоне действия лазерного излучения на ВК4 от времени действия теплового потока на разных глубинах при плотности теплового потока: а - $q=10^{12} \text{ Вт/м}^2$, б - $q=10^{13} \text{ Вт/м}^2$, в - $q=10^{14} \text{ Вт/м}^2$, г - $q=10^{15} \text{ Вт/м}^2$, д - $q=10^{16} \text{ Вт/м}^2$

Так как важной характеристикой является скорость изменения температуры в зоне действия лазерного излучения, то её зависимости от времени показаны на рис. 8. Видно, что при малых плотностях теплового потока ($q=10^{14}$ Вт/м²) скорость остаётся практически одинаковой в диапазоне времён от 10^{-16} до 10^{-13} с (рис. 8, а). При росте плотности теплового потока до 10^{15} Вт/м² этот диапазон сужается и в основном сохраняется вблизи 10^{-16} с, а при плотности теплового потока $q=10^{16}$ Вт/м² этот диапазон практически отсутствует, так как на разных глубинах реализуются разные условия и на поверхности даже при этих временах наноструктур нет, они находятся в глубине материала.

На рис. 9 показаны зависимости максимальных температурных напряжений в зоне действия лазерного излучения на ТС ВК4 от времени его действия. Эти зависимости позволяют получить диапазоны времени действия ЛИ, при которых для различных плотностей теплового потока следует ожидать образования наноструктур. Так, при плотности теплового потока $q=10^{12}$ Вт/м² во всём диапазоне времени действия непосредственно наноструктуры не образуются. При увеличении плотности теплового потока до 10^{13} Вт/м², только на малой глубине $4,75 \cdot 10^{-9}$ м это возможно и при времени 10^{-10} с есть вероятность получения наноструктур за счёт действия температурных напряжений. Дальнейшее увеличение плотности теплового потока до 10^{14} Вт/м², приводит к расширению области значений времени, при которых могут образовываться наноструктуры расширяется до времён 10^{-12} - 10^{-10} с, но на относительно малых глубинах.

Увеличение плотности теплового потока до 10^{15} Вт/м² значительно расширяет зону, где возможны образования наноструктур по времени и они могут реализовываться при времени 10^{-14} до 10^{-10} с и глубина на этой зоны может достигать $4,75 \cdot 10^{-8}$ м. Увеличение плотности теплового потока до 10^{16} Вт/м² позволяет практически во всём исследованном диапазоне времени 10^{-16} ... 10^{-10} с реализовать наноструктуры, но слои будут разной толщины.

Во всех случаях в диапазоне времени, когда за счёт действия напряжений наноструктуры не образуются, напряжения могут ускорять получение наноструктур за счёт действия температур и скорости её роста.

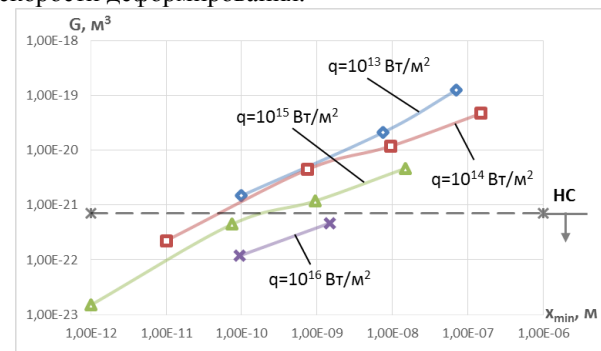
Зависимости максимальных температурных напряжений в зоне действия лазерного излучения на твердый сплав ВК4 от времени его действия позволяет также оценить скорость деформирования за счет действия температурных напряжений, что совместно с остальными критериями образования наноструктур может влиять на вероятность их образования. Так, при плотности теплового потока 10^{12} Вт/м² при времени действия 10^{-16} с скорость деформирования будет лежать в пределах от 10^{21} ... 10^{22} Па/с, тогда как при времени 10^{-13} с она уже будет порядка $5 \cdot 10^{19}$... $3 \cdot 10^{20}$ Па/с, при увеличении времени до 10^{-10} с она ещё больше понизится и будет лежать в пределах от 10^{18} до 10^{19} Па/с, т. е. видно, что с ростом времени действия лазерного луча снижается скорость дефор-

мирования и её влияние на образование наноструктур также снижается.

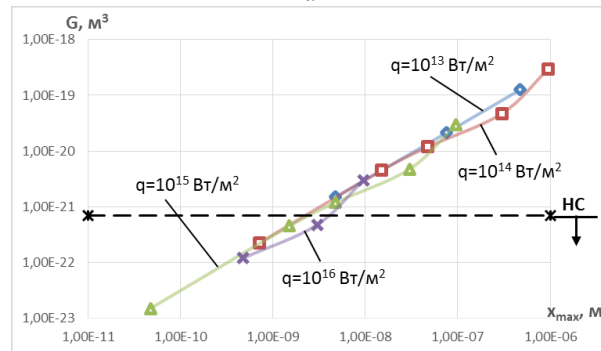
При плотности теплового потока 10^{14} Вт/м² оценки скорости деформирования показывают, что при времени 10^{-15} с. она лежит в пределах $5 \cdot 10^{22}$... $3 \cdot 10^{23}$ Па/с, тогда как при времени 10^{-10} с. он изменяется в диапазоне от 10^{20} до 10^{21} Па/с.

Плотность теплового потока 10^{16} Вт/м² позволяет получить при времени 10^{-15} с скорость деформирования $5 \cdot 10^{23}$... $3 \cdot 10^{24}$ Па/с, при $t=10^{-12}$ с – 10^{22} ... 10^{23} Па/с, а при $t=10^{-10}$ она лежит в пределах 10^{21} ... 10^{22} Па/с.

Проведенный анализ показывает, что с ростом плотности теплового потока скорость деформирования увеличивается, тогда как возрастание времени действия теплового потока приводит к снижению скорости деформирования.



а



б

Рис. 10 – Зависимость объема нанокластера G от минимальной (а) и максимальной глубины (б) при действии лазерного излучения с различной плотностью теплового потока q ЛИ для ТС ВК8 при радиусе пятна $R=10^{-6}$ м

Аналогичные исследования были проведены для радиуса луча $R = 10^{-6}$ м, результаты которого показаны на рис. 12. Видно, что характер кривых в зависимостях объема нанозерна от минимальной (рис. 12, а) и максимальной (рис. 12, б) глубины залегания сохранен, но величины объема зерна увеличились практически на порядок. Доля наноструктурных зерен существенно уменьшается, что наглядно можно увидеть, сравнив нахождение пунктирных линий на рис. 10, а и 8, а с аналогичными на рис. 12, а и 12, б. Видно, что ещё большая доля зерен в случае размера пятна с $R = 10^{-6}$ м переходит в область субмикроструктур, что позволяет выбирать размер пятна ЛИ и его технологические параметры.

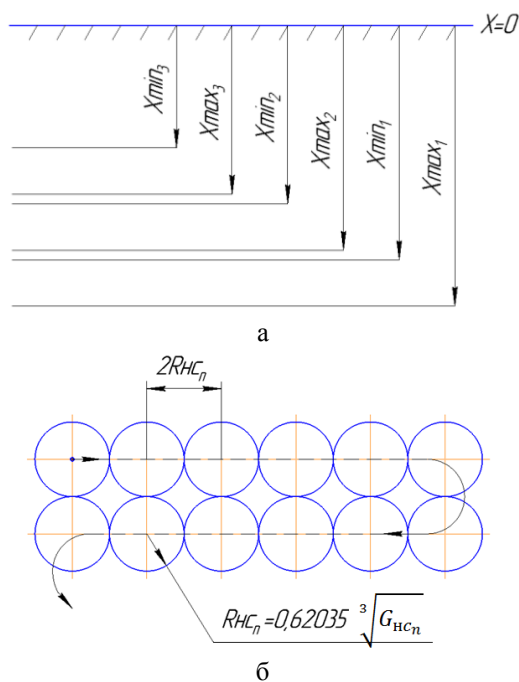


Рис. 11 – Схема расположения зон с наноструктурами: а – по глубине; б – на поверхности при действии последовательно потоков ионизирующего излучения с разными плотностями теплового потока $q_1, q_2 \dots q_n$ и временами его действия $\tau_1, \tau_2 \dots \tau_n$ (рис. 11, б: при $X_n = 1/n(X_{max_n} + X_{min_n})$, $R_{HC_n} = 0,62035 \sqrt[3]{G_{HC_n}}$)

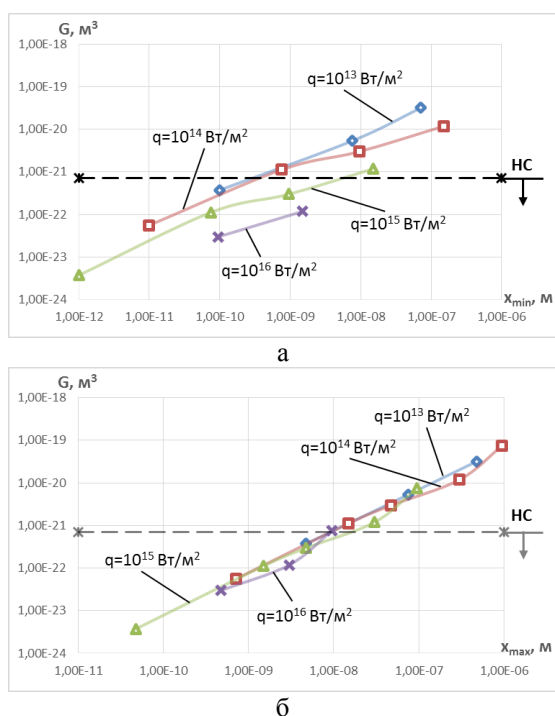


Рис. 12 – Зависимость объёма нанокластера при действии лазерного излучения с различной плотностью теплового потока q ЛИ для ТС ВК8 при радиусе пятна $R=10^{-6}$ м: а – при минимальной глубине; б – при максимальной глубине

Для проведения экспресс-оценки возможности получения наноструктур в тех или иных условиях

необходимо построить зависимости объёма нанокластера от плотности теплового потока и времени его действия для различных радиусов пятна действия ЛИ, что позволит быстро оценить область технологических параметров, при которых есть вероятность получения наноструктур. Такие пространственные картины построены на рис. 13, 14 для радиуса пятна $R = 10^{-6}$ м и $R = 5 \cdot 10^{-7}$ м. Видно, что поверхности зон создания, образованные областью возможных технологических параметров для получения наноструктур (размер зерна меньше 100 нм) в случае меньшего пятна действия лазерного излучения ($R = 5 \cdot 10^{-7}$ м), имеет большую поверхность, а значит, вероятность получения наноструктур в этом случае значительно выше (рис. 13, 14).

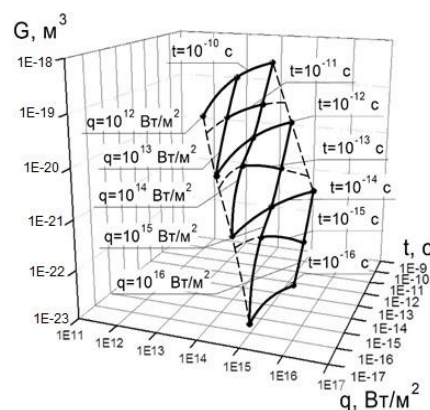


Рис. 13 – Зависимость объёма нанокластера от плотности теплового потока лазерного излучения – q и времени его действия t в зоне, где образуются наноструктуры ($R=10^{-6}$ м) (ВК4)

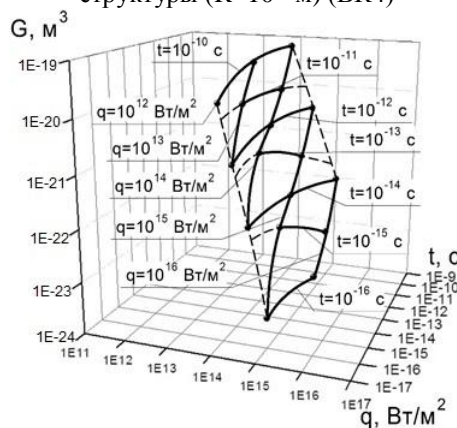


Рис. 14 – Зависимость объёма нанокластера от плотности теплового потока лазерного излучения – q и времени его действия t в зоне, где образуются наноструктуры ($R=5 \cdot 10^{-7}$ м) (ВК4)

На наш взгляд, необходимо ещё более внимательно отнестись к исследованию температурных напряжений и скоростей деформирования за счет их действия и их влияния на образование наноструктур. Всё это говорит о том, что необходимо перейти от выработки отдельных критериев образования наноструктур к созданию обобщенного критерия получения наноструктур.

Выводы

1. Показано, что для меньших времен действия теплового потока реализуется более удачное распределение температур для получения наноструктур при больших плотностях теплового потока $10^{15} \dots 10^{16}$ Вт/м². При $t=10^{-14}$ с эта область перемещается к значениям плотности теплового потока $10^{13} \dots 10^{15}$ Вт/м², а при времени 10^{-10} с эта область лежит в диапазоне от 10^{12} до 10^{13} Вт/м². Всё это показывает, что есть реальная возможность получить наноструктуры при реализации требуемых плотностей теплового потока и времен.

2. Зависимости скорости изменения температуры от плотности теплового потока на разных глубинах показали, что скорости изменения температуры реализуются от $10^{12} \dots 10^{17}$ К/с (при времени 10^{-10} с) до $10^{19} \dots 10^{20}$ К/с. Важным является то, что они превышают необходимую скорость роста температуры 10^7 К/с, а при реализующихся высоких скоростях роста температуры они могут существенно повысить вероятность получения наноструктур.

3. Зависимости максимальных температур от времени действия теплового потока позволяют получить для каждого диапазона плотностей теплового потока диапазон времен их действия для реализации наноструктур, что важно для выбора технологических параметров лазерного излучения, обеспечивающего создание наноструктур в поверхностном слое режущего инструмента из ВК4.

4. Зависимости максимальных температурных напряжений от плотности теплового потока и времени его действия показали, что величины максимальных температурных напряжений позволяют найти область технологических параметров, где величины температурных напряжений превышают 10^{10} Па, что позволяет получать наноструктуры только за счет деформирования материала, так как эти напряжения практически действуют в двух взаимно перпендикулярных направлениях. При значениях температурных напряжений, меньших 10^{10} Па, они могут ускорять образование наноструктур за счет действия температур и скоростей их роста.

5. Оценки скорости деформирования материала РИ за счет температурных напряжений показывают, что величины скоростей деформирования высоки и при ряде плотностей теплового потока и времени их действия они могут даже непосредственно приводить к образованию наноструктур.

6. Проведенные исследования позволяют с научных позиций выбирать технологические параметры действующего ионизирующего излучения для получения наноструктурных слоев.

7. Показано, что уменьшение размера пятна зоны действия ЛИИ приводит к росту области технологических параметров (плотности теплового потока и времени его действия), что говорит о необходимости получения светолучевых потоков, сфокусированных до долей мкм.

8. Очевидно, что многие процессы, которые реализуются при фемтосекундном действии лазерного излучения, особенно колебательные процессы в обрабатываемом материале, к сожалению, ещё не учиты-

ваются в критериях получения наноструктур, которые необходимо учесть в обобщенном критерии получения наноструктур.

Список литературы

1. Костюк Г. И. Эффективный режущий инструмент с нанопокрывтиями и наноструктурными модифицированными слоями : Монография-справочник: в 2 кн. / Г. И. Костюк. – Х.: Изд-во Планета-принт, 2016. – Кн. 1. Плазменно-ионные и ионно-лучевые технологии. – 735 с.
2. Костюк Г. И. Нанотехнологии: выбор технологических параметров и установок, производительность обработки, физико-механические характеристики наноструктур [Текст]: моногр. / Г. И. Костюк – К.: Изд. центр Междунар. академии наук и инновац. технологий, 2014. – 427 с.
3. Костюк Г. И. Нанотехнологии: теория, эксперимент, техника, перспективы [Текст]: моногр./ Г. И. Костюк. – К.: Изд. центр Междунар. академии наук и инновац. технологий, 2012. – 648 с.
4. Костюк Г. И. Наноструктуры и нанопокрывтия: перспективы и реальность [Текст]: учеб. пособие / Г. И. Костюк. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2009. – 406 с.
5. Костюк Г. И. Эффективные покрытия и модифицированные упрочненные слои на режущих инструментах [Текст]: моногр.-справ. / Г. И. Костюк. – К.: Изд. центр Междунар. академии наук и инновац. технологий, 2012. – 728 с.
6. Костюк, Г. И. Эффективный режущий инструмент с покрытием и упрочненным слоем [Текст]: моногр.-справ. / Г. И. Костюк. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2007. – 633 с.
7. Костюк Г. И. Физико-технические основы нанесения покрытий, ионной имплантации и ионного легирования, лазерной обработки и упрочнения, комбинированных технологий [Текст]: в 2 кн. / Г. И. Костюк. – К.: Изд-во АИНУ, 2002. – 1030 с.
8. Добротворский С. С. Энергетический подход к определению технологических режимов при высокоскоростной обработке / С. С. Добротворский, А.К. Мялица, Е.В. Басова [и др.] // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии : сб. науч. тр. – Харьков : НАУ "ХАИ", 2014. – № 65. – С. 69-74.
9. Гусев А. И. Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии [Текст] / А. И. Гусев. – М.: Физматлит, 2005. – 416 с.
10. Гречихин Л. И. Физика наночастиц и нанотехнологий [Текст] / Л. И. Гречихин. – М.: УП «Технопринт», 2004. – 397 с.
11. Андриевский, Р. А. Наноматериалы: концепция и современные проблемы [Текст] / Р. А. Андриевский // Физика металлов и металловедение. – 2003. – Т. 91, № 1. – С. 50–56.
12. Мелан Э. Температурные напряжения, вызываемые стационарными температурными полями [Текст] / Э. Мелан, Г. Паркус. – М.: Физматгиз, 1968. – 167 с.
13. Паркус Г. Неустановившиеся температурные напряжения [Текст] / Г. Паркус – М.: Физматгиз, 1963. – 251 с.

References (transliterated)

1. Kostyuk G. I. *Effektivnyy rezhushchiy instrument s nanopokrytiyem i nanostrukturnymi modifitsirovannymi sloyami* [Efficient cutter with nano-modified, and nanostructured layers]. Kharkov, Izd-vo Planeta-print, 2016. 735 p.
2. Kostyuk G. I. *Nanotekhnologii: vybor tekhnologicheskikh parametrov i ustanovok, proizvoditel'nost' obrabotki, fiziko-mekhanicheskiye kharakteri-stiki nanostruktur* [Nanotechnology: the choice of process parameters and settings, processing performance, physical and mechanical properties of nanostructures]. Kiev, Izd. tsentr Mezhdunar. akademii nauk i innovats. tekhnologiy, 2014. 427 p.
3. Kostyuk G. I. *Nanotekhnologii: teoriya, eksperiment, tekhnika, perspektivy* [Nanotechnology: theory, experiment, technology and prospects]. Kiev, Izd. tsentr Mezhdunar. akademii nauk i innovats. tekhnologiy, 2012. 648 p.
4. Kostyuk G. I. *Nanostrukturny i nanopokrytyiya: perspektivy i real'nosti'* [Nanostructures and nanocoating: Prospects and Reality] Kharkov, Nats. aero-kosm. un-t «Khark. aviats. in-t», 2009. 406 p.
5. Kostyuk G. I. *Effektivnyye pokrytyiya i modifitsirovannyye uprochnennyye sloi na rezhushchikh instrumentakh* [Effective coverage and modified hardened layers on cutting tools]. Kiev, Izd. tsentr Mezhdunar. akademii nauk i innovats. tekhnologiy, 2012. 728 p.

6. Kostyuk G. I. *Effektivnyy rezhushchiy instrument s pokrytiyem i uprochnennym sloyem* [Effective cutting tool coated with a layer of reinforced], Kharkov, Nats. aero-kosm. un-t «Khark. aviats. in-t », 2007. 633 p.
7. Kostyuk G. I. *Fiziko-tehnicheskiye osnovy naneseniya pokrytiy, ionnoy implantatsii i ionnogo legirovaniya, lazernoy obrabotki i uprochneniya, kombinirovannykh tekhnologiy* [Physical and technical bases of the coating, ion implantation and ion implantation, laser treatment and hardening, combined technologies]. Kiev, AINU, 2002.1030 p.
8. Dobrotvorskyyi S. S., Mialytza A.K., Basova E.V. Energeticheskij podxod k opredeleniyu tekhnologicheskix rezhimov pri vysokoskorostnoj obrabotke [Energy approach to the definition of technological regimes in HSM]. *Kharkov, Nats. aero-kosm. un-t «Khark. aviats. in-t »*, 2014, No 65, pp. 69-74.
9. Gusev A. I. *Nanomaterialy, nanostruktury, nanotekhnologii* [Nanomaterials, nanostructures, nanotechnology]. Moscow, Fizmatlit, 2005. 416 p.
10. Grechikhin L. I. *Fizika nanochastits i nanotekhnologiy* [The physics of nanoparticles and nanotechnology]. Moscow, UP «Tekhnoprint», 2004. 397 p.
11. Andriyevskiy R. A. Nanomaterialy: kontseptsiya i sovremennyye problem [Nanomaterials: concept and modern problems]. *Fizika metallov i metallovedeniye*. 2003, vol. 91, no 1, pp. 50-56.
12. Melan E., Parkus G. *Temperaturnyye napryazheniya, vyzvayemye statsionarnymi temperaturnymi polyami* [Thermal stresses caused by stationary temperature fields]. Moscow, Fizmatgiz, 1968. 167 p.
13. Parkus, G. *Neustanovivshiesya temperaturnyye napryazheniya* [Unsteady thermal stresses]. Moscow, Fizmatgiz, 1963. 251 p.

Поступила (received) 25.03.2016

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Перспективи отримання наноструктур на твердому сплаві ВК-4 за рахунок використання фемто- та пікосекундних лазерів / Г.І. Костюк, О.О. Бруяка, О.М. Мелкозьорова // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. – X. : НТУ «ХПІ», 2016. – № 5 (1177). – С. 5-20. – Бібліогр.: 13 назв. – ISSN 2079-004X.

Перспективы получения наноструктур на твердом сплаве ВК4 за счет использования фемто- и пикосекундных лазеров / Г.И. Костюк, О.О. Бруяка, О.М. Мелкозерова // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. – X. : НТУ «ХПІ», 2016. – № 5 (1177). – С. 5-20. – Бібліогр.: 13 назв. – ISSN 2079-004X.

Prospects for fabricating nanostructures carbide VK4 by uses of femtosecond and picosecond lasers / G.I. Kostyuk , O.O. Bruyaka , O.M. Melkozerova // Bulletin of NTU «KhPI». Series: Technologies in mechanical engineering. – Kharkiv : NTU «KhPI», 2016. – № 5 (1177). – P. 5-20 – Bibliogr.: 13. – ISSN 2079-004X.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Костюк Геннадій Ігорович – доктор технічних наук, професор, професор Національного аерокосмічного університету «Харківський авіаційний інститут», тел.: (057)-788-42-06, e-mail: g.kostyuk206@yandex.ru;

Костюк Геннадий Игоревич – доктор технических наук, профессор, профессор Национального аэрокосмического университета «Харьковский авиационный институт», тел.: (057)-788-42-06, e-mail: g.kostyuk206@yandex.ru;

Kostyuk Gennadiy Igorevich – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, National Aerospace University Zhukovskiy, tel.: (057)-788-42-06, e-mail: g.kostyuk206@yandex.ru;

Бруяка Ольга Олегівна – кандидат технічних наук, доцент, доцент Національного авіаційного університету, м. Київ, тел.: (057)-788-42-06

Бруяка Ольга Олеговна – кандидат технических наук, доцент, доцент Национального авиационного университета, г. Киев, тел.: (057)-788-42-06

Bruiaka Olha Olehovna – Candidate of Technical Sciences, assistant professor, National Aerospace University, Kiev, tel.: (057)-788-42-06;

Мелкозерова Ольга Михайлівна – кандидат технічних наук, асистент Національного аерокосмічного університету «Харківський авіаційний інститут», тел.: (057)-788-42-06, e-mail: Olja.mex@gmail.com;

Мелкозерова Ольга Михайловна – кандидат технических наук, ассистент Национального аэрокосмического университета «Харьковский авиационный институт», тел.: (057)-788-42-06, e-mail: Olja.mex@gmail.com;

Melkozerova Olha Mykhailovna – Candidate of Technical Sciences, assistant, National Aerospace University «KhAI», tel.: (057)-788-42-06, e-mail: Olja.mex@gmail.com.

УДК 621.822.574

В. О. ФЕДОТОВ, І. В. ВІШТАК

РОЗРАХУНОК ХАРАКТЕРИСТИК ГАЗОВОГО ПІДВІСУ ЗІ ЗМІННИМ ЗОВНІШНІМ ДРОСЕЛЕМ ПРИ СКЛАДНІЙ НЕСПІВВІСНОСТІ

В статті розглянуто радіальний газовий підвіс з двома зовнішніми дроселями у вигляді щілин подачі газу, ширина яких автоматично змінюється в залежності від кутових та радіальних переміщень вала, досліджується вплив ширини щілин на його статичні характеристики (кутову та радіальну жорсткості, витрати газу) в діапазоні лінійності відновлювального моменту та підйомної сили від переміщень вала. З'ясувалося, що запропонована конструкція газового підвісу зі змінними зовнішніми дроселями, порівняно з підвісом при фіксованій ширині щілин подачі стиснутого газу, має при $P_H=5,0$ та оптимальних конструктивних параметрах зростання кутової та радіальної жорсткостей до 20% і 70% відповідно, в залежності від кута нахилу щілин подачі газу до осі підвісу та відношення їх ширини до номінального радіального зазору. Витрати газу через робочі зазори підвісів не залежать від типу дроселя.

Ключові слова: радіальний газовий підвіс, дві щілин, змінна ширина щілин, радіальна жорсткість, кутова жорсткість, витрати газу.

Для радиального газового подвеса с двумя внешними дроселями в виде щелей подачи газа, ширина которых автоматически меняется в зависимости от угловых и радиальных перемещений вала, исследуется влияние ширины щелей на его статические характеристики (угловую и радиальную жесткости, расход газа) в диапазоне линейности восстанавливающего момента и подъемной силы от перемещений вала. Установлено, что предложенная конструкция газового подвеса с переменными внешними дроселями, по сравнению с подвесом при фиксированной ширине щелей подачи сжатого газа, имеет при $P_H=5,0$ и оптимальных конструктивных параметрах увеличение угловой и радиальной жесткостей до 20% и 70% соответственно, в зависимости от угла наклона щелей подачи газа к оси подвеса и отношение их ширины к номинальному радиальному зазору. Расход газа через рабочие зазоры подвесов не зависит от типа дроселя.

Ключевые слова: радиальный газовый подвес, две щели, переменная ширина щелей, радиальная жесткость, угловая жесткость, расход газа.

Radial gas suspension with two external reactors as a gas supply slits, the width of which varies automatically according to the angular and radial shaft movements investigate the influence of the width of the slits on its static characteristic (angular and radial stiffness, gas flow) in the linear range of the righting and lift from the shaft displacements. It is found that the proposed design of the gas suspension with variable external reactors as compared with suspension by fixing the width of the compressed gas slots is at $P_H=5.0$ and optimal structural parameters and increase radial stiffness corner to 20% and 70% respectively, depending angle from the gas supply to the axis of suspension of the slits and the ratio of the width to the nominal radial clearance. Gas flow through the working clearances of the suspensions is not dependent on the type of reactor.

Keywords: radial gas suspension, two slots, variable width slots, radial stiffness, angular stiffness, gas consumption.

Вступ.

Широкі технічні можливості шпindelних вузлів на газових підвісах пояснюється фізико-технічною властивістю газу (повітря), що використовується в якості мастила. Але невелика в'язкість та стискання газу вимагає детального дослідження усіх факторів, що впливають на їх роботу. Об'єктивне оцінювання переваг використання газових підвісів в вузлах машин, приборів та верстатах дозволяє уникнути похибок та розчарувань, що можуть виникнути при дослідженні та випробувань реальних зразків. Найбільш широко газові підвіси використовуються в прецизійних приладах, при роботі яких практично відсутні динамічні навантаження (кругломіри, профілометри, прилади для точного контролю та перевірки тиску газу тощо), а статичні змінюються в межах заданих параметрів. Надійність газових підвісів залежить від відповідності розрахункових значень підйомної сили, моменту реакції та жорсткості робочого газового шару зовнішнім навантаженням, а економічність – від витрат газу. Інженери та науковці постійно ведуть пошук конструкцій та методів розрахунку газових підвісів з максимальними силовими характеристиками при мінімальних витратах газу. Це досягається використанням зовнішніх дроселів [1 – 5] (ланцюжок отворів малого діаметра, щілин подачі газу, пористі вставки), комбінації зовнішнього та внутрішнього дроселювання потоку газу [3, 4] Перспективним напрямком поліпшення статичних характеристик газових підвісів є викори-

стання змінного зовнішнього дроселя [6, 7], що реагує на зміну зовнішнього навантаження. Але розрахунок таких підвісів практично відсутній в наукових часописах.

Основна частина.

Метою роботи є розрахунок статичних характеристик (підйомної сили, відновлювального моменту при кутових переміщеннях валу підвісу, жорсткості та витрат газу) газового підвісу з двома лініями подачі газу в робочі зазори та змінним зовнішнім дроселем при складній неспіввисності.

Під дією сили F_H та ваги валу P , вал (рис. 1) переміщується в радіальному напрямку на величину e (радіальний ексцентриситет) і повертається на кут ν , а рухома втулка переміщується на e_1 та ν_1 відповідно.

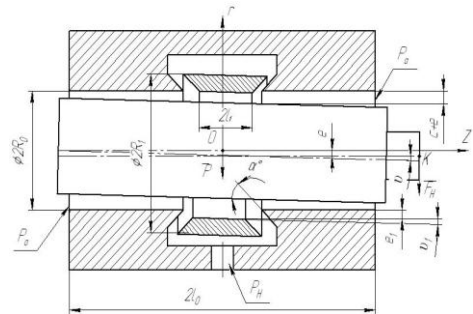


Рис. 1 – Газовий підвіс з двома щілинами подачі газу при складній неспіввисності

Зовнішні сили $F_0^e = P + F_H$ та момент $M_0^e = F_H \cdot OK$ зрівноважуються підйомною силою газового підвісу F та відновлювальним моментом M .

© В. О. Федотов, І. В. Віштак, 2016

$$F = 4R_0^2 p_a F^*, \quad M = 4R_0^3 p_a M^*,$$

$$F^* = \lambda \left(\int_0^{\alpha_1} d\xi \int_0^\pi \sqrt{u_1} \cos \varphi d\varphi + \int_{\alpha_1}^1 d\xi \int_0^\pi \sqrt{u_2} \cos \varphi d\varphi \right), \quad (1)$$

$$M^* = \lambda^2 \left(\int_0^{\alpha_1} \xi d\xi \int_0^\pi \sqrt{u_1} \cos \varphi d\varphi + \int_{\alpha_1}^1 \xi d\xi \int_0^\pi \sqrt{u_2} \cos \varphi d\varphi \right). \quad (2)$$

де p_a – тиск в оточуючому підвісі середовищі;

$$u_1 = \frac{P_1^2}{P_a^2} \quad (0 \leq \xi \leq \alpha_1),$$

– квадрат безрозмірного

$$u_2 = \frac{P_2^2}{P_a^2} \quad (\alpha_1 \leq \xi \leq 1)$$

тиску в робочих зазорах підвісу;

$\lambda = l/R_0$ – відносна довжина підвісу;

$\alpha_1 = l_1/l$ – відносний інтервал між лініями подачі

газу;

$\xi = z/l$ – безрозмірна осьова координата;

φ – кут, що відраховується по колу валу від напівпрямой, що проходить через точку O (рис. 1) та мінімальний робочий зазор.

Дослідження та розрахунки [1, 3, 4] показали, що безрозмірна підйомна сила F^* та безрозмірний відновлювальний момент M^* лінійно залежать від відносно-го радіального $\varepsilon = e/c$ та кутового $\theta = e_\kappa/c$ ($e_\kappa = l_0 \cdot v$ – ексцентриситет на торці валу при $e=0$, $v \neq 0$) переміщень вала в межах: $-0,5 \leq \varepsilon \leq 0,5$; $-0,5 \leq \theta \leq 0,5$. Тоді безрозмірна підйомна сила F^* та безрозмірний відновлювальний момент M^* газового шару підвісу знаходяться з наступних залежностей

$$F^* = K_\varepsilon^* \varepsilon + K_{\varepsilon\theta}^* \theta, \quad M^* = K_\theta^* \theta + K_{\theta\varepsilon}^* \varepsilon, \quad (3)$$

$$K_\varepsilon^* = \frac{\partial F^*}{\partial \varepsilon},$$

де $K_{\varepsilon\theta}^* = \frac{\partial F^*}{\partial \theta}$, – безрозмірні величини (коефіцієнти)

$$K_\theta^* = \frac{\partial M^*}{\partial \theta},$$

$$K_{\theta\varepsilon}^* = \frac{\partial M^*}{\partial \varepsilon}$$

матриці жорсткості [1], що знаходяться при $\varepsilon = \theta = 0$.

Для симетричних газових підвісів вплив радіальних переміщень на відновлювальний момент M , а кутових – на підйомну силу F практично дорівнює нулю [1, 4] і тому:

$$K_{\varepsilon\theta}^* = 0, \quad K_{\theta\varepsilon}^* = 0. \quad (4)$$

При наявності рухомого зовнішнього дротеля (рис. 1) із (3), враховуючи (4), безрозмірні статичні характеристики підвісу будуть знаходитися з виразів:

$$F^*(\varepsilon, \varepsilon_1) = K_\varepsilon^* \varepsilon, \quad M^*(\theta, \theta_1) = K_\theta^* \theta, \quad (5)$$

де $\varepsilon_1 = e_1/c$, $\theta_1 = l_1 \cdot v_1/c$ – безрозмірні радіальне та кутове переміщення втулки.

Безрозмірна радіальна жорсткість та витрати газу. Так як радіальний підвіс (рис. 1) симетричний, то для визначення статичних характеристик достатньо

розглянути одну половину підвісу і отримати результати подвоїти.

Квадрат тиску u_i на трьох ділянках газового шару підвісу запишуться [3, 4]:

$$u_0 = P_H^2 - f(\varphi) \ln \frac{R_1}{r},$$

$$u_1 = a_{01} + a_{12}\xi + (a_{11}e^{\lambda\xi} + a_{12}e^{-\lambda\xi}) \cos \varphi, \quad (6)$$

$$u_2 = b_{01} + b_{02}\xi + (b_{11}e^{\lambda\xi} + b_{12}e^{-\lambda\xi}) \cos \varphi,$$

де $u_0 = \frac{P_0^2}{P_a^2}$ – квадрат безрозмірного тиску в щілині

подачі газу;

$$P_H^2 = \frac{P_H^2}{P_a^2} \quad \text{– квадрат безрозмірного тиску від}$$

зовнішнього джерела живлення (компресора).

Локальні масові витрати газу на трьох ділянках газового підвісу [4, 6]:

$$\Delta Q_{r_0} = -\frac{kp_a^2 h^3}{24\mu} r \frac{\partial u_0}{\partial r} \sin \alpha \cdot d\varphi,$$

$$\Delta Q_{\xi_1} = -\frac{kp_a^2 h_1^3}{24\mu\lambda} \frac{\partial u_1}{\partial \xi} \cdot d\varphi, \quad (7)$$

$$\Delta Q_{\xi_2} = -\frac{kp_a^2 h_2^3}{24\mu\lambda} \frac{\partial u_2}{\partial \xi} \cdot d\varphi,$$

де $h = \delta_0(1 + \varepsilon_1 \beta \cos \alpha \cdot \cos \varphi)$ – зазор в щілині подачі газу;
 δ_0 – номінальний зазор в щілині при $\varepsilon = \varepsilon_1 = v = v_1 = 0$;

$\beta = \delta_0/c$ – відносна номінальна ширина щілини;

$h_1 = c(1 - (\varepsilon + \varepsilon_1) \cos \varphi)$ – радіальний зазор між валом та внутрішньою поверхнею рухомої втулки ($0 \leq \xi \leq \alpha_1$);

$h_2 = c(1 - \varepsilon \cos \varphi)$ – радіальний зазор між валом та корпусом підвісу;

k – відношення густини газу до тиску при температурі шару;

μ – динамічний коефіцієнти в'язкості.

Постійні a_{ij} , b_{ij} та функція $f(\varphi)$ (6) знаходяться з наступних умов

$$u_0(R_0, \varphi) = u_1(\alpha_1, \varphi), \quad u_1(\xi, \varphi) = u_1(-\xi, \varphi),$$

$$u_1(\alpha_1, \varphi) = u_2(\alpha_1, \varphi), \quad u_2(1, \varphi) = 1, \quad (8)$$

$$\Delta Q_{\xi_2}(\alpha_1, \varphi) - \Delta Q_{\xi_1}(\alpha_1, \varphi) = -\Delta Q_{r_0}(R_0, \varphi).$$

Далі, із формули (1) визначаємо безрозмірну радіальну жорсткість K_ε^* (5) підвісу.

$$K_\varepsilon^* = \frac{3}{4} \pi \psi \left(\left(\tau(\gamma + \beta(P_H^2 + \gamma) \cos \alpha) + \left(\gamma + (P_H^2 + \gamma) \cos \alpha \right) + \int_{\alpha_1}^1 \frac{sh\lambda(1-\xi)d\xi}{\sqrt{1 + \frac{\tau_2}{1-\alpha_1}(1-\xi)}} \right) \right), \quad (9)$$

де $\psi = \frac{c^3 \ln(R_1/R_0)}{\delta_0^3 \lambda (1 - \alpha_1) \sin \alpha}$ – параметр щілини подачі стиснутого газу;

$$\tau = \frac{sh(\lambda\alpha_1) \cdot sh\lambda(1-\alpha_1)}{\sqrt{\tau_2}}$$

$$\tau_1 = \lambda ch\lambda\alpha_1;$$

$$\tau_2 = \frac{P_H^2 - 1}{1 + \psi};$$

$$\gamma = 1 + \frac{\tau_2}{\psi\lambda \cdot ch\lambda(1-\alpha_1) + ch\lambda\alpha_1 \cdot sh\lambda(1-\alpha_1)}$$

Витрати газу Q для роботи газового підвісу.

$$Q = \frac{\pi k p_a^2 c^3}{12\mu} \cdot Q^*, \quad Q^* = \frac{2(P_H^2 - 1)}{\lambda(1-\alpha_1)(1+\psi)}. \quad (10)$$

Безрозмірна кутова жорсткість підвісу. При малих значеннях кута повороту вала квадрата тиску газу u_1 та u_2 в робочих зазорах підвісу задовольняють рівнянню [4, 5]:

$$\frac{\partial^2 u_i}{\partial \xi^2} - 3\theta_i \frac{\partial u_i}{\partial \xi} \cos \varphi + \lambda^2 \left(\frac{\partial^2 u_i}{\partial \varphi^2} + 3\theta_i \xi \frac{\partial u_i}{\partial \varphi} \cdot \sin \varphi \right) = 0.$$

Еліптичні рівняння не мають точних аналітичних розв'язків, але при малих θ_i можна представити асимптотично наближені формули для функцій u_1 та u_2 [4, 5]:

$$u_1 = c_{01} + c_{02}\xi + \left(\begin{matrix} c_{11}e^{\lambda\xi} + \\ + c_{12}e^{-\lambda\xi} - \\ - c_{02} \frac{3(\theta + \theta_1)}{\lambda^2} \end{matrix} \right) \cos \varphi,$$

$$u_2 = d_{01} + d_{02}\xi + \left(\begin{matrix} d_{11}e^{\lambda\xi} + \\ + d_{12}e^{-\lambda\xi} - d_{02} \frac{3\theta}{\lambda^2} \end{matrix} \right) \cos \varphi.$$

Рівняння для квадрату тиску u_0 в щілині подачі газу в робочі зазори підвісу та формули локальних втрат газу мають такий же вигляд (6) та (7) відповідно, як і при $\varepsilon \neq 0$, якщо:

$$h = \delta_0(1 + \theta_1 \beta \cos \alpha \cdot \cos \varphi),$$

$$h_1 = c(1 - (\theta + \theta_1)\xi \cdot \cos \varphi),$$

$$h_2 = c(1 - \theta\xi \cdot \cos \varphi).$$

Умови (8) для квадратів тиску u_1 і u_2 та нерозривності течії газу на границі щілини подачі газу та робочого зазору залишаються без змін за виключенням умови, що відображає дзеркальну симетрію функції $u_1(\xi, \varphi)$ відносно площини $\xi=0$: $u_1(\xi, \varphi) = u_1(-\xi, \varphi + \pi)$.

Після визначення сталих c_{ij} та d_{ij} , що входять в функції $u_1(\xi, \varphi)$ і $u_2(\xi, \varphi)$, з виразу (2) знаходимо безрозмірну кутову жорсткість K_θ^* підвісу в діапазоні лінійності $M^*(\theta, \theta_1)$

$$K_\theta^* = \frac{3}{4} \pi \frac{(P_H^2 - 1)(A\tau_3(1 + \beta\psi_0 \cos \alpha))}{\alpha_1} + (1 + \psi_0 \cos \alpha) \cdot \int_0^{\alpha_1} \frac{sh\lambda(1-\alpha_1) + A_1 sh\lambda(1-\xi) - sh\lambda(\xi - \alpha_1)}{(1+\psi)(1-\alpha_1)\sqrt{1+\tau_4(1-\xi)sh\lambda(1-\alpha_1)}} \xi.$$

$$\psi_0 = \frac{1+\psi}{1+2\psi},$$

де $A = \frac{\psi(\lambda\alpha_1 sh\lambda(1-\alpha_1) + ch\lambda(1-\alpha_1) - 1)}{\lambda(\psi\lambda(1-\alpha_1)sh\lambda + sh\lambda\alpha_1 sh\lambda(1-\alpha_1))}$,

$$\tau_3 = \frac{\lambda\alpha_1 ch\lambda\alpha_1 - sh\lambda\alpha_1}{\sqrt{(P_H^2 + \psi)(1+\psi)}}, \quad \tau_4 = \frac{P_H^2 - 1}{(1+\psi)(1-\alpha_1)},$$

$$A_1 = A\lambda^2(1-\alpha_1)sh\lambda\alpha_1 - 1.$$

Масові Q та безрозмірні Q^* витрати газу при кутових переміщеннях вала знаходяться з виразів (10).

У підвісу (рис. 1) при фіксованому положенні щілини подачі газу α_1 , існує оптимальне значення параметра ψ при якому безрозмірна радіальна жорсткість K_ε^* буде максимальна. При збільшенні відстані між щілинами (l_1 наближається до l_0) зростає K_ε^* , але при цьому значно зростають безрозмірні витрати газу Q^* і зменшується відношення K_ε^*/Q^* . Так при $P_H=0,6$; $\lambda=2,0$; $\alpha=90^\circ$ і $\alpha_1=0,4$ відношення $K_\varepsilon^*/Q^*=0,18$, а якщо $\alpha_1=0,5$ – $K_\varepsilon^*/Q^*=0,13$, (значення параметра ψ були оптимальними в розглянутих випадках). Розрахунки показали, що при відносно невеликих витратах стиснутого газу найбільші безрозмірні радіальну та кутову жорсткості, а значить і підйомну радіальну силу та відновлювальний момент, забезпечують такі значення безрозмірних параметрів ψ і α_1 при яких одночасно виконуються умови

$$\frac{\partial K_\varepsilon^*}{\partial \psi} = 0, \quad \frac{\partial}{\partial \alpha_1} \cdot \frac{K_\varepsilon^*}{\sqrt{Q^*}} = 0 \quad (n = 2, 3) \quad [4, 5] \quad (\text{табл. 1}).$$

Як маємо з табл. 1 оптимуму більшого порядку відповідає більший інтервал між щілинами подачі газу, збільшенню кутової та радіальної безрозмірних жорсткостей і витрат стиснутого газу.

Таблиця 1 – Оптимальні значення параметрів α_1 і ψ та відповідні їм значення безрозмірної радіальної K_ε^* та кутової K_θ^* жорсткостей і безрозмірних витрат Q^* газу при $P_H=5,0$.

λ	α	α_1	ψ	K_ε^*	K_θ^*	Q^*
Оптимум другого порядку (n=2)						
1	$\pi/2$ ($\delta=\delta_0$)	0,181	1,436	2,28	0,49	24,07
2		0,286	1,059	3,01	1,89	16,33
3		0,380	0,851	3,02	3,77	13,94
1	$\pi/4$ ($\beta=1$)	0,181	2,031	3,87	0,59	24,07
2		0,286	1,485	5,21	2,32	16,33
3		0,380	1,204	5,10	4,49	13,94
1	$\pi/4$ ($\beta=0,5$)	0,181	2,031	3,41	0,56	24,07
2		0,286	1,485	4,92	2,27	16,33
3		0,380	1,204	4,73	4,32	13,94
Оптимум третього порядку (n=3)						
1	$\pi/2$ ($\delta=\delta_0$)	0,362	1,457	2,51	0,59	30,62
2		0,433	1,105	3,31	2,22	20,10
3		0,528	0,944	3,38	4,51	17,45
1	$\pi/4$ ($\beta=1$)	0,362	2,060	4,05	0,72	30,62
2		0,433	1,563	5,32	2,68	20,10
3		0,528	1,335	5,41	5,40	17,45

Висновки. Газовий радіальний підвіс з двома щілинами подачі газу, ширина яких змінюється в залежності від зовнішнього навантаження при оптимальних значеннях відносного положення щілин α_1 та параметра дреселя ψ , має збільшення безрозмірної радіальної та кутової жорсткості в діапазоні лінійнос-

ті підйомної сили від радіального переміщення вала та відновлювального моменту при кутових переміщеннях вала, порівняно з підвісом, у якого ширина щілини подачі газу стала ($\delta = \delta_0 = \text{const}$) Так при $P_H = 5,0$ і $\alpha = \pi/4$ безрозмірна радіальна жорсткість K_c^* (безрозмірна підйомна сила $F^* = K_c^* \cdot \varepsilon$), безрозмірна кутова жорсткість (безрозмірний відновлювальний момент $M^* = K_\theta^* \cdot \theta$) зростають до 70% і 20% відповідно, в залежності від кута нахилу щілини подачі газу до осі підвісу і відношення ширини щілин до номінального радіального зазору. Враховуючи, що витрати стиснутого газу через робочі зазори підвісів із різними типами дроселів практично однакові, то із зростанням силових статичних характеристик підвісу зі змінним дроселем значно покращуються його економічні показники (відношення K_c^*/Q^* та K_θ^*/Q^*).

Список літератури

1. Пинегин С. В. Статические и динамические характеристики газостатических опор / С. В. Пинегин, Ю. Б. Табачников, И. Е. Сипенков. – М.: Наука, 1982. – 265 с.
2. Ревкач М. В. Розрахунок та оптимізація двосторонньої плоскої пористої прямокутної газостатичної опори великого видовження / М. В. Ревкач, В. І. Степанчук, В. О. Федотов // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 1994. – № 4(5). – С. 38–40.
3. Емельянов А. В. Характеристики радиальных газостатических опор с двойным дроселированием газового потока / А. В. Емельянов, В. А. Федотов, В. А. Приятельчук // Машиноведение. – 1977. – № 2. – С. 97 – 104.
4. Федотов В. О. Газові підвіси шпиндельних вузлів : монографія / В. О. Федотов, І. В. Федотова. – Вінниця: ВНТУ, 2010. – 244 с. ISBN 978-966-641-362-1.
5. Емельянов А. В. Оптимальные параметры и сравнительные характеристики радиальных подвесов с непрофилированными рабочими поверхностями / А. В. Емельянов, В. А. Приятельчук, А. В. Шевченко // Машиноведение. – 1978. – № 6. – С. 81 – 89.

6. Емельянов А. В., Федотов В. О. (СРСР) А. с. 1139913, МКУ F 16 С 32 / 06. Газостатический подшипник / А. В. Емельянов, В. А. Федотов – 1985.
7. Федотов В. О. Вплив активного дроселя на характеристики газових підшипників / В. О. Федотов, А. А. Кашканов // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 1994. – № 2 (3). – С. 65 – 67.

References (transliterated)

1. Pinegin S. V., Tabachnikov Y. B., Sipekov I. E. *Sticheskie i dinamicheskie harakteristiki gazostaticheskikh opor* [Static and dynamic characteristics of gas-static supports]. Moscow, Nauka Publ, 1982., 265 p.
2. Revkach M. V., Stepanchuk V. I., Fedotov V. O. Rozrahunok ta optymizacia dvostoronnoy ploskoi porystoi prymokutnoi gazostatichnoi opory velykogo vydovgennia [Calculation and optimization of bilateral flat rectangular porous gas-static support large elongation]. *Visnyk VPI* [Bulletin of the Vinnytsia National Technical University]. Vinnytsia, VNTU Publ., 1994, no.4 (5), pp.38–40.
3. Emelianov A. V., Fedotov V. A., Priatelichuk V. A. Harakteristiki radialnykh gazostaticheskikh opor s dvoynym drosselirovaniem gazovogo potoka [The characteristics of the radial gas-static supports dual throttling of the gas flow]. *Mashinovedenie* [Engineering] Publ., 1977, no. 2, pp. 97 – 104.
4. Fedotov V. O., Fedotova I. V. *Gazovi pidvicy shpyndelinykh vuzliv: monografiya* [Gas supports spindle units: monograph]. Vinnytsia: VNTU, 2010, 244 p.
5. Emelianov A. V., Priatelichuk V. A., Shevchenko A. V. Optimalnyye parametry i sravnitelnyye harakteristiki radialnykh podvesov s neprofilovanyimi rabochimi poverhnostiami [The optimal parameters and comparative characteristics of radial supports with a profiled working surfaces]. *Mashinovedenie* [Engineering] Publ., 1978, no 6, pp. 81 – 89.
6. A. V. Emelianov, V. A. Fedotov (USSR) *Gazostaticheskii podshypnik* [Gas-static bearing]. A. s. no. 3572750, 1985.
7. Fedotov V. O., Kashkanov A. A. Vplyv aktyvnogo droseliy na harakterystyky gazovykh pidshypnykiv [The impact of active throttle on the characteristics of the gas bearing]. *Visnyk VPI*. [Bulletin of the Vinnytsia National Technical University]. Vinnytsia, VNTU Publ., 1994, no. 2 (3), pp. 65 – 67.

Поступила (received) 27.03.2015

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Розрахунок характеристик газового підвісу зі змінним зовнішнім дроселем при складній неспіввідповідності / В. О. Федотов, І. В. Виштак // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. – Х.: НТУ «ХПІ», 2016. – №. 5 (1177) С.21–24. – Бібліогр.: 7 назв. – ISSN 2079-004X.

Расчет характеристик газового подвеса с переменным внешним дроселем при сложной несоосности / В. А. Федотов, И. В. Виштак // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. – Х.: НТУ «ХПІ», 2016. – №. 5 (1177) С. 21–24. – Бібліогр.: 7 назв. – ISSN 2079-004X.

Calculation of the characteristics of the gas suspension with variable external inductor in a complex misalignment / V. O. Fedotov, I. V. Vishtak // Bulletin NTU «KhPI». Series: Technologies in mechanical engineering. – Kharkiv. : NTU «KhPI», 2016. – No 5 (1177) . – P.21–24. – Bibliogr.: 7. – ISSN 2079-004X.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Федотов Валерій Олександрович – канд. техн. наук, доцент кафедри Опору матеріалів та прикладної механіки, Вінницький національний технічний університет, тел.: (0432)-598-072, e-mail: valeriy.fedotov@bk.ru

Федотов Валерій Олександрович - канд. техн. наук, доцент кафедри сопроотивлення матеріалів и прикладной механіки, Винницький національний технічний університет, тел. : (0432) -598-072, e-mail: valeriy.fedotov@bk.ru

Fedotov Valeriy Oleksandrovych – Candidate of Technical Sciences, Professor of Department of Strength of Materials and Applied Mechanics, the Vinnytsya National Technical University, (0432)-598-072, e-mail: valeriy.fedotov@bk.ru

Виштак Інна Вікторівна – канд. техн. наук, асистент кафедри Безпеки життєдіяльності, Вінницький національний технічний університет, тел.: (097)-896-61-13, e-mail: innavish322@gmail.com

Виштак Інна Вікторівна - канд. техн. наук, ассистент кафедры Безопасности жизнедеятельности, Винницький національний технічний університет, тел. : (097) -896-61-13, e-mail: innavish322@gmail.com

Vishtak Inna Viktorivna – Candidate of Technical Sciences, Assistant of Department of Life Safety, the Vinnytsya National Technical University, tel.: (097)-896-61-13; e-mail: innavish322@gmail.com

УДК 622.24.051.55

*Р.С. ЯКИМ, А.М. СЛІПЧУК***КОНСТРУКТОРСЬКО-ТЕХНОЛОГІЧНІ ПІДХОДИ У ВИЗНАЧЕННІ ОПТИМАЛЬНОГО РОЗМІЩЕННЯ ЗУБКІВ НА ВІНЦЯХ ШАРОШОК ТРИШАРОШКОВИХ БУРОВИХ ДОЛІТ**

Дослідження має на меті вирішення проблеми підвищення якісних показників вставного породоруйнівного оснащення шарошок тришарошкових бурових доліт. Дослідження проводились в умовах реального виробництва бурових доліт, за умов математичного планування експериментів, комплексним застосуванням експериментальних лабораторних, стендових і натурних експлуатаційних випробовувань. Теоретично і експериментально обґрунтовано розроблені підходи у вдосконаленні комплексного підвищення якісних показників вставного породоруйнівного оснащення шарошок бурових доліт на етапах проектування, конструювання і виготовлення. Розв'язано задачу визначення напруженого стану у шарошці при роботі та встановлення граничного значення кількості зубків, що враховується умовами експлуатації та конструкторсько-технологічні параметри спряжених поверхонь.

Ключеві слова: вставні породоруйнівні зубки, натяг, з'єднання „зубок-шарошка”, напруження у шарошці.

Исследование имеет целью решения проблемы повышения качественных показателей вставного породоразрушающего оснащения шарошек тришарошковых буровых долот. Исследования проводились в условиях реального производства буровых долот, в условиях математического планирования экспериментов, комплексным применением экспериментальных лабораторных, стендовых и натурных эксплуатационных испытаний. Теоретически и экспериментально обосновано и разработаны подходы в совершенствовании комплексного повышения качественных показателей вставного породоразрушающего оснащения шарошек буровых долот на этапах проектирования, конструирования и изготовления. Решена задача определения напряженного состояния в шарошке при работе и установлении предельного значения количества зубков, что учитывается условиями эксплуатации и конструкторско-технологические параметры сопряженных поверхностей.

Ключевые слова: вставные породоразрушающие зубки, натяжение, соединение "зубок-шарошка", напряжение в шарошке.

The study aims to address the problem of improving quality indicators embedded rock cutting equipment cutters drill bits. The study was conducted in a real production drilling bits, in terms of mathematical planning of experiments using complex experimental laboratory, bench and field operational tests. Theoretically and experimentally proved developed approaches to improve the comprehensive improvement of quality indicators embedded rock cutting equipment cutters drill bits during the design, construction and manufacturing. The problem of determining the stress state in drill bit at work and setting limit the number of cloves, which takes into account the operating conditions and design-technological parameters conjugated surfaces.

Keywords: rock cutting false teeth, tension, connection "clove-rolling cutter", tensions cutters drill bits.

Вступ. Ефективність буріння тришарошковими буровими долотами у більшості визначається якісними показниками породоруйнівного оснащення. Для буріння твердих, твердих абразивних, міцних та особливо міцних гірських порід шарошки таких доліт виконуються з вставним породоруйнівним оснащенням – твердосплавними зубками. Породоруйнівне оснащення шарошок доліт працює у вкрай важких умовах за дії високих динамічних навантажень, корозивних абразивних середовищ, підвищення температури тощо. У результаті породоруйнівне оснащення зазнає руйнувань через: абразивний знос, тріщиноутворення й відколювання фрагментів шарошки чи породоруйнівних зубків, випадання твердосплавних вставок тощо. Одночасно якісні показники вставного породоруйнівного оснащення шарошок мають першочергове значення, не тільки з огляду на високі експлуатаційні вимоги до тришарошкових бурових доліт, а й на їх собівартість, зумовлену застосуванням цінних матеріалів. Це ставить комплекс вимог до матеріалів, конструкції, технології виготовлення породоруйнівного оснащення доліт. Зауважимо, що ці вимоги досить важко, а подекуди неможливо задовольнити одночасно. Тому існує проблема підвищення якісних показників вставного породоруйнівного оснащення шарошок бурових доліт яка вирішується різними шляхами.

Основна частина.

За останні роки проблемі вдосконалення і підвищення довговічності вставного породоруйнівного оснащення приділено велику увагу в роботах [1-13] та ін. Значна частина досліджень присвячена

розв'язанню проблеми підбору і розробки матеріалів для вставних зубків [1-3] та ін. Відомі роботи з розробки технології виготовлення комбінованих зубків [4, 5]. За останні роки розроблено основні підходи до вдосконалення конструкції вставного породоруйнівного оснащення з метою підвищення ефективності буріння [6-9]. Сьогодні також багато уваги приділяється вдосконаленню технології пресування твердосплавних зубків у шарошки [8-12]. Аналіз цих, та багатьох інших робіт, а також вивчення практики виготовлення тришарошкових бурових доліт на долотних заводах показує, що проблему необхідно вирішувати комплексно. Тут добре зарекомендував себе процесний підхід [9, 14, 15, 16], який дозволяє на довиробничих і виробничих етапах вирішувати широкий спектр задач з єдиних позицій множин конструкторських, технологічних, функціонально-експлуатаційних, економічних показників якості. Тим не менше існує низка ще не вирішених взаємопов'язаних задач оптимізації фізико-механічних, конструкторсько-технологічних параметрів з'єднання „зубок-шарошка”, а також вдосконалення технологічних процесів формоутворення отворів під хвостовики твердосплавних зубків і складальних операцій. Залишаються дискусійними також питання конструктивної досконалості хвостовиків вставних зубків.

Виходячи з вище викладеного, ціллю даного дослідження є вдосконалення комплексного підходу у підвищенні якісних показників вставного породоруйнівного оснащення шарошок тришарошкових бурових доліт на етапах проектування, конструювання і виго-

© Р.С. Яким, А.М. Сліпчук, 2016

товлення. Відтак задача дослідження полягає у підвищенні довговічності вставного твердосплавного оснащення вдосконаленням методу вибору натягу у з'єднанні „зубок-шарошка” залежно від фізико-механічних показників матеріалів та конструкторсько-технологічних параметрів спряжених поверхонь.

Вирішення окресленої задачі дослідження здійснювали на базі ТОВ „УніБурТех” яке спеціалізується на виготовленні тришарошкових бурових доліт. Шарошки доліт виготовляли за існуючою заводською технологією з долотних сталей, що піддаються хіміко-термічній обробці на основі цементації, гартування, відпуску. Формоутворення отворів здійснювали на верстаті моделі MCV500 згідно існуючої технології, яка докладно описана в [15].

Встановлення геометричних розмірів отворів застосовується пневмокомпаратор „Western L-10”, що забезпечує допуск 0,05мм на діаметр статистичної групи вимірювання. Цей прилад призначений для неконтактного заміру діаметрів отворів з точністю до 2,5мкм. Діаметри зубків вимірювали за допомогою горизонтального проекційного оптиметра ОГЭ-1, шкала якого має ціну поділки рівну 1мкм.

Якість твердосплавних зубків оцінювали неруйнівним контролем партій твердосплавних зубків вимірюванням коерцетивної сили магнітометричним методом із застосуванням приладу ИКС-968 (рис. 1). Суть методу полягає у намагнічуванні твердосплавного зубка в постійному магнітному полі до стану магнітного насичення і вимірювання напруги зворотного напрямку, необхідного для повного розмагнічування зубка. Дані вимірювань коерцетивної сили звіряють з еталонними значеннями, встановленими для різних твердих сплавів.



Рис. 1 – Прилад ИКС-968 і випробувані на коерцетивну силу твердосплавні зубки

Застосовуючи стандартні методики встановлювали якість розподілу твердості та показники мікроструктури на спеціально підготовлених темплетях з шарошки (рис. 2) вивчали якість отворів під вставки і з'єднання „зубок-шарошка”.

Пресування зубків у тіло шарошки здійснювали за допомогою спеціального заводського устаткування згідно методики описаної в [15].

Аналізом встановлено, що фізико-механічні показники матеріалів шарошок і вставних зубків, а також технологія виготовлення отворів, конструктивні параметри спряжених поверхонь визначають характер пошкоджень і руйнувань породоруйнівного оснащення. Зокрема, при недостатній міцності вінців шарошки відбувається оголення вставних зубків і їх випадання. У випадку високої крихкості шарошок спостерігається відколювання фрагментів вінців та зубків. Одночасно зауважено різний характер руйнування твердосплавних вставних зубків. Це пояснюється неоптимальним натягом у спряженні з'єднання „зубок-шарошка” [9, 11, 13].

Виходячи з відомих формул опору матеріалів нерухомість пресового з'єднання забезпечується створенням натягу з відповідним розподілом напружень в тілі зубка і спряжених шарах тіла шарошки. Тому вплив механічних показників матеріалів зубка та шарошки на величину сил контактного зв'язку і натяги в з'єднанні оцінювали на основі відомих формул Ляме:

$$P_k = \frac{N}{d_3} \left(\frac{1 - \mu_3}{E_3} + \frac{1 + \mu_{ш}}{E_{ш}} \right)^{-1}, \quad (1)$$

де: d_3 – діаметр зубка (мм);

N – величина натягу при посадці зубка в шарошку (мм);

μ_3 – коефіцієнт Пуассона для матеріалу хвостовика зубка (для твердого сплаву 0,24),

$\mu_{ш}$ – коефіцієнт Пуассона для сталі шарошки (0,3);

E_3 – модуль пружності для матеріалу хвостовика зубка ($5,6 \cdot 10^5$ МПа);

$E_{ш}$ – модуль пружності для матеріалу шарошки.



Рис. 2 – Темплети для лабораторних досліджень

Висота спряженої поверхні з'єднання „зубок-шарошка” дорівнює $(0,8-1,0)d_3$. У конструкціях породоруйнівного оснащення для доліт типу ОК найбільша частина хвостовика контактує з серцевиною шарошки, менша – з тілом вінця (рис. 3). У такому випадку напружений стан тіла вінця і шарошки будуть відмінними. У долотах типу ТКЗ практично весь хвостовик зубка контактує з серцевиною вінця шарошки.

Після складання з'єднання, у матеріалах спряжених деталей створюються такі напруження (σ_r – радіально-стискаючі, σ_τ – тангенціальні, σ_z – поздовжньо-осьові), які визначають зусилля випресування зубка (p_B) за дії реакції вибою (R_B) (рис. 5). Відповідно напруження в з'єднанні визначаються згідно формул (табл. 1). Тут r_3 – радіус зубка, r_i – радіус від осі симетрії посадки до розглядуваної точки, f – коефіцієнт тертя зубка до стінки отвору в шарошці.

Напруження в тілі вінця шарошки

$$\sigma_\tau = -\sigma_r = p_k \frac{r_3^2}{r_i^2}, \quad \sigma_z = -f\sigma_r = fp_k \frac{r_3^2}{r_i^2} \quad (2)$$

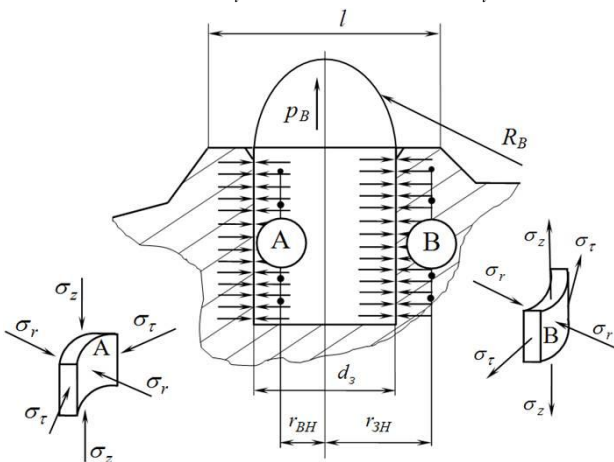


Рис. 3 – Схеми напружень і зусиль що визначають надійність з'єднання зубка і шарошки на вінці шарошки

Напруження в тілі хвостовика зубка

$$\sigma_\tau = \sigma_r = -p_k, \quad \sigma_z = -fp_k \quad (3)$$

Оскільки коефіцієнт тертя дає можливість врахувати вплив геометричних параметрів і жорсткості елементів з'єднання на несучу здатність і міцність з'єднання, при розрахунках прийнято $f = 0,1 \div 0,15$. При цьому можливі підвищення коефіцієнта тертя вище вказаних значень будуть сприятливо впливати на підвищення запасу надійності з'єднання. Для розрахунків ми приймали $f = 0,1$.

З виразів головних напружень (табл. 1) видно, що тіло зубка є у стані стиснення, а тіло шарошки зазнає напруження стиску (σ_r) і напруження розтягу (σ_z, σ_τ). Оскільки робоча поверхня зубка вільна від дії цих напружень, то після посадки створюється

пружне переміщення зубка вздовж своєї осі. Це спричинює виникнення повздовжніх напружень стиску в тілі зубка і розтягу в тілі шарошки. Значення цих напружень у основному визначаються коефіцієнтом тертя між тілом зубка і шарошки.

Отже, згідно тих же відомих положень опору матеріалів встановлювали вимоги до величини натягу для нашого випадку. Для цього застосовано теорію міцності про питому потенціальну енергію зміни форми, де два напружених стани є однаково небезпечними, якщо кількість потенціальної енергії зміни форми, що накопичується в одиниці об'єму, для них однакова. Відповідно до цього є однакова небезпека двох напружених станів – складного та одноосевого, для яких розрахунково-еквівалентне напруження $\sigma_{EKВ}$ має вигляд:

$$\sigma_{\text{АЕА}}^i = \left(\frac{1}{2} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2] \right)^{\frac{1}{2}} \leq [\sigma_D]_i \quad (4)$$

де $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – головні напруження на контактній поверхні спряження;

$[\sigma_P]_i$ – допустиме напруження на розтяг для спряжених матеріалів.

Отже згідно табл. 1 та (2) попередити руйнування деталей можливо накладанням умов поданих в табл. 2. Тут T_u, T_3 – поля допусків отвору шарошки та зубка відповідно

Таблиця 1 – Умови міцності для з'єднання „зубок-шарошка”

Умова міцності	для шарошки
Формули визначення	$\sigma_1 = \sigma_\tau _{r_i=r_3} = p_k,$ $\sigma_2 = \sigma_z _{r_i=r_3} = fp_k,$ $\sigma_3 = \sigma_r _{r_i=0} = -p_k,$ $\sigma_{EKВ}^u = \frac{T_u \sqrt{1-f^2}}{d_3} \times$ $\times \left(\frac{1-\mu_3}{E_3} + \frac{1+\mu_u}{E_u} \right)^{-1} \leq [\sigma_P]_u,$

Таблиця 2 – Умови міцності для з'єднання „зубок-шарошка”

Умова міцності	для зубка
Формули визначення	$\sigma_1 = \sigma_z = fp_k,$ $\sigma_2 = \sigma_\tau = \sigma_3 = \sigma_r = -p_k,$ $\sigma_{EKВ}^3 = \frac{T_3(1-f)}{d_3} \times$ $\times \left(\frac{1-\mu_3}{E_3} + \frac{1+\mu_u}{E_u} \right)^{-1} \leq [\sigma_P]_3,$

Відповідно натяг у посадці повинен обмежуватися граничними значеннями напружень матеріалів деталей. Враховуючи відому залежність

$$T_N = N_{max} - N_{min} = T_u + T_z, \tag{5}$$

натяг мав би визначитися з відомого рівняння:

$$T_N = d_3 \left(\frac{[\sigma_p]_u}{\sqrt{1-f^2}} + \frac{[\sigma_p]_z}{1-f} \right) \times \left(\frac{1-\mu_z}{E_z} + \frac{1+\mu_u}{E_u} \right) \tag{6}$$

Тим не менше приведений вираз не враховує такий чинник як поверхнева твердість шарошки у місці посадки. Важливість такого чинника обґрунтована в роботах [2-10]. Твердість поверхневих шарів вінців шарошки для різних за призначенням доліт є різною. Вінці шарошок виконуються в одному випадку без цементації (забезпечується захистом спеціальною обмазкою перед ХТО), в іншому випадку цементуються. У всіх випадках шарошки піддаються гартуванню. Відповідно маємо два випадки твердості розглянутих поверхонь – HRC56-57 та HRC58-63. Для врахування цього, співставленням існуючих в заводській практиці вимог щодо параметрів посадки з результатами дослідження А. І. Беляєва, слід у розрахунку натягу ввести коефіцієнт поправки, позначимо його K_{II} . Цей коефіцієнт повинен враховувати діаметр вставних зубків, а також те, що натяг повинен зменшуватися пропорційно зі збільшенням твердості поверхневих шарів. Експериментально встановлено [13], що твердосплавні зубки не зазнають руйнувань у 90% коли значення K_{II} знаходиться у межах які подано в табл. 3.

Таблиця 3 – Залежність значення коефіцієнта поправки від діаметрів зубків і твердості вінців шарошки

Діаметри зубків, мм	Твердість вінців шарошки, HRC	Коефіцієнт K_{II}
10	56-57	1,4 – 1,5
12	56-57	1,15 – 1,2
14	56-57	1,1 – 1,11
Діаметри зубків, мм	Твердість вінців шарошки, HRC	Коефіцієнт K_{II}
10	58-61	1,8 – 2,0
12	58-61	1,3 – 1,4
14	58-61	1,2 – 1,22

Отже натяг визначиться з співвідношення

$$T_N = \frac{d_3}{K_{II}} \left(\frac{[\sigma_p]_u}{\sqrt{1-f^2}} + \frac{[\sigma_p]_z}{1-f} \right) \times \left(\frac{1-\mu_z}{E_z} + \frac{1+\mu_u}{E_u} \right) \tag{7}$$

Враховуючи що $[\sigma_p]_u < [\sigma_p]_z$, можна констатувати що в тілі шарошки навколо спряження виникає

напруження більше за границю плинності. Тому величина натягу повинна обґрунтуватися для попередження тріщиноутворення. Відтак контактний тиск на рівні висоти виступу вінця шарошки (1) встановиться

$$p_k(l) = \frac{N}{d_3} \left(\frac{1-\mu_z}{E_z} + \frac{l^2+d_3}{l^2-d_3} + \mu_u \right)^{-1} \tag{8}$$

де l – ширина вінця шарошки.

Максимальні радіальні, поздовжні та тангенціальні напруження в спряженні отримують із залежностей, які подано в табл. 4

Аналогічно, за таких умов допустимий натяг рівний

$$T_N = \frac{d_3}{K_{II}} \times \left\{ \frac{\sqrt{2}[\sigma_p]_u}{\sqrt{\left(\frac{l^2+d_3}{l^2-d_3}-f\right)^2 + (1-f)^2} + \left(\frac{l^2+d_3}{l^2-d_3}-1\right)^2} + \frac{[\sigma_p]_z}{1-f} \right\} \times \left(\frac{1-\mu_z}{E_z} + \frac{l^2+d_3}{l^2-d_3} + \mu_u \right) \tag{9}$$

Для шарошок, де $l = 1,5d_3$, розрахунок допустимого натягу спрощений

Таблиця 4 – Максимальні радіальні, поздовжні та тангенціальні напруження в спряженні з'єднання „зубок-шарошка”

Напруження	для шарошки
Формули визначення	$\begin{cases} \sigma_1 = \sigma_r = p_k(l) \frac{l^2+d_3}{l^2-d_3} \\ \sigma_2 = \sigma_z = -f\sigma_r = fp_k(l) \\ \sigma_3 = \sigma_r = -p_k(l) \end{cases}$
Напруження	для зубка
Формули визначення	$\begin{cases} \sigma_1 = \sigma_z = -fp_k(l) \\ \sigma_2 = \sigma_3 = \sigma_r = \sigma_\tau = -p_k(l) \end{cases}$

$$T_N = \frac{d_3}{K_{II}} \times \left(\frac{\sqrt{2}[\sigma_p]_u}{\sqrt{(2,6-f)^2 + (1-f)^2} + 2,56} + \frac{[\sigma_p]_z}{1-f} \right) \left(\frac{1-\mu_z}{E_z} + \frac{2,6+\mu_u}{E_u} \right) \tag{10}$$

Знаючи значення $[\sigma_p]$, μ , E для матеріалів шарошок та зубків, застосовуючи потужності програмного продукту Mathcad можна легко вести проектування конструкції посадки зубків у шарошку.

Отже, для проектування посадок для вставного породоруйнівного оснащення типу ТКЗ слід вести за формулою (9), де отримується натяг більший за величину допустимого отриманого згідно формули (3). Натомість для проектування натягів для вставного

породоруйнівного оснащення типу ОК слід застосувати формулу (3).

Для практичних розрахунків замість допустимого напруження можна застосувати відомі значення границі плинності

$$[\sigma_P] = \frac{\sigma_T}{k_T}, \quad (11)$$

тоді розрахункова формула для встановлення допустимого натягу в посадці матиме вигляд

$$N_{\dot{a}} = \frac{d_{\dot{c}}}{k_T K_f} \left(\frac{\sigma_{T\theta}}{\sqrt{1+f^2}} + \frac{\sigma_{T\zeta}}{1-f} \right) \times \left(\frac{1-\mu_z}{E_s} + \frac{1+\mu_{ш}}{E_{ш}} \right) \quad (12)$$

де k_T – коефіцієнт запасу міцності.

Величину сили, яка необхідна для демонтажу зубка з отвору в шарошці за натягу (9), можна отримати з відомого рівняння, яке в нашому випадку матиме вигляд

$$P_A = \pi f p_e d_{\dot{c}} h_z = \frac{\pi f d_{\dot{c}} h_z}{k_T} \times \left(\frac{\sigma_{T\theta}}{\sqrt{1+f^2}} + \frac{\sigma_{T\zeta}}{1-f} \right). \quad (13)$$

де h_z – висота спряжених поверхонь хвостовика зубка і отвору шарошки.

Для прикладу покажемо описаний вплив коефіцієнта запасу міцності на параметри посадки коли зубок виготовлено зі сплаву ВК8-ВК, а шарошка зі долотних сталей, що широко застосовуються у долотобудуванні. Коерцитивна сила таких зубків складала 95-100 ерстед, твердість HRA87,5, середній розмір зерна 3,5-4,5мкм.

Таблиця 5 – Механічні властивості сталей шарошок і твердих сплавів зубків, необхідні для розрахунків

	Матеріал	Модуль пружності E , МПа	Коефіцієнт Пуассона μ	Границя плинності σ_T , МПа
1	14ХНЗМА	$2,1 \cdot 10^5$	0,3	886
2	16ХНЗМА	—	—	834
3	17НЗМА	—	—	745
4	20ХНЗМА	—	—	750
5	ВК8-ВК	$5,8 \cdot 10^5$	0,21	1800

При розрахунках прийнято $\varnothing 10\text{мм} - K_{II} = 1,45$, $\varnothing 12\text{мм} - K_{II} = 1,13$, $\varnothing 14\text{мм} - K_{II} = 1,11$. Механічні властивості матеріалів шарошки і зубка (табл. 5), відтак отримані розрахункові дані посадки зубків декількох діаметрів у тіло шарошки за різних значень коефіцієнту запасу міцності (табл. 6).

Отже, підбираючи запас міцності в посадці можна прогнозувати силу натягу, жорсткість та надійність цього з'єднання (рис. 4). При цьому слід враховувати,

що спряженні „зубок-отвір” при натягах, які відповідають зонам пружної деформації, коефіцієнт тертя (зчеплення) незначно змінюється, а при переході у зону пружно-пластичної деформації коефіцієнт тертя зі збільшенням натягу збільшується. Одночасно граничні величини натягу у спряженні „зубок-отвір” обмежуються: мінімальна – міцністю зчеплення, максимальна – появою тріщин навколо отвору. Тим не менше огляд вставного породоруйнівного оснащення відпрацьованих доліт показує що поряд з випаданням зубків через мінімальні натяги маємо різний характер руйнування твердосплавних зубків. Для виявлення причин цього явища на ВАТ „ДДЗ” було підготовлено партії доліт з верхнім максимальним натягом у з'єднанні „зубок-отвір”, що у середньому дорівнював 0,23мм, 0,19мм, 0,16мм (згідно технології виготовлення вінці шарошок захищені від цементациї) [9].

Якісним аналізом породоруйнівного оснащення відпрацьованих доліт виявлено типовий характер руйнування для кожної партії доліт (рис. 5) [13].

Отже, при середньому натягу 0,23мм у з'єднанні „зубок-отвір” зубок зазнає недопустимі внутрішні напруження, що прискорюють його руйнування. Тут спостерігається інтенсивне тріщиноутворення і зубок буквально розсипається, у результаті фрагменти хвостовика завальцьовуються у тіло шарошки, що призводить до повної зупинки проходки долота.

Таблиця 6 – Вплив коефіцієнта запасу міцності й натягу на напружений стан у спряжених ділянках зубка зі сплаву ВК8-ВК й отворів у шарошці зі сталі 14ХНЗМА

dз, мм	Коефіцієнт запасу міцності, k_T				
		1,25	1,50	1,75	
10	Натяг, мм	0,120	0,100	0,088	
	Напруження, МПа	σ_r	-1588,87	-1324,06	-1165,17
		σ_τ	$\pm 1588,87$	$\pm 1324,06$	$\pm 1165,17$
σ_z		158,89	132,41	116,52	
12	Натяг, мм	0,185	0,154	0,132	
	Напруження, МПа	σ_r	-2041,25	-1699,21	-1456,46
		σ_τ	$\pm 2041,25$	$\pm 1699,21$	$\pm 1456,46$
σ_z		204,13	169,92	145,65	
14	Натяг, мм	0,220	0,183	0,157	
	Напруження, МПа	σ_r	-2080,66	-1730,73	-1484,84
		σ_τ	$\pm 2080,66$	$\pm 1730,73$	$\pm 1484,84$
σ_z		208,07	173,07	148,48	

Середній натяг 0,19мм у з'єднанні „зубок-отвір” також веде до прискореного руйнування твердосплавних зубків. Хоч тут не так інтенсивно проходять руйнування, але результат подібний – зубки руйнуються за підлице тіла вінця шарошки і маємо повну втрату здатності руйнувати породу вибою долотом.

Середній натяг 0,16мм у з'єднанні „зубок-отвір” дає можливість очікувати найкращі показники по дов-

говічності твердосплавного вставного оснащення. Тут залежно від міцності твердого сплаву зубка і характеру навантаження зі сторони вибою відбувається, або самозаточування зубків, або відколювання вражаючої частини зубків.

Згідно здійснених досліджень тепер проведемо аналіз міцності шарошки долота діаметром 302мм на яку діє зведена сила яка прикладена до основного твердосплавного зубка моделі і є рівна 28кН. Змоделюємо такий випадок (рис.8): на п'ять зубків розміщених коло основного зубка – прикладаємо по 25кН на кожен. Моделювали також ділянку контактного напруження з трьома малими зубками які припадають на досліджувану ділянку впливу зубки – вибій, на кожен зі згаданих зубків припадало до 25кН [3,4]. Загалом у контактній зоні зубки знаходилися під навантаженням до 80 кН, що відповідно впливає на напружений стан вінців шарошки [3,4]. Крім того враховано тиск від натягу посадки „хвостовик зубка – отвір шарошки” – 114 МПа. Результати здійснених досліджень характеру напруженого стану у вінцях шарошки подано на рис. 9.

Отже у досліджуваній конструкції шарошки, у якої два основних вінця мали 21 у першому ряді та 19 зубків у другому ряді (зов. вигляд такої шарошки представлений на рис. 8). Аналізом характеру пошкоджень аналізованих вінців встановлено, що вони зазнають найбільших навантажень, що узгоджується з даними в дослідженні [3].

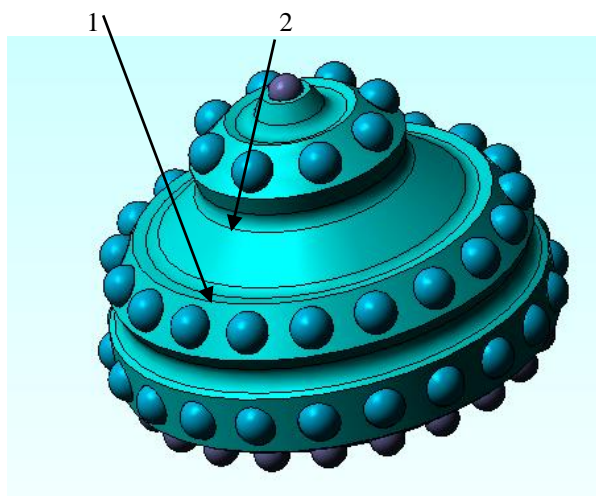


Рис. 4 – Моделювання 3-D шарошки тришарошкового бурового долота діаметром 302мм без навантаження

Після отриманих результатів (рис.9) можна побачити, що як і очікувалось найбільш напруженим місцем буде ребро навколо зубка. Максимальне напруження на цій грані буде складати до 140Мпа, що є незначними і лежить у пружній зоні.

У конструюванні породоруйнівного оснащення шарошок тришарошkových бурових доліт існує проблема оптимального вибору кількості породоруйнівних елементів (вставних твердосплавних зубків), їхніх геометричних параметрів. Така задача, як правило вирішується досягненням ефективного перекриття

породоруйнівних елементів на вінцях шарошок за мінімальної кількості вставних зубків. Це забезпечує режим руйнування породи на вибої за мінімальних витрат твердого сплаву. Тим не менше, добитися різкого зростання значень проходки долота можливо за рахунок підвищення ефективності породоруйнюючого ефекту шарошок бурових доліт.

Тому оптимальний вибір кількості зубків на вінцях шарошок є однією з вагомих проблем сучасного долотобудування. Зважаючи на багатолітній досвід долотобудування, а також на характер пошкоджень вінців та вставного твердосплавного породоруйнівного оснащення, поставлено завдання вивчити характер напруженого стану шарошки, якщо кількість зубків збільшити.

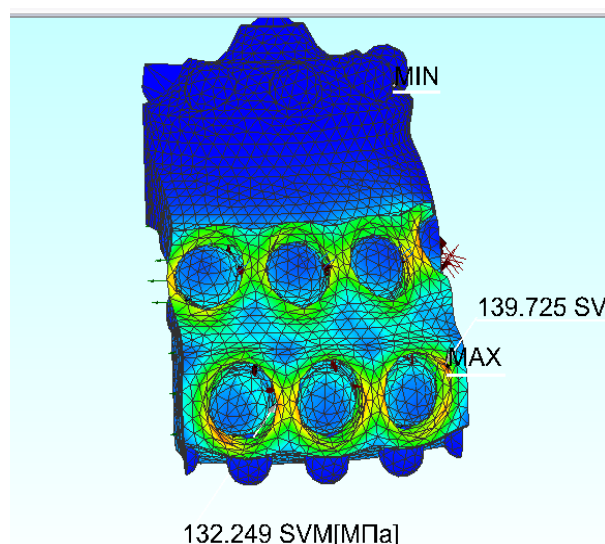
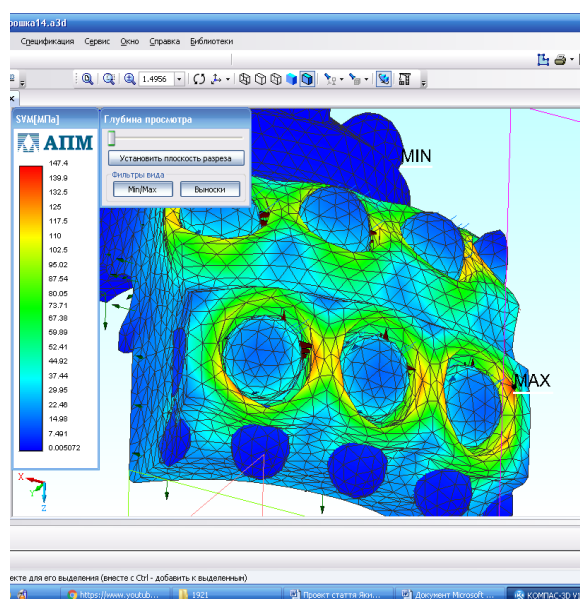


Рис. 5 – Моделювання напруженого стану у ділянках спряження „хвостовик зубка – отвір шарошки” на калібруючому і основних вінцях шарошки бурового долота діаметром 302мм

У першому досліді кількість зубків у першому ряді збільшили до 24 шт, а у другому до 22. Результати таких досліджень представлено на рис. 10. Очікується, що напруження у концентраторі напружень повинно було б бути більшим, адже взаємовплив зубків на шарошку зростає. 3D модель також показує зростання напруження до 160 МПа, що є допустимо для даного матеріалу, хоча слід врахувати те що процес є динамічний (а моделі показано для статичного випадку), тому необхідно враховувати перенавантаження і мати запас міцності.

Проаналізуємо напружений стан шарошки, якщо кількість зубків збільшити до максимальної кількості, а така кількість може бути досягнута до 28 та 26 зубків відповідно до першого та другого ряду. Подальше збільшення кількості зубків знижує міцність вінців шарошки.

Тому на рис. 6 представлено напружений стан шарошки, якщо кількість зубків у першому ряді збільшити до 28, а у другому до 26. 3D модель також показує зростання напруження до 550 МПа, що є недопустимо для даного матеріалу з граничною міцністю 800 МПа. Тому найбільш очікувана кількість зубків повинна не перевищувати 24 та 23 зубка.

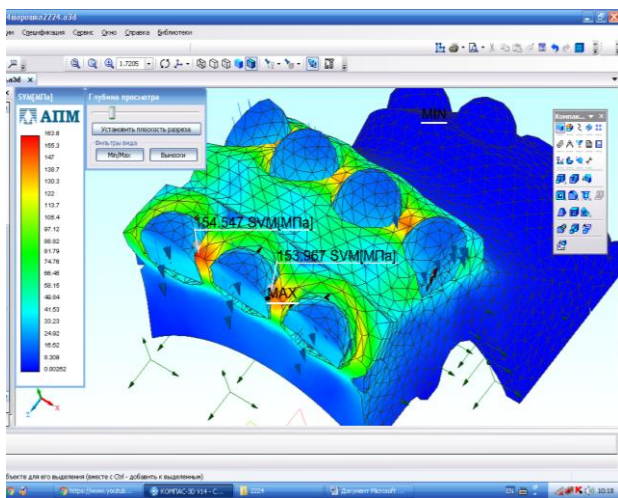
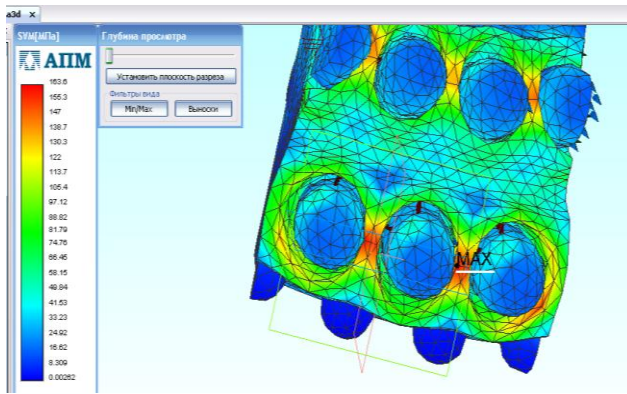


Рис. 6 – Моделювання напруженого стану у ділянках спряження „хвостик зубка – отвір шарошки” на калібруючому і основних вінцях шарошки із збільшеною кількістю зубків (22 і 24 відповідно)

Висновки. Здійснені дослідження дозволили встановити характер розподілу контактних напружень у спряжених ділянках „хвостик зубка – отвір шарошки” (рис. 5-7). Для створення сприятливого розподілу напруженого стану у ділянці поверхні отвору у вінці шарошки ефективним є попередження виникнення тріщин. Для цього слід ретельно здійснювати захист від цементації вінців шарошки. У випадку конструкцій з багаторядним розташуванням твердосплавних зубків на вінцях, ефективним є виконання вифрезерованих площадок на глибину цементованого шару, що попереджає викришування фрагментів вінців шарошки. Дослідження показали, що збільшення у двічі кількості зубків на вінцях шарошки суттєво не змінює напружений стан між вставними зубками. Це дозволяє різко підвищити ефективність агресивного впливу породоруйнівного оснащення на вибій та забезпечувати вищі швидкості буріння.

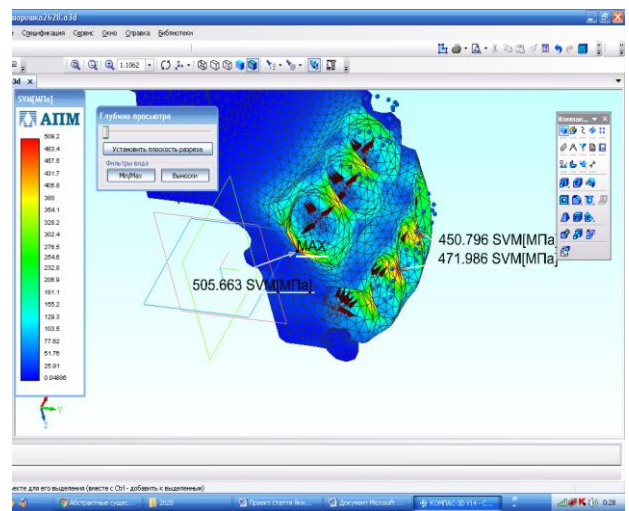
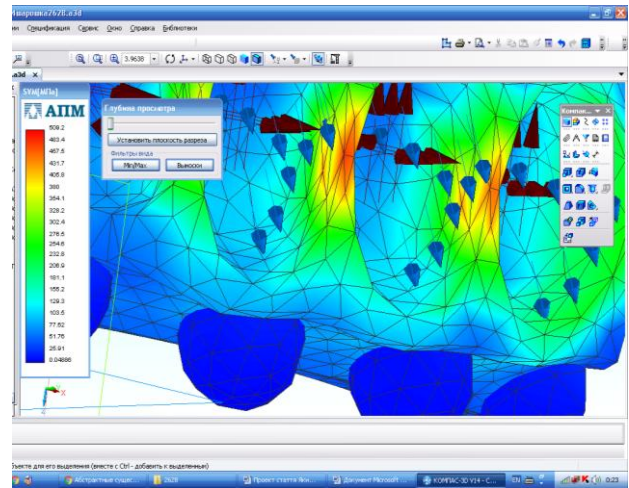


Рис. 7 – Моделювання напруженого стану у ділянках спряження „хвостик зубка – отвір шарошки” на калібруючому і основних вінцях шарошки із збільшеною кількістю зубків (26 і 28 відповідно)

Випробовування шарошок вдосконаленої конструкції у стендових умовах, при застосуванні металевго вибою, підтвердили ефективність отриманих

параметрів вставного породоруйнівного оснащення шарошок. Зокрема, ефективно забезпечується перекриття площини вибою, при цьому відсутній знос вінців шарошки та відсутні явища оголення тіла хвостовика. Також, при неперервній роботі долота на стенді протягом 6 годин не зафіксовано руйнування твердосплавних зубків навіть на основних, найбільш навантажених вінцях шарошки. Аналіз шарошок на предмет утворення тріщин у відповідальних ділянках як зі сторони породоруйнівного оснащення, так зі сторони порожнини не виявив пошкоджень які б спричинили до крихкого руйнування тіла шарошки на вибої.

Отже, запропоновані конструкторські рішення щодо вдосконалення технології виготовлення шарошок із вставним твердосплавним породоруйнівним оснащенням тришарошкових бурових доліт дозволяють суттєво підвищити експлуатаційні показники вітчизняних бурових доліт. Впровадження у виробництво запропонованих рішень не вимагає докорінної зміни технології виготовлення доліт.

Список літератури

1. A Study of Drilling Performance of Energy Balanced Roller Cone Bit / S.L. Chen, J. Dahlem, C. Rayburn / SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition, (9-11 September 2003, Jakarta, Indonesia). – Jakarta: Copyright Society of Petroleum Engineers, 2003. Paper Number 80493-MS.
2. Bybee K. Drilling Performance of an Energy-Balanced Roller-Cone Bit. / Bybee K. // Journal of Petroleum Technology. – 2003. – № 12 (December). – P. 49-50.
3. Биланенко Н. А. Установление оптимальных кинетических характеристик шарошечных долот с целью повышения эффективности бурения скважин: дис... кандидата техн. наук: 05.05.06. / Биланенко Николай Александрович. – Ташкент 1984 – 217 с.
4. Блинков О. Г. Пути повышения эффективности работы буровых шарошечных долот: дис. ... доктора техн. наук: 25.00.15. / Блинков Олег Геннадиевич. – М., 2007. – 356 с.
5. Сальников М.А. Разработка буровых твёрдых сплавов с повышенными характеристиками пластичности и трещиностойкости на основе высокотемпературных карбидов вольфрама: автореф. дис. на соиск. научн. степ. канд. техн. наук: спец. 05.02.01 „Материаловедение (машиностроение)” / М. А. Сальников. – Самара, 2009. – 24 с.
6. Артим В. І. Підвищення працездатності шарошечних доліт, оснащених вставними композиційними зубками: дис... кандидата техн. наук: 05.15.07. „Машини та агрегати нафтової та газової промисловості” / Володимир Іванович Артим. – Івано-Франківськ, 1999. – 153 с.
7. Пітулей Л. Д. Технологічне забезпечення віброформування зубків бурового інструменту: дис. кандидата техн. наук: спец. 05.02.08 „Технологія машинобудування” / Лоліта Дмитрівна Пітулей. – Івано-Франківськ, 2008. – 237 с.
8. Богомолов Р. М. Методы повышения эффективности разрушения горных пород при бурении скважин шарошечными долотами: дис. ... доктора техн. наук: 25.00.15 / Богомолов Родион Михайлович. – М., 2001. – 434 с.
9. Яким Р. С. Научно-прикладні засади підвищення довговічності тришарошкових бурових доліт: дис. ... доктора техн. наук: 05.05.12 / Яким Роман Степанович. – Івано-Франківськ, 2012. – 293 с.
10. Сизова Е. И. Повышение долговечности шарошечных долот совершенствованием технологии запрессовки твердого сплава / Е. И. Сизова. // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2006. – №4. – С. 225-229.
11. Кремлев В. И. Повышение долговечности буровых шарошечных долот на основе совершенствования технологии сборки и упрочнения шарошек с твердосплавными зубками: автореф.

- дис. на соискание научн. степени канд. техн. наук: спец. 05.02.08 „Технология машиностроения” / В. И. Кремлев. – Самара, 2009. – 20с.
12. Акудинов Д.В. Повышение прочности прессовых соединений за счет использования явления схватывания при ультразвуковой запрессовке зубков шарошек буровых долот: автореф. дис. на соискание научн. степени канд. техн. наук: спец. 05.02.08 „Технология машиностроения” / Д. В. Акудинов. – Самара, 2012. – 20с.
 13. Яким Р. С. Підвищення якісних показників вставного породоруйнівного оснащення шарошок тришарошкових бурових доліт / Р. С. Яким, Ю. Д. Петрина, І. С. Яким // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2013. – № 3 (48). – С. 127 – 138.
 14. Яким Р. С. Формування якості та експлуатаційних показників тришарошкових бурових доліт на усіх етапах їх створення / Р. С. Яким, Ю. Д. Петрина, І. С. Яким // Прогресивні технології і системи машинобудування: міжнародний зб. наукових праць. – Донецьк: ДонНТУ, 2011. – Вип. 42. – С. 309 – 314.
 15. Яким Р. С. Забезпечення якості тришарошкових бурових доліт на етапах їх життєвого циклу / Р. С. Яким, Ю. Д. Петрина, І. С. Яким // Прогресивні технології і системи машинобудування: міжнародний зб. наукових праць. – Донецьк: ДонНТУ, 2012. – Вип. 1,2 (43). – С. 338 – 342.
 16. Добротворський С. С. Комп'ютерне проектування та моделювання технологічних процесів високошвидкісного фрезерування загартованих сталей / С. С. Добротворський, С. В. Басова та ін. // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Серія: Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль у машинобудуванні та приладобудуванні: збірник наукових праць. – 2015. – № 822. – С. 7–13.

References (transliterated)

1. Chen S.L., Dahlem J., Rayburn C. A Study of Drilling Performance of Energy Balanced Roller Cone Bit. SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition, (9-11 September 2003, Jakarta, Indonesia). – Jakarta: Copyright Society of Petroleum Engineers, 2003. Paper Number 80493-MS.
2. Bybee K. Drilling Performance of an Energy-Balanced Roller-Cone Bit. *Journal of Petroleum Technology*. 2003. No 12 (December). P. 49-50.
3. Bylanenko N.A. *Ystanovlenie optymalnuh kynetycheskyh characteristics sharoshechnuh dolot s celju povusheniya effektivnosti byrovuh skvazun* [Establishing optimal kinetic characteristics of roller cone bits in order to improve the efficiency of drilling]. Tashkent, 1984. 217 p.
4. Blinkov O.G. *Puoty povusheniya effektivnosti rabootu burovuh sharoshechnuh dolot* [Ways to improve the efficiency of the drilling cone bits]. Moscow, 2007. 356 p.
5. Salnikov M.A. *Razrabotka burovuh splavov s povushenymi harakterystykami plasotychnosti i treschyonostoykosti na osnove vysokotemperaturnuh karbidov volframa: Author. Dis. on soysk* [Development of hard alloys with high ductility and fracture characteristics based on high-temperature tungsten carbides]. Samara, 2009. 24 p.
6. Artyum V.I. *Pidvyschennya pratsezdatsnosti sharoshkovykh dolot, osnaschenykh vstavnumu zubkamy* [Improving the performance of bits equipped with composite false teeth]. Ivano-Frankivsk, 1999. 153 p.
7. Pitula L.D. *Tehnologichne zabezpechennya vibroarmuvannya zubkiv burovoho instrumentu* [Technological support of vibroforming of drilling tools]. Ivano-Frankivsk, 2008. 237 p.
8. Bogomolov R.M. *Meotodu povusheniya efektyvnosti razoorusheniya hornuh porod pry burenyy skvazhun sharoshechnymi dolotami* [Methods to improve the efficiency of destruction of rocks during drilling rock bits]. - Moscow, 2001. 434 p.
9. Yakim R.S. *Naukova-prikladni zasadi pidvyschennya dovgovichnosti trisharoshkovykh burovuh dolit* [Scientific principles applied to increase durability of roller cone bits]. - Ivano-Frankivsk, 2012. 293 p.
10. Sizov E.I. *Povyshenie dolgovechnosti sharoshechnykh dolot sovershenstvovaniem tehnologii zapresovki tverdogo splava* [Increased durability of roller cone bits improving pressing of hard alloy technology].

- nology] *Gorny informatsionno-analitichesky byulleten (scientific and technical journal)*. 2006. No4. pp. 225-229.
11. Kremlev V.I. *Povyshenie dolgovechnosti burovih sharoshechnykh dolot na osnove sovershenstvovaniya tehnologii sborki i uprochneniya sharoshek s tverdospavnimi zubkami* [Increased durability drilling cone bits on the basis of improving the technology of assembling and strengthening cutters with carbide teeth] Samara, 2009. 20 p.
 12. Akudinov D.V. *Povyshenie prochnosti pressovoyh soedineniy za schet ispolzovaniya yavleniya skhvatyvaniya pryа ultrazvukovoy zapressovke zubkov sharoshek burovih dolot* [Increasing the strength of press connections through the use of the phenomenon of setting in ultrasonic pressing in cones cutters drill bits]. Samara, 2012. 20 p.
 13. Yakim R.S., Petrina Y.D., Yakimov I. *Pidvischennya yakisnih pokaznikiv vstavnoho porodouynivnoho osnashchennya sharoshok trisharoshkovih burovih dolit* [Improving the quality indicators embedded rock cutting equipment trisharoshkovykh cutters drill bits]. *Rozvidka ta rozrobka naftovih i gazovih rodovishch.* 2013. No 3 (48). pp. 127 - 138.
 14. Yakima R.S., Petrina Y.D., Yakimov I. *Formuvannya yakosti ta ekspluatatsiy nih pokaznikiv trisharoshkovih burovih dolit na usih etapah ih stvorennya* [Formation of quality and performance indicators trisharoshkovykh drill bits at all stages of their creation]. *Progresivni tehnologii i sistemi mashinobuduvannya: mizhnarodny S.T. Naukova Pratsen.* Donetsk: Donetsk National Technical University. 2011. Rel. 42. pp. 309 - 314.
 15. Yakim R.S., Petrina Y.D., Yakimov I. *Zabezpechennya yakosti trisharoshkovih burovih dolit na etapah ih zhittevoho tsiiklu* [Quality trisharoshkovykh drill bits at the stages of their life cycle]. *Progresivni tehnologii i sistemi mashinobuduvannya: mizhnarodny ST. naukovih prats.* - Donetsk: Donetsk National Technical University, 2012. Rel. 1.2 (43). -pp. 338 - 342.
 16. Dobrotvorskyy S.S., Basova E.V., ets. *Komp'yuterne proektuvannya ta modelyuvannya texnologichny'x procesiv vy'sokoshvy'dkiznogo frezeruvannya zagartovany'x* [Computer design and simulation processes high-speed milling hardened steels] *Visnyk Nacional'nogo universy'tetu «Lvivs'ka politexnika». Seriya: Opty'mizaciya vy'robny'chy'x procesiv i texnichny'j kontrol' u mashynobuduvanni ta pry`ladobuduvanni : zbim'y'k naukovy'x prac'.* 2015. No 822. pp. 7–13.

Поступила (received) 12.10.15

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Конструкторсько-технологічні підходи у визначенні оптимального розміщення зубків на вінцях шарошок тришарошкових бурових доліт // Яким Р. С. Сліпчук А.М. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. – Х.: НТУ «ХПІ», 2016. – №5 (1177). С. 25-33. – Бібліогр.: 16 назв. – ISSN 2079-004X.

Конструкторско-технологическое подходы в определении оптимального размещения зубков на венце шарошек трехшарошечных буровых долот // Яким Р.С. Слипчук А.Н. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. – Х.: НТУ «ХПІ», 2016. – №5 (1177). С. 25-33. – Бібліогр.: 16 назв. – ISSN 2079-004X.

Design and technological approaches in determining the optimal placement of teeth on the crown cutters drill bit // Jakym R.S., Slipchuk A.M. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. – Х.: НТУ «ХПІ», 2015. – No 5 (1177). С. 25-33. – Бібліогр.: 16 назв. – ISSN 2079-004X.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Яким Роман Степанович – док. техн. наук, проф. Дрогобицький державний педагогічний університет ім. І.Франка, тел.: 0679070484, e-mail: Jakym.r@online.ua;

Яким Роман Степанович - док. техн. наук, проф. Дрогобычский государственный педагогический университет им. И.Франко, тел. : 0679070484, e-mail: Jakym.r@online.ua;

Yashkym Roman Stepanovich - Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Drohobych State Pedagogical University. Franko tel.: 0679070484, e-mail: Jakym.r@online.ua;

Сліпчук Андрій Миколайович – канд. техн. наук, доц. НУ «ЛПІ», тел.: (032)-258-25-01, e-mail: andsl@ukr.net;

Слипчук Андрей Николаевич - канд. техн. наук, доц. НУ «ЛПІ», тел. : (032) -258-25-01, e-mail: andsl@ukr.net;

Slipchuk Andrey Nikolaevich - Candidate of Technical Sciences, Docent of Lviv Polytechnic National University, tel. : (032) -258-25-01, e-mail: andsl@ukr.net;

УДК 621.7.014.2

*О.Л. КОНДРАТЮК, О.Л. СКОРКІН***ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ПРИСТРОЇВ ДЛЯ ПОДАЧІ
МАСТИЛЬНО-ОХОЛОДЖУВАЛЬНОЇ РІДИНИ ЧЕРЕЗ КЛИНОВІ НАПВВІДКРИТІ НАСАДКИ
ДО ТОРЦЯ КРУГА ПРИ КРУГЛОМУ НАРУЖНОМУ ШЛІФУВАННІ**

У роботі розглядаються питання впливу техніки подачі МОР на технологічну ефективність круглого зовнішнього шліфування та визначається мінімальна витрата МОР що підводиться в зону обробки.

Рациональний підбір і створення високоефективних МОР можливі тільки при глибокому вивченні механізму їх дії. Сьогодні стало очевидним, що для дослідження складних процесів, що протікають при обробці металевих заготовок в присутності МОР, слід використовувати методи фізичної хімії, теплофізики, металознавства, гідроаеродинаміки і ін. Необхідність обліку цих чинників перетворює розробку нових МОР і технології їх застосування в актуальну науково-технічну проблему, що вирішується на стику цілого ряду галузей сучасної науки вже не стільки на чисто емпіричному, скільки на теоретичному рівні.

Ключові слова: мастильно-охолоджувальна рідина (МОР), техніка подачі, раціональне застосування, абразивна обробка.

В статье рассматриваются вопросы влияния техники подачи СОЖ на технологическую эффективность круглого внешнего шлифования и определяется минимальная затрата СОЖ что привстает в зону обработки.

Рациональный подбор и создания высокоэффективных СОЖ возможные только при глубоком изучении механизма их действия. Сегодня стало очевидным, что для исследования сложных процессов, которые протекают при обработке металлических заготовок в присутствии МОР, нужно использовать методы физической химии, теплофизики, металловедения, гидроаеродинамики и др. Необходимость учета этих факторов превращает разработку новых СОЖ и технологии их применение в актуальную научно-техническую проблему, которая решается на стыке целого ряда областей современной науки уже не столько на чисто эмпирическом, сколько на теоретическом уровне.

Ключевые слова: смазочно-охлаждающая жидкость (СОЖ), техника подачи, рациональное применение, абразивная обработка.

The article examines the impact of technology on the coolant technological efficiency and cylindrical grinding defined minimum flow rate of coolant supplied to the treatment zone.

Rational selection and creation of high performance cutting fluids are possible only in-depth study of their mechanism of action. Today, it has become apparent that in order to study the complex processes that occur in the processing of metal workpieces in the presence of ZOTR, use methods of physical chemistry, thermal physics, metallurgy, fluid dynamics, and others. The need to take account of these factors makes the development of new cutting fluids and their use of technology to date scientific and technical the problem is solved at the junction of a number of branches of modern science is not so much on the purely empirical, as in theory.

Keywords: cutting fluid (coolant), feeding equipment, rational use, abrasion.

Вступ. У процесі механічної обробки поверхневі шари заготовки і інструменту знаходяться в стані активної фізико-хімічної взаємодії з навколишнім повітряним або штучним середовищем, що вводиться в зону обробки у вигляді так званих змащувально-охолоджувальних технологічних рідин (МОР). При правильному обраному складі і способі використання МОР можна різко зменшити сили тертя в контактних зонах «інструмент-заготовка-стружка», зменшити тепловиділення і посилити відведення теплоти, а також забезпечити видалення стружки і відходів обробки із зони різання і з робочих поверхонь верстата. В результаті в істотному ступені зменшується знос, затуплення і засалювання інструменту, підвищується його працездатність і період стійкості. Все це дозволяє значно підвищити продуктивність обробки і поліпшити якість деталей. Тому вдосконалення складів і техніки подачі МОР є одним з основних напрямків розвитку сучасної технології машинобудування.

Важливість проблеми раціонального застосування МОР визначається не тільки економічними міркуваннями, хоча за оцінками фахівців і досвіду промисловості витрати на МОР часто значно (до 4 разів) перевищують витрати на різучі інструменти та досягають 17% собівартості виготовлення деталей машин. У той же час МОР є забруднювачами навколишнього середовища, а на їх виготовлення витрачають значну кількість дефіцитної сировини. Удосконалення техніки і технології застосування МОР буде сприяти пере-

ходу машинобудування на ресурсозберігаюче екологічно чисте виробництво.

Рациональний підбір і створення високоефективних МОР можливі тільки при глибокому вивченні механізму їх дії. Сьогодні стало очевидним, що для дослідження складних процесів, що протікають при обробці металевих заготовок в присутності МОР, слід використовувати методи фізичної хімії, теплофізики, металознавства, гідроаеродинаміки і ін. Необхідність обліку цих чинників перетворює розробку нових МОР і технології їх застосування в актуальну науково-технічну проблему, що вирішується на стику цілого ряду галузей сучасної науки вже не стільки на чисто емпіричному, скільки на теоретичному рівні.

Мета роботи: Оцінка можливостей підвищення продуктивності шліфування і якості оброблених деталей шляхом раціонального застосування МОР.

Основна частина. Основними функціональними діями МОР при шліфуванні є змащуюча, охолоджуюча, миюча, диспергуюча і демпфуюча [1].

Мастильна дія МОР полягає в зменшенні роботи тертя абразивних зерен, зв'язки і відходів шліфування. Охолоджуюча дія полягає в відведенні теплоти від нагрітих ділянок зони шліфування і вільних поверхонь заготовки та круга за рахунок нагріву і пороутворення МОР. Миюча дія МОР полягає у видаленні частинок металу і продуктів зносу абразивного інструменту з поверхонь круга, деталей верстата і заго-

товки. Під диспергуючою дією МОР розуміється пластифікування і адгезійне зниження міцності матеріалу заготовки. Демпфуюча дія МОР сприяє зниженню рівня коливань елементів технологічної системи.

У всіх випадках реалізація функціональних властивостей МОР призводить до зниження теплосилової напруженості і енергоємності процесу шліфування і, як наслідок, збільшення періоду стійкості шліфувального круга і якості шліфованих деталей.

Позитивний вплив МОР на процес шліфування полягає також в зміні теплофізичних властивостей шліфувального круга. Аналіз цілого ряду робіт показує, що навіть при подачі МОР поливом шліфувальний круг, за рахунок сил капілярного напору, просочується рідиною, в результаті чого змінюються його ефективні теплофізичні властивості. Заміщення повітря в поровому просторі шліфувального круга рідиною істотно змінює ефективні теплофізичні характеристики шліфувального круга, що призводить до збільшення теплового потоку, що відводиться шліфувальним кругом, і відповідно до зниження теплового потоку, що надходить в заготовку.

Найбільшу об'ємну концентрацію рідини в порах забезпечує подача МОР крізь паровий простір кола. Відомо, що при шліфуванні слід використовувати рідини, що мають високу теплоємність, теплопровідність, приховану теплоту пороутворення, щільність, низькою кінематичною в'язкістю, хорошими мастильними властивостями, а також збільшувати витрати МОР через зону контакту.

Останнє реалізують шляхом вдосконалення техніки подачі МОР в зону обробки [1,2].

Графіки на рис. 1 свідчать про те, що зі збільшенням витрати МОР через задані ділянки зони контакту, зменшується контактна температура. Це дозволяє зробити висновок, що за рахунок перерозподілу витрат МОР між ділянками зони суміщеного і профільного шліфування, забезпечується вирівнювання теплової напруженості процесу шліфування. Збільшення витрати МОР через зону контакту (як в цілому, так і через задані її ділянки) забезпечує більш

повну реалізацію її функціональних властивостей (див. рис.1).

При подачі МОР за зовнішніми трактами збільшення її витрати через зону контакту шліфувального круга із заготовкою перешкоджають повітряні потоки, генеруються обертовим кругом і створюють в зоні контакту «повітряний клин», тиск повітря в якому може досягати 84 кПа. Характер розподілу швидкостей повітряних потоків, що генеруються одиночним шліфувальним кругом при його обертанні, істотно залежить від робочої швидкості кола, його діаметра, висоти і профілю [3].

При шліфуванні кола прямого профілю торцеві повітряні потоки створюють найбільш несприятливі умови для доступу МОР в зони, розташовані у торців шліфувального круга. З зіставленням швидкостей повітряних потоків близько обертового шліфувального круга (див. рис. 2), з ефективністю подачі МОР поливом (з кривою 1 на рис. 1) впливає, що найбільш теплонапружені ділянки зони контакту розташовані в зонах максимальних радіальних швидкостей повітряних потоків. При шліфуванні кругом прямого профілю, торцеві повітряні потоки створюють найбільш несприятливі умови для доступу МОР в зони, розташовані у торців шліфувального круга. З зіставленням швидкостей повітряних потоків близько обертового шліфувального круга (див. рис. 2), з ефективністю подачі МОР поливом (з кривою 1 на рис. 1) впливає, що найбільш теплонапружені ділянки зони контакту розташовані в зонах максимальних радіальних швидкостей повітряних потоків.

Особливі труднощі виникають на операціях швидкісного і високошвидкісного шліфування, виконуваних на швидкостях 50...80 м/с і більше.

Вибір способу подачі МОР при шліфуванні і вигляді енергетичного впливу, залежить від конкретних умов виконання технологічної операції. Перевагу має той спосіб, у якого більше число трактів, підведення МОР до контактної зони, і більш ефективний (в розглянутих умовах) енергетичний вплив на МОР.

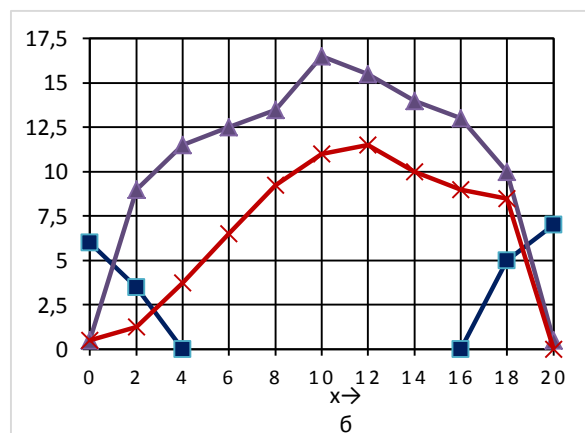
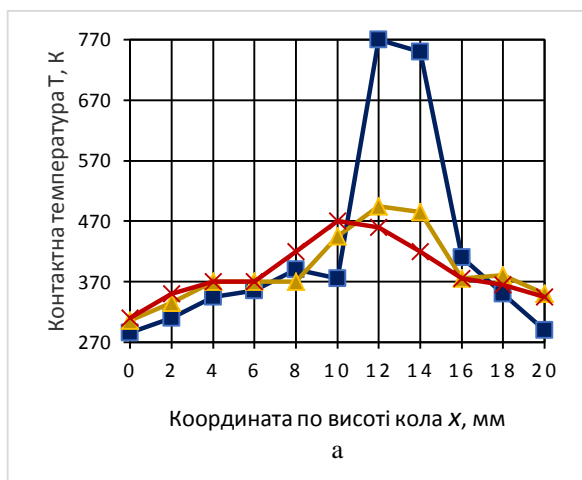


Рис. 1- Розподіл контактної температури (а) і тиску МОР (б) по довжині контакту при плоскому шліфуванні заготовки зі сталі 45 кругом 24A25CM1K7 з подачею 3%-вого розчину кальцінованої соди з витратою 2,5дм³/хв [3]:

▲-крива 1, ■-крива 2, ×-крива 3 - відповідно подача МОР поливом, на торці кола, одночасно поливом і на торці; $V_k = 28\text{м/с}$.

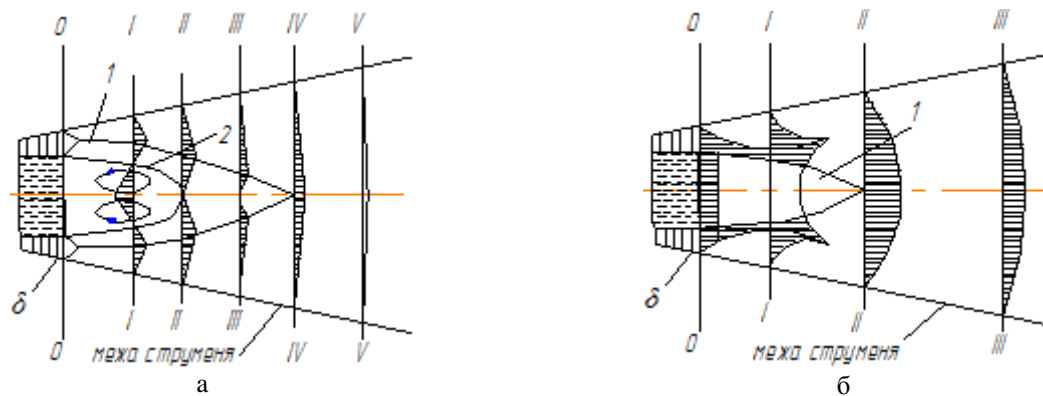


Рис. 2. - Епюра швидкостей турбулентного повітряного потоку близько шліфувального круга в радіальному (а) і окружному (б) напрямках [3]: 1 - поверхня максимальних швидкостей; 2 - замкнена область циркуляційного потоку

Основні способи подачі МОР і деякі з можливих комбінацій з оцінкою ефективності (на якісному рівні) наведені в табл. 1 [1].

Спосіб подачі МОР поливом (рис. 3, а, спосіб № 1) в клинову зону, утворену абразивним кругом яка шліфується поверхнею заготовки, відноситься до числа найбільш поширених, що пояснюється простотою його реалізації та універсальністю. Ефективність подачі МОР поливом багато в чому залежить від ступеня заповнення рідиною клинової зони між шліфувальним кругом і заготовкою.

Потужність рідинного потоку може бути підвищена за рахунок збільшення його швидкості внаслідок збільшення перепаду тиску в напірній магістралі до моменту формування гідравлічного клину в зоні обробки.

Подальше підвищення тиску МОР в системі її подачі підсилює міюча дію МОР по відношенню до круга, але в той же час погіршує санітарно-гігієнічні умови на робочому місці через розбризкування МОР. В даний час можна вважати виправданим спосіб подачі МОР поливом тільки при обробці заготовок з легкошліфуємих матеріалів в одиничному і дрібносерійному виробництвах. При круглому зовнішньому, внутрішньому і плоскому шліфуванні периферією круга витрата МОР повинна бути не менше 8...10 $\text{дм}^3/\text{хв}$. на кожні 10 мм довжини контакту круга із заготовкою, при безцентровому шліфуванні - 3...6 $\text{дм}^3/\text{хв}$, при плоскому шліфуванні торцем кола - 10...15 $\text{дм}^3/\text{хв}$ на кожні 10 мм ширини сегмента або кільця. Норми витрати МОР дані для шліфування з окружною швидкістю кола $V_k' = 35$ м/с. Зі збільшенням V_k' витрати МОР слід збільшувати приблизно прямо-пропорційно відношенню V_k'' і V_k' ($V_k'' > V_k'$).

Подача МОР струменем під тиском (рис. 3, а, спосіб № 2) в зону шліфування відрізняється від поливу тим, що МОР подають під більш високим тиском - 1,0...2,5 МПа і більше. Збільшення тиску призводить до збільшення швидкості потоку МОР і дозволяє долати опір повітряних потоків, що генеруються шліфувальним кругом, завдяки чому забезпечується транспортування рідини в зону шліфування і інтенсифікується відведення теплоти заготовки. Однак, подача МОР під підвищеним тиском призводить до посилення її розбризкування, що вимагає надійної герметизації робочої зони верстата.

Подачу МОР в розпиленому стані (рис. 3, а, спосіб № 3) застосовують при абразивній обробці, головним чином, на операціях заточки ріжучого інструменту, шліфування великогабаритних заготовок, правки шліфувальних кругів алмазними роликками, а також на операціях, які було виконано раніше без використання змащувальної рідини, так як енергія струменя і витрата рідини недостатні для надання істотного впливу на процес шліфування в інших умовах.

Струменем під тиском поза зоною - це спосіб подачі МОР (рис. 3, б, спосіб № 4) найбільш ефективний з усіх основних способів (див. табл. 1). Струмнь МОР, володіючи великою кінетичною енергією (тиск 2...10 МПа і більше), пробиває повітряні прикордонні шари, які генеруються швидкообертаємим шліфувальним кругом, і з досить великою силою впливає на його роботу поверхню вдалині від зони різання, очищаючи пори і абразивні зерна від відходів шліфування.

При цьому на поверхні кола утворюються мастильні плівки. МОР подають на робочу поверхню шліфувального круга поза зоною різання через одне або кілька сопел. При висоті шліфувального круга до 50 мм МОР подають через нерухомі багатоканальні сопла з діаметром отворів 0,5...0,8 мм. Для кругів більшої висоти застосовують рухливі сопла з одним або декількома вихідними отворами. В цьому випадку охолодження заготовки здійснюють додатково через звичайне сопло поливом. На практиці цей спосіб подачі використовують порівняно рідко через відсутність надійних насосів високого тиску для подачі МОР і необхідності ретельного очищення подачі рідини від механічних домішок.

При подачі МОР гідроаеродинамічним способом (рис. 3, в, спосіб № 5) енергія повітряних потоків, створюваних швидкообертаємим шліфувальним кругом, використовується для підвищення швидкості руху рідинного потоку щодо робочої поверхні круга та заготовки що шліфується. За допомогою спеціальних пристроїв активований потік МОР направляється на робочу поверхню круга, очищаючи її від наліпання і відходів шліфування, які потрапляють в зону контакту круга із заготовкою. Витрата МОР - 5...8 $\text{дм}^3/\text{хв}$ на 10 мм довжини контакту. Особливо ефективний цей спосіб при швидкісному шліфуванні. Останнім часом з'явилося багато різновидів гідроаеродинамічних способів.

Таблиця 1 - Способи подачі МОР при шліфуванні і їх ефективність

Номер способу	Спосіб подачі МОР	Число МОР, що подаються одночасно	Дія МОР				
			змащу-вальна	охоло-джую-ча	миюча по відношенню до		
		круга			заготовки	верстата	
Основні способи							
1	Поливом	1	Н	З	Н	Х	Х
2	Струменем під тиском	1	З	Х	З	В	Х
3	У розпорошеному стані	1	Н	З/Н	Н	Н	Н
4	Струменем під тиском поза зоною	1	Х	В	В	Х/В	Х
5	Гідроаеродинамічний	1	Х	В	Х/В	Х	Х
6	Через торцеві насадки	1	В/Х	Н	З	Н	Н
7	Через пори круга	1	В/Х	Н	З	Н	Н
8	Через канали у крузі	1	В/Х	З/Н	Н	З/Н	Н
9	У середовищі МОР	1	В	Х	З	З	З
10	Контактний	1	В/Х	Н	Н	З	Н
11	Поетапний	1*	С/В**	С/Н	С/Н	С/Н	С/Н
Комбіновані способи							
12	№1(№2) + №7(№8)	2; 1	О	З	З	Х	Х
13	№1(№2) + №4	1	Х	В	В	В	В
14	№1+№6	1	Х	З	Х	Х	Х
15	№1(№2) + №10	2	О/Х	З	О	Х	Х
16	№4 + №10	2	О	В	В	Х/В	Х
17	№1(№2) + №5 та ін.	1	Х	В	В/Х	В	В

* Послідовно використовуються дві МОР.
 ** У чисельнику - на початкових етапах циклу шліфування, в залежності від способу подачі МОР (С) приймає значення Н, З, Х, В; в знаменнику - при виході або на іншому завершальному етапі.

Примітка. Позначення ефективності МОР: Н - незначна; З - задовільна; Х - хороша; В - висока; О - особливо висока

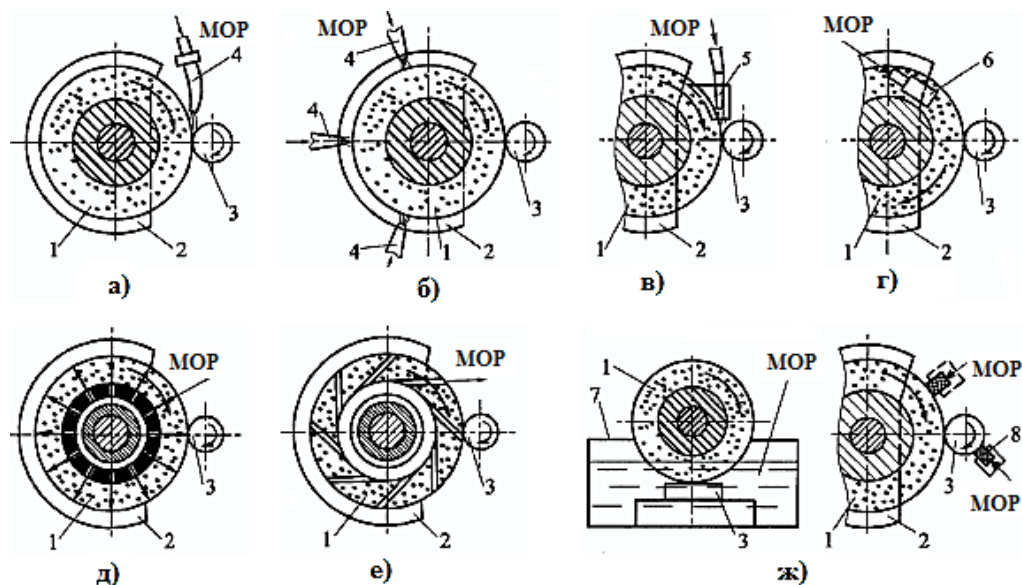


Рис. 3 - Схеми основних способів подачі МОР при шліфуванні: 1 - шліфувальний круг; 2 - кожух; 3 - шліфувана заготовка; 4 - сопло; 5 - насадка; 6 - торцева насадка; 7 - ємкість з МОР; 8 - м'який пористий матеріал, просочений мастилом

Подача МОР через торцеві насадки за способом № 6 (див. Рис. 3, г) виявляється досить ефективною в багатьох випадках. МОР подається в зазор між торцевими поверхнями насадка для подачі МОР і шліфувального круга. Певні труднощі виникають у зв'язку з необхідністю витримувати в жорстких межах зазор між торцем насадка і торцевої поверхнею круга.

Сутність подачі МОР через пори кола (рис. 3, д, спосіб №7) і через канали в колі (рис. 3, е, спосіб № 8) однакова: МОР підводиться у внутрішню порожнину абразивного круга і при його обертанні під дією від-

центрової сили і невеликого тиску, необхідного для запобігання фільтраційного закупорювання пір (при подачі МОР крізь пори кола на керамічній зв'язці), проходить через пори або канали на робочу поверхню круга. При цьому пори кола безперервно промиваються, і відходи обробки добре видаляються з його робочої поверхні. Виключається шкідливий вплив повітряних потоків, створюються умови для освіти міцних мастильних плівок.

При шліфуванні заготовок з загартованих вуглецевих сталей через пори кола подають масляну МОР з

витратою приблизно 3...5 г/хв на кожні 10 мм довжини робочої поверхні шліфувального круга. Через канали в круг подають водні МОР з витратою ~ 2...4 $\text{дм}^3/\text{хв}$ на 10 мм довжини контакту.

Спосіб подачі МОР через пори кола (№ 7) має і ряд недоліків: необхідна досить висока ступінь очищення МОР; спосіб непридатний для шліфування кругами на вулканітових і бакелітових зв'язках, які не мають сполучених пор, для виключення витікання МОР через торцеві поверхні кола до зони шліфування доводиться зафарбовувати, заклеювати чи заливати торці кола. Через небезпеку виникнення структурного дисбалансу області застосування способів № 7 і № 8 обмежуються шліфувальними кругами діаметром до 200...250 мм (внутрішнє і плоске шліфування, заточування різального інструменту).

Шліфування в середовищі МОР (рис. 3, ж, спосіб № 9) застосовується поки порівняно рідко, головним чином при глибинному шліфуванні на операціях вишліфовці стружкових канавок свердел, зенкерів, мітчиків діаметром до 25 мм, а також при стрічковому і плоскому шліфуванні і розрізуванні (відрізанні) заготовок абразивними відрізними кругами.

Подача МОР контактним способом (рис. 3, з, спосіб № 10) дозволяє безперервно наносити на шліфувальну поверхню заготовки найтонший шар активного мастильного матеріалу (наприклад, емульсолів або концентрату синтетичної або напівсинтетичної водної МОР) шляхом підтиску до неї м'якого пористого матеріалу, який насичений мастилом. Цим способом переважно наносять високоефективні (але відносно дорогі) масляні МОР, тверді і пластичні МОР (так як немає розбризкування та інших втрат при загальній витраті МОР близько 10...30 г/год). Однак, охолоджуючу дію МОР при підводі її контактним способом до зони шліфування невелика, тому спосіб № 10 використовують в комбінації з іншими способами подачі водних рідин, сумісних за складом з активним мастильним матеріалом.

Поетапний метод (метод № 11) в принципі відрізняється від всіх інших способів подачі МОР, забезпечуючи можливість повністю реалізувати на одній операції шліфування технологічний потенціал двох різних за складом МОР: на перших етапах циклу шліфування, коли знімається основна частина припуску і велике теплоутворення, в зону обробки поливом або будь-яким іншим способом подають водну МОР. На завершальному етапі шліфування (наприклад, при виходженні), коли кількість знятого металу незначна, формуються показники якості шліфованої деталі,

подачу водної МОР припиняють, а на поверхню заготовки що шліфується наносять розпиленням або контактним способом найтонший шар олійної МОР (з витратою - 10...15 г/год на 10 мм довжини поверхні). Поетапний спосіб забезпечує таку ж продуктивність шліфування і якість шліфованих поверхонь деталей, як подача олійною МОР поливом протягом усього циклу шліфування; при цьому витрата олійною МОР незначна, що знімає перешкоди санітарно гігієнічного та економічного плану, які виникають у випадках шліфування з подачею масляних МОР поливом.

У разі високої напруженості процесу шліфування і високих вимог до якості оброблених деталей застосовують комбіновані способи (див. табл. 1).

Істотно інтенсифікувати просочення порового простору шліфувального круга і збільшити витрату МОР через зону контакту дозволяє техніка подачі МОР (рис. 4). Численними дослідженнями показана висока ефективність комбінованих способів, при яких додатково до подачі поливом МОР подають безпосередньо в зону обробки через пори шліфувального круга з використанням УЗ техніки. В цьому випадку стікають по торцях шліфувального круга рідинні прикордонні шари які заміщають повітряні потоки, нейтралізуючи їх негативний вплив, а витрата МОР через ділянки контакту вирівнюється (див. рис. 1).

У пристроях для подачі МОР з накладенням УЗК МОР подають в порожнину клинної насадки 3 (див. рис. 4), що звужується в напрямку подачі рідини та збігається з напрямком обертання шліфувального круга 2, що забезпечує в зазорі між насадкою і кругом режим гідродинамічного змащення і сприяє заміні інтенсивних торцевих повітряних потоків, що генеруються обертовим шліфувальним кругом, рідинними.

Останнє полегшує транспортування МОР в контактні зони при подачі її поливом. Інша частина МОР проникає в поровий простір шліфувального круга, потім під дією відцентрових сил викидається на його робочу поверхню і надходить безпосередньо в зону шліфування заготовки 7. УЗК, накладаються на насадку за допомогою перетворювача 4, сприяють інтенсифікації просочення порового простору шліфувального круга рідиною.

Застосування УЗ техніки подачі МОР дозволяє істотно збільшити витрату рідини через зону шліфування, причому більшою мірою збільшується витрата через найбільш теплонапружені ділянки робочої поверхні кола поблизу його торців, що особливо важливо при суміщеному торцекруглому і профільному шліфуванні.

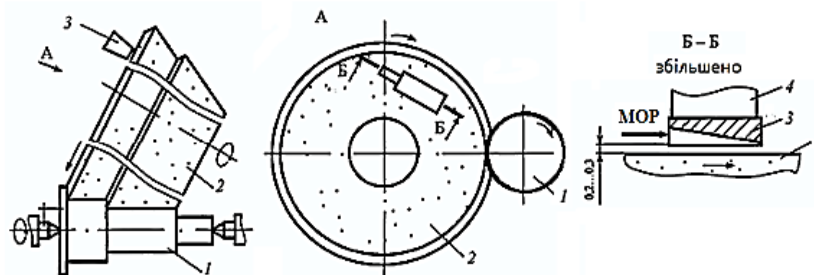


Рис. 4 - Схема УЗ техніки подачі МОР при суміщеному торці круглого шліфування: 1 - заготовка; 2 - шліфувальний круг; 3 - насадка для подачі МОР; 4 - перетворювач УЗК

Основною причиною, яка перешкоджає збільшенню витрати МОР через поровий простір шліфувального круга, є закупорювання його пор бульбашками повітря. Накладення УЗК на фільтр рідини дозволяє істотно послабити негативний вплив цього процесу, що пов'язують з кавітацією, в результаті якої бульбашки повітря послідовно проходять фази розтягування, стиснення і закривання з утворенням сферичної ударної хвилі, «проштовхувати» МОР крізь поровий простір шліфувального круга.

Застосування УЗ техніки подачі МОР забезпечує багаторазове збільшення витрат рідини що фільтрується.

Змінюючи параметри УЗ сигналу іконструктивні параметри напіввідчиненого клинового насадка, можна забезпечити повну просочення примикає до периферії порового простору для кіл, висотою до 120 мм. Знайдено оптимальні конструктивні і режимні параметри УЗ насадок для подачі МОР і координати їх розміщення щодо зони контакту. Встановлено, що найбільший ефект досягається при надмірному тиску подається МОР 0,05...0,07 МПа, при частоті УЗК 18...20 кГц, амплітудою 1,5...10 мкм і зазорі між насадкою і поверхнею шліфувального круга 0,07...0,2 мм.

Тим часом, резервом вдосконалення УЗ пристроїв для подачі МОР залишається оптимізація форми використовуюваного в них УЗ сигналу. Так, за даними Л. Н. Зарембо і В. А. Красільнікова [4], мінімальний розмір R_{0min} бульбашки, здатного квітувати при заданій амплітуді звукового тиску, може бути визначений з умови розриву рідини:

$$P - P_0 > \frac{2}{3} \sqrt{\frac{8\sigma_{ж}^3}{3R_{0min}(P_0 + 2\sigma_{ж} / R_{0min})}} \quad (1)$$

де P_0 - гідростатичний тиск рідини, Па; P - амплітуда звукового тиску, Па; $\sigma_{ж}$ - поверхневий натяг рідини, Н/м. R_{0max} визначається з умови резонансу:

$$\rho_{ж} (\omega R_{0min})^2 = 3\gamma(P_0 + 2\sigma_{ж} / R_{0min}) \quad (2)$$

де γ - постійна величина, що характеризує властивості середовища (для газів $\gamma = C_p / C_v$ - відношення теплоємкості при постійному тиску і об'ємі); ω - резонансна частота бульбашки, Гц:

$$\omega = R_0^{-1} \sqrt{3\gamma(P_0 + 2\sigma_{ж} / R_0) \rho_{ж}^{-1}} \quad (3)$$

де R_0 - початковий радіус бульбашки, м.

Таким чином, в кавітацію залучаються бульбашки, розміри яких задовольняють умові

$$R_{0min} < R < R_{0max} \quad (4)$$

де R_{0min} визначається амплітудою звукового тиску, а R_{0max} - частотою коколиваний.

Щоб забезпечити кавітацію бульбашок, що мають різні початкові розміри R_0 , слід розширити як спектр частот коливаний насадки, так і діапазон амплітуд звукового тиску. На практиці це можна здійснити, накладаючи на насадку модульовані по частоті, амплітуді або фазові коливаний.

Модульовані коливаний - це коливаний з відносно-повільною зміною амплітуди, частоти або фази, таким, щоб за період коливаний модульований параметр змінювався незначно. При модуляції амплітуди синусоїдальним сигналом рівняння, що описує модульоване коливаний, має вигляд

$$X = A_0(1 + m \sin \Omega \tau) \cdot \sin(\omega \tau + \varphi), \quad (5)$$

де A_0 - амплітуда вихідного коливаний параметрам; $\omega = 2\pi f$, де f - циклічна частота, Гц; φ - початкова фаза вихідного коливаний, радий; Ω - частота модулюючих коливаний, рад/с; m - глибина модуляції, що характеризує ступінь зміни амплітуди:

$$m = \frac{A_{max} - A_{min}}{A_{max} + A_{min}} \quad (6)$$

де A_{max} і A_{min} - максимальне і мінімальне значення амплітуди, м.

Амплітудно-модульоване коливаний з синусоїдальною модуляцією являє собою суму трьох гармонійних коливаний з частотами ω , $(\omega + \Omega)$ і $(\omega - \Omega)$. Коливаний частотою ω називається несучим; його амплітуда дорівнює амплітуді A_0 вихідного коливаний. Дві інші частоти називаються бічними, амплітуда кожного з цих коливаний дорівнює $m A_0 / 2$.

Присутність в спектрі амплітудно-модульованого сигналу гармонійних коливаний з частотою $(\omega - \Omega)$ сприяє залученню в процес кавітації більших бульбашок, ніж в разі використання моделюваній сигналу частотою ω .

При частотній модуляції модулюючий сигнал викликає зміни миттєвих значень частоти, не впливаючи на амплітуду коливаний. При модуляції синусоїдальним сигналом частота коливаний змінюється за законом

$$\omega = \omega_H + \Delta\omega \cos(\Omega \tau), \quad (7)$$

де ω_H - несуча частота, рад/с; $\cos(\Omega \tau)$, - визначає форму модулюючого сигналу; $\Delta\omega$ - девіація частоти, що представляє собою амплітуду відхилення частоти від несучої частоти.

Смуга частот частотно-модульованого коливаний залежить від величини $\beta = \Delta\omega / \Omega$, яка називається індексом частотної модуляції. При $\beta \ll 1$ справедливо наближене співвідношення

$$X = A_0[\sin(\omega \tau) + \beta \sin(\Omega \tau) \cdot \cos(\omega \tau)] \quad (8)$$

Повну ширину смуги частот, яку займає частотно-модульоване коливаний з девіацією $\Delta\omega$ і частотною модуляцією Ω , можна вважати рівною $(2\Delta\omega + 2\Omega)$. Ця смуга ширша, ніж при амплітудній модуляції коливаний.

Широкий спектр частот, яку він обіймає частотно-модульованим коливаний, очевидно, може сприяти і значно розширювати діапазони розмірів бульбашок, здатних квітувати. Так, присутність в цьому спектрі коливаний з мінімальною частотою, як було показано вище, може викликати кавітацію бульбашок, що мають досить великі розміри. У той же час звуковий тиск про-

порційний швидкості коливань частинок, а та, в свою чергу, - частоті коливань і амплітудою коливального зміщення частинок.

Тому наявність в спектрі коливань з максимальною частотою має сприяти залученню в процес кавітації бульбашок, що мають вельми малі розміри.

Висновки. Таким чином, застосування модульованих коливань може призвести до значного збільшення діапазону розмірів бульбашок, здатних кавітувати, а отже, і до збільшення витрат МОР, що проходить крізь паровий простір абразивного круга в контактну зону при шліфуванні.

Збільшення витрати МОР, що проходить через зону контакту круга із заготовкою, призводить до зменшення теплосилової напруженості процесу шліфування, що, в свою чергу, сприяє підвищенню якості поверхневого шару шліфованих деталей: зменшується ймовірність виникнення пропалів, розтягування залишкових напружень, мікротріщин. Одночасно з'являється можливість збільшення продуктивності обробки або за рахунок інтенсифікації елементів режиму і скорочення основного часу t_0 в штучному $T_{шт}$ без побоювання зниження заданого рівня якості шліфованих деталей, або за рахунок збільшення періоду стійкості інструменту і скорочення допоміжного часу t_d , що витрачається на правку круга, при одночасному підвищенні якості поверхневого шару шліфованих заготовок.

Список літератури

1. Худобин Л. В. Смазочно-охлаждающие технологические средства и их применение при обработке резанием: справочник / Под общ. ред. Л. В. Худобина — М.: Машиностроение, 2006. — 544 с.
2. Киселев Е. С. Интенсификация процессов механической обработки использованием энергии ультразвукового поля: учебное пособие / Е. С. Киселев. — Ульяновск: УлГТУ, 2003. — 186 с.

3. Ефимов В. В. Научные основы техники подачи СОЖ при шлифовании / В. В. Ефимов — Саратов: СГУ, 1985. — 140 с.
4. Зарембо Л. Н. Введение в нелинейную акустику / Л. Н. Зарембо, В. А. Красильников. — М.: Наука, 1966. — 519 с.
5. Киселев Е. С. Научные основы и технология шлифования заготовок: сборник учебно-исследовательских лабораторных работ / Е. С. Киселев, В. Н. Ковальногов. — Ульяновск: УлГТУ, 2006. — 52 с.
6. Ардашев Д. В. Режимы резания на работы, выполняемые на шлифовальных и доводочных станках с ручным управлением и полуавтоматах: справочник / Д. В. Ардашев, Д. Е. Анельчик, Г. И. Буторин [и др.]. — Челябинск: Изд-во АТОСКО, 2007. — 384 с.

References (transliterated)

1. Khudobyn L. V. *Smazochno-ohlazhdajushhie tehnologicheskie sredstva i ih primeneniye pri obrabotke rezaniem* [Lubricating and cooling technological tools and their application in the machining process]. reference book, Moscow, Mashynostroenye Publ, 2006. 544 p.
2. Kyselev E. S. *Intensifikacija processov mehanicheskoy obrabotki ispol'zovaniem jenerгии ul'trazvukovogo polja* [Intensification of machining processes using ultrasonic energy field]. teaching aid, Ul'yanovsk, UIHTU, 2003. 86 p.
3. Efymov V. V. *Nauchnye osnovy tehniki podachi SOZh pri shlifovanii* [Scientific bases of technology coolant during grinding]. Saratov, SHU, 1985. 140 p.
4. Zarembo L. N., Krasyl'nykov V. A. *Vvedeniye v nelinejnuju akustiku* [Introduction to nonlinear acoustics]. Moscow, Nauka Publ, 1966. 519 p.
5. Kyselev E. S., Koval'nohov V. N. *Nauchnye osnovy i tehnologija shlifovaniya zagotovok* [Scientific basis and technology of grinding pieces]. a collection of research laboratory operations, Ul'yanovsk: UIHTU, 2006. 52 p.
6. Ardashev D. V., Anel'chik D. E., Butoryn H. Y. *Rezhimy rezaniya na raboty, vypolnjaemye na shlifoval'nyh i dovodochnyh stankah s ruchnym upravleniem i poluavtomatah* [Cutting Conditions on the work carried on the grinding and finishing machine tools with manually operated and semi-automatic machines]. reference book, Chelyabinsk, ATOSKO Publ, 2007. 384 p.

Поступила (received) 29.03.2015

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Дослідження технологічної ефективності пристроїв для подачі мастильно-охолоджувальної рідини через клинові напіввідкриті насадки до торця круга при круглому зовнішньому шліфуванні / О.Л. Кондратюк, А.О. Скоркін // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. — Х.: НТУ «ХПІ», 2016. — № 5 (1177). С. 34-40. — Бібліогр.: 6 назв. — ISSN 2079-004X.

Исследование технологической эффективности устройств для подачи смазочно-охлаждающих жидкостей через клиновые полукрытые насадки к торцу круга при круглом наружном шлифовании / О.Л. Кондратюк, А.О. Скоркин // Вестник НТУ «ХПІ». Серія: Технологии в машиностроении. - Х.: НТУ «ХПІ», 2016. - № 5 (1177). С. 34-40. - Библиогр.: 6 названий. - ISSN 2079-004X.

Research of technological efficiency of devices for supplying through a half open nozzle cooling lubricants to the edge the circle with a circular external grinding / O. L. Kondratiuk, A. O. Skorkyn // Bulletin NTU «KhPI». Series: Technologies in mechanical engineering. — Kharkiv. : NTU «KhPI», 2016. - № 5 (1177). — P. 34-40. — Bibliogr.: 6. — ISSN 2079-004X.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Кондратюк Олег Леонідович — канд. техн. наук, доц. УІПА, м. Харків, тел.: (057)-733-78-26;

Кондратюк Олег Леонідович — канд. техн. наук, доц. УІПА, г. Харьков, тел.: (057)-733-78-26;

Kondratiuk Oleg Leonidovich — Candidate of Technical Sciences, Docent of Ukrainian Engineering Pedagogics Academy, tel.: (057)-733-78-26, e-mail: Kondratuk_uipa@I.ua;

Скоркін Антон Олегович — канд. техн. наук, доц. УІПА, м. Харків, тел.: (057)-733-78-26;

Скоркін Антон Олегович — канд. техн. наук, доц. УІПА, г. Харьков, тел.: (057)-733-78-26;

Skorkyn Anton Olegovich — Candidate of Technical Sciences, Docent of Ukrainian Engineering Pedagogics Academy, tel.: (057)-733-78-26

УДК 681.518.3

О. Ф. ЄНІКЄВ, Ф. М. ЄВСЮКОВА, І. С. ЗИКОВ

ТРИВИМІРНА ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНА СИСТЕМА ЗАДАВАННЯ ПАРАМЕТРІВ АЛМАЗНОГО ШЛІФУВАННЯ В УМОВАХ НЕПОВНОЇ ІНФОРМАЦІЇ

На основі принципів децентралізації та розпаралелювання процесів обробки вхідних сигналів, методів безпосереднього цифрового та покоординатного управління, ієрархічного принципу, непрямих вимірювань мікронерівностей та різальної властивості круга розроблено тривимірну триступінчасту інформаційно-вимірювальну систему задавання параметрів алмазного шліфування. Побудовано математичні моделі апаратних засобів. На основі мінімізації квадратичного критерію якості з використанням еталонних математичних моделей апаратних засобів з відомим запізненням розроблено пристрої обробки сигналів. Складено схеми комп'ютерного моделювання процесів перетворення вхідних сигналів апаратними засобами інформаційно-вимірювальної системи. Встановлено ефективність апаратних засобів, які розроблено.

Ключові слова: апаратні засоби, інформаційно-вимірювальна система, непрямі вимірювання, комп'ютерне моделювання.

На основе принципов децентрализации и распараллеливания процессов обработки входных сигналов, методов непосредственного цифрового и покоординатного управления иерархического принципа, косвенных измерений микронеровностей и режущей способности круга разработана трехмерная трехступенчатая информационно-измерительная система задания параметров алмазного шлифования. Построены математические модели аппаратных средств. На основе минимизации квадратичного критерия качества с применением эталонных моделей каналов получены передаточные функции устройств обработки сигналов. Составлены схемы компьютерного моделирования процессов преобразования аппаратными средствами информационно-измерительной системы входных сигналов. Установлена эффективность разработанных аппаратных средств.

Ключевые слова: аппаратные средства, информационно-измерительная система, косвенные измерения, компьютерное моделирование.

Devices of principles of decentralization and parallelization of incoming information processing, methods of coordinate and digital control, the hierarchical principle, indirect measurements of roughness and cutting properties of a circle developed of three-dimensional three-stage information-measuring system of setting parameters of diamond grinding. The mathematical models of interference of hardware means. Devices of signal processing means are designed on the basis of minimizing of a quadratic quality criterion with using standard mathematical models of hardware means with a known delay.

Keywords: hardware means, information-measuring system, indirect measurements, computer simulation.

Вступ. Застосування відомих інформаційно-вимірювальних систем (ІВС) для підвищення економічної ефективності технологічних процесів алмазного шліфування (АШ) орієнтовано на скорочення часу обробки деталі та отримання заданої шорсткості поверхні [1]. Програмне забезпечення одновимірних апаратних засобів автоматизації процесів АШ розв'язує задачі задавання відповідних технологічних параметрів, які зберігає банк даних у вигляді програми обробки партії деталей. При цьому не використовується інформація про поточну якість поверхні деталі, оскільки отримати цей сигнал шляхом прямих вимірювань неможливо у зв'язку з відсутністю первинних перетворювачів. Від обставина робить неефективним використання відомих ІВС.

Метою статті є розробка апаратних засобів тривимірної ІВС для покоординатного задавання параметрів АШ в умовах неповної інформації та дії випадкових завад. Для досягнення поставленої мети розв'язано такі завдання:

- розробка концепції програмного керування ІВС рухами апаратних засобів шліфувальних верстатів (ШВ) зі скорочення часу обробки деталі та забезпеченню заданого «якості» чистоти поверхні;
- розробка архітектури ІВС на основі принципів децентралізації та розпаралелювання процесів обробки вхідних сигналів;
- математичне моделювання апаратних засобів з урахуванням факторів невизначеності, які обумовлено дією завад та похибками вимірювань вхідних сигналів;

- побудова пристроїв обробки сигналів та визначення продуктивності.

Концепція програмного керування ІВС рухами апаратних засобів ШВ. Інформаційне забезпечення системи подано в такому вигляді:

- $\bar{U} = (u_1, u_2, \dots, u_i)^T$ - вектор вихідних сигналів;
- $\bar{X} = (S_{\ddot{w}}, S_{\ddot{w}ac}, \omega_{e\delta})^T$ - вектор вхідних сигналів;
- $\bar{Q} = (\Delta_{a\delta}, S_{\ddot{w}}, \ddot{w}, S_{\ddot{w}ac}, \ddot{w}, \omega_{e\delta, \ddot{w}})^T$ - вектор уставок банку даних процесу АШ;
- $\bar{\xi} = (\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_k)^T$ - вектор завад;
- $F(\bar{U}, \bar{Q}, \bar{\xi}, \Delta\omega, P_a, \omega_{e\delta}) = \bar{Y}$ - математична модель програмного керування ІВС рухами апаратних засобів ШВ в умовах неповної інформації та дії випадкових завад;
- $F_k = (u_k, \bar{Q}_k, \bar{\xi}_k) = 0$ - математична модель перетворення вхідної інформації каналом ІВС.

Сила різання матеріалу заготівлі утворює збурювання, яке є джерелом крутильних коливань. Вал зі встановленим на ньому шліфувальним кругом (ШК) подано механічною системою з одним ступенем волі. Рух маси цієї системи описано таким інтегродиференціальним рівнянням

$$J_{кр} \Delta\omega'(t) + \beta_1 \Delta\omega(t) + \frac{\gamma_1}{t_1} \int_{t_1}^{t_1} \Delta\omega(t) dt = RF(t), \quad (1)$$

де $J_{кр}$ – момент інерції ШК, $\Delta\omega(t)$ – девіації, β_1 – коефіцієнт демпфування, γ_1 – крутильний опір валу, $\varphi(t)$ – кут закрутки, $F(t)$ – сила різання, R – радіус круга.

© О.Ф. Єнікєв, Ф.М. Євсюкова, І.С. Зиков, 2015

Це рівняння встановлює інформаційний зв'язок між девіаціями швидкості обертання ШК та силою різання матеріалу заготівлі.

Концепцію програмного керування ІВС рухами апаратних засобів ШВ подано на рис. 1. На рисунку позначено: $\Delta\omega$, P_e – сигнали девіації та потужності; $q_{\text{під}}$ – сигнал задавання скважності; R_z – мікронерівності, які прогнозуються. Програмні рухи забезпечуються задаванням подач та швидкості обертання ШК, які зберігає банк даних ІВС.

Архітектура ІВС. В основу її розробки покладено: принципи децентралізації та розпаралелювання процесів обробки сигналів, мікроконтролер МС68HC912В32, методи безпосереднього цифрового та покоординатного управління, ієрархічний принцип, непрямі вимірювання мікронерівностей [2] та різальних властивостей ШК, а також принцип мультиплексування шин адреси та даних. Схема тривимірної триступеневої ІВС подана на рис. 2. На рисунку позначено: ВМ – виконуючий механізм; П – перетворювач; Д

– датчик; ЕП – електричний привод; ЦАП – цифро-аналоговий перетворювач.

Інформаційний зв'язок між ІВС та процесом АШ забезпечують сигнали подач та швидкості обертання круга. Апаратні засоби першого ступеня системи задають параметри АШ, які зберігає банк даних у вигляді відповідного вектора. Вихідні сигнали формуються ними під час прямої або зворотної ходи шліфувального круга.

Сигнал миттєвої швидкості обертання алмазного інструмента є вхідним для апаратних засобів другого ступеня. Пристрій 4 на основі прямих вимірювань миттєвої швидкості та за допомогою інформаційної технології обробки цього сигналу визначає мікронерівності поверхні деталі, амплітуда яких прогнозується. Алгоритм обробки сигналу швидкості складається з таких обчислювальних процедур: виділення сигналу девіації та подання його обмеженим рядом Фур'є; визначення діючого значення та його порівняння з еталонним рівнем, котрий встановлено програмою обробки партії деталей.

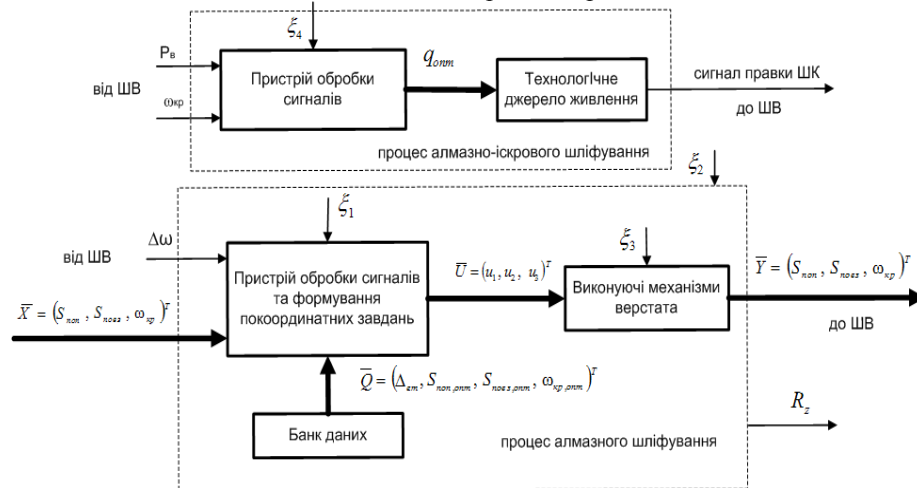


Рис. 1 – Концепція програмного керування ІВС рухами апаратних засобів ШВ

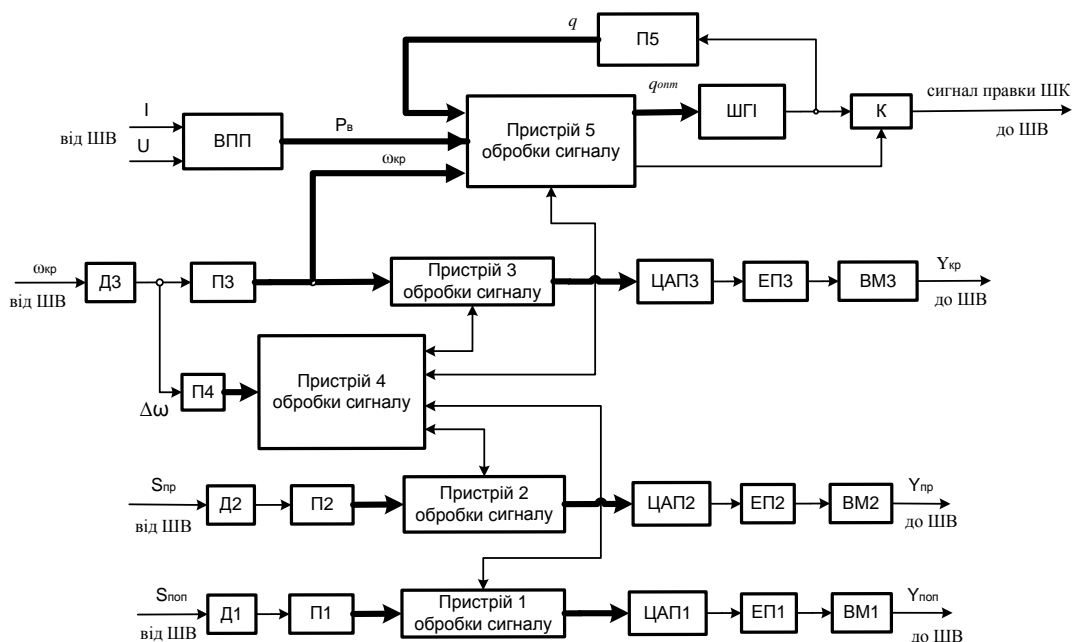


Рис. 2 – Архітектура тривимірної триступеневої ІВС

Якщо амплітуда можливих мікронерівностей перевищує рівень, який задано прийнятим «квалітетом» чистоти поверхні деталі, то пристрій 4 аналізує банк даних та формує сигнали коригування подачі. Обробка цих сигналів виконується пристроями 1, 2 та 3 під час пауз між прямою та зворотною ходом алмазного інструменту. ВМ1-ВМ3 задають нові параметри АШ.

Інформаційний зв'язок між процесом АШ та апаратними засобами третього ступеня ІВС забезпечують сигнали струму та напруги ВМ3, а також сигнал швидкості обертання. На основі допускового контролю та непрямих вимірювань різальної властивості круга вони реалізують нову технологію безперервної обробки поверхні деталі, яка поєднує процеси алмазного та алмазно-іскрового шліфування (АІШ). Інформаційний зв'язок між апаратними засобами третього ступеня та процесом АІШ забезпечує сигнал правки круга, електричні параметри якого вимірює П5. Паралельний інтерфейс забезпечує інформаційний зв'язок між блоками П1-П4, ВПП та пристроями 1-5, між пристроями 1-3 та ЦАП1-ЦАП3, а також пристроєм 5 та ШПІ. Процеси обміну даних між пристроями 1-5 забезпечує послідовний інтерфейс.

Моделювання апаратних засобів ІВС. У результаті аналізу структурної схеми блоку ЕПЗ разом із ВМ3 та математичних перетворень отримано передатну функцію [3]

$$W_1(p) = \frac{k_y k_z K_{uin} K_{ms} (T_{oc} p + 1) k_M p}{[e^{\tau_{uin} p} e^{\tau_{ms} p} (T_{uin} p + 1)(T_{ms} p + 1)(T_{oc} p + 1)(T_E p + 1) + 1](T_M p + 1)}, \quad (2)$$

де K_i, T_i – відповідно коефіцієнти передачі та постійні часу елементарних ланок математичної моделі. Досліджено частотні характеристики блоків ЕПЗ та ВМ3 і в результаті обробки дослідних даних встановлено, що він задовольняє вимогам ІВС за величиною похибки.

У результаті аналізу структурної схеми апаратних засобів обробки сигналу швидкості та математичних перетворень отримано передатну функцію в такому вигляді [3]

$$W_2(p) = \frac{b_0^* \tau_r p [T_3 \tau_3 p^2 + (T_3 + \tau_3) p + 1]}{a_4 p^4 + a_3 p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + 1}, \quad (3)$$

де $a_4 = T_1 T_2 T_3 \tau_3$,

$$a_3 = T_1 T_2 (T_3 + \tau_3) + (T_1 + T_2) T_3 \tau_3,$$

$$a_2 = T_1 T_2 + T_3 \tau_3 + \tau_r + (T_1 + T_2)(T_3 + \tau_3),$$

$$a_1 = T_1 + T_2 + T_3 + \tau_3.$$

Визначено z -перетворення передатних функцій блоків ЕПЗ та ВМ3. Математичну модель завади, яка діє на виході каналу обробки сигналу швидкості, подано у вигляді гармонійного лінійного випадкового процесу. Визначено його характеристики та на основі їхнього аналізу встановлено коректність моделі. Процедuru обробки апаратними засобами вхідного сигналу розроблено на основі принципу управління за відхиленням та подано в такому вигляді

$$C(z^{-1}) u_t = f_0 y_t + f_1 y_{t-1} + g_0 u_t + g_1 u_{t-1} + g_2 u_{t-2} + g_3 u_{t-3} + h_0 G_t + h_1 G_{t-1} + \delta = 0, \quad (4)$$

де δ – припустиме значення похибки апаратних засобів.

У результаті математичних перетворень останнього виразу отримано сигнал, який формує пристрій 3 на ЕПЗ в кожний період дискретизації

$$u_t = g_0^{-1} (f_0 y_t + f_1 y_{t-1} + g_1 u_{t-1} + g_2 u_{t-2} + g_3 u_{t-3} + h_0 G_t + h_1 G_{t-1} + \delta). \quad (5)$$

Мінімізацією квадратичного критерію якості з використанням еталонної моделі каналу отримана передатна функція пристрою 3 обробки сигналу швидкості в такому вигляді [3]

$$W_{i3}(z) = 1.206 \frac{z^2 - 0.1706z}{z^2 - 0.995z - 5.019 \cdot 10^{-3}}. \quad (6)$$

На основі виразів (3) та (6) розроблено схему комп'ютерного моделювання процесу обробки апаратними засобами ІВС сигналу швидкості обертання ШК (рис. 3). Отримано сигнали кутової швидкості обертання круга та струму обмотки збудження двигуна у функції часу.

З урахуванням смуги (Δ_1) нечутливості первинного перетворювача, яку визначено в результаті статистичної обробки дослідних даних, отримана передатна функція блоків Д1 та П1 в такому вигляді [4]

$$W_3(p) = \frac{\Delta_1 k_{i1} e^{-p\tau_{i1}}}{T_{i1} p + 1}. \quad (7)$$

У результаті аналізу схеми побудови та математичних перетворень отримали таку передатну функцію ЕП1 разом з ВМ1 [4]

$$W_4(p) = \frac{k_{\phi} k_{\gamma} K_{\phi \gamma} K_{\delta \alpha} (T_{\alpha \beta} p + 1) k_i}{[e^{\tau_{\phi \gamma} p} e^{\tau_{\delta \alpha} p} (T_{\phi \gamma} p + 1)(T_{\delta \alpha} p + 1)(T_{\alpha \beta} p + 1)(T_A p + 1) + 1](T_i p + 1)}. \quad (8)$$

Аналіз нулів та полюсів передатної функції дозволив без суттєвих втрат точності подати його в такому вигляді

$$W_5(p) = \frac{b_0^*}{(\zeta_1 T_4 p + 1) \left(\frac{T_4}{\zeta_1} p + 1 \right) (T_5 p + 1)}. \quad (9)$$

Аналіз нулів та полюсів передатної функції дозволив без суттєвих втрат точності подати його в такому вигляді

$$W_5(p) = \frac{b_0^*}{(\zeta_1 T_4 p + 1) \left(\frac{T_4}{\zeta_1} p + 1 \right) (T_5 p + 1)}. \quad (9)$$

Вхідний сигнал каналу обробки сигналу поперечної подачі ШК подано у вигляді обмеженого ряду Фур'є

$$S_{\text{in}}(t) = \sum_{k=1}^n A_{2k-1} \{ e^{j[(2k-1)\Omega t - 0.5\pi]} - e^{-j[(2k-1)\Omega t - 0.5\pi]} \}, \quad (10)$$

$$\text{де } A_{2k-1} = \frac{4S_{\text{in}}}{\pi(2k-1)} \cos \left[\frac{(2k-1)\Omega}{2} (t_1 - t_2) \right];$$

Ω – кругова частота першої гармоніки.

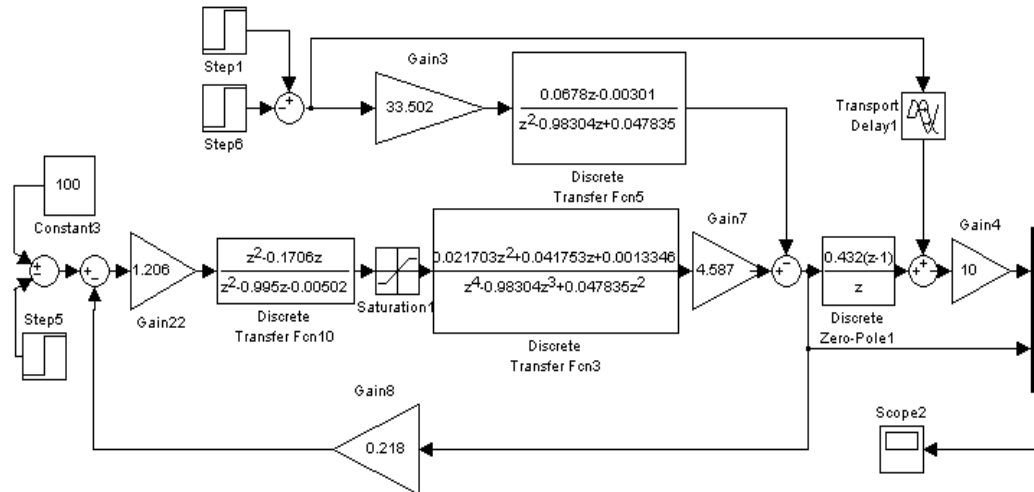


Рис. 3 – Схема комп’ютерного моделювання процесу обробки сигналу швидкості обертання ШК

На основі теореми про згортку з використанням передатної функції каналу отримано вираз, який описує його вихідний сигнал [2]

$$y_{non}(t) = \sum_{k=1}^4 B_k e^{-p_k t} \sum_{i=1}^n \frac{2A_{2i-1}T_k}{\sqrt{1+T_k^2(2i-1)^2\Omega^2}} e^{j[0.5\pi - \arctg T_k(2i-1)\Omega]} \quad (11)$$

Визначено z-перетворення передатних функцій ЕП1 разом із ВМ1. Математичну модель випадкової завади, яка діє на виході каналу, подано у вигляді фліккер-шуму. Виконано аналіз характеристик цього випадкового процесу та встановлено його придатність для подання. На основі принципу управління за відхиленням процедуру обробки сигналу поперечної подачі ШК подано в такому вигляді

$$b_0^o U_t = R_1(z^{-1})y_{m,t+d+1} - F(z^{-1})y_t - [D(z^{-1}) - b_0^o]U_t, \quad (12)$$

де $y_{m,t+d+1}$ – вихідний сигнал апаратних засобів обробки сигналу поперечної подачі ШК, який прогнозується; ступеневі поліноми

$$R_1(z^{-1}) = \frac{\Delta_2 k_l T_l (1-l_4)}{\varepsilon_{\text{аіі}}} z^{-1},$$

$$D(z^{-1}) = g_0 + g_1 z^{-1} + g_2 z^{-2},$$

$$F(z^{-1}) = f_0 + f_1 z^{-1} + f_2 z^{-2}.$$

Мінімізацією квадратичного критерію якості з використанням еталонної моделі каналу отримана передатна функція пристрою 1 обробки сигналу поперечної подачі ШК [5]

$$W_{i1}(z^{-1}) = 767.113 \frac{2.3 - 3.453z^{-1} + 1.33z^{-2}}{0.262 + 0.008z^{-1} + 0.218z^{-2}}. \quad (13)$$

На основі виразів (9) та (13) розроблено схему комп’ютерного моделювання процесу обробки сигналу поперечної подачі ШК (рис. 4).

У результаті аналізу структурної схеми апаратних засобів обробки сигналу поздовжньої подачі ШК із застосуванням комп’ютерного моделювання та

математичного апарату z-перетворень отримано наступні вирази для передатних функцій [6]

$$W_6(z^{-1}) = z^{-2} \frac{b_1^o z^{-1} + b_2^o z^{-2} + b_3^o z^{-3}}{1 + a_1^o z^{-1} + a_2^o z^{-2} + a_3^o z^{-3}},$$

$$W_7(z^{-1}) = \frac{k_l z^{-1} [1 - T_l + (T_l - l_4)z^{-1}]}{1 - (1+l_8)z^{-1} + l_8 z^{-2}}.$$

У цих виразах враховано запізнювання, яке вносять блок П2, екстраполятор та ЕП2. Також враховано смугу нечутливості первинного перетворювача, яку визначено в результаті статистичної обробки дослідних даних.

Сигнал поздовжньої подачі ШК подано обмеженим рядом Фур’є. На основі теореми про згортку з використанням передатної функції каналу отримано вираз, який описує його вихідний сигнал [3]

$$y_{н\text{ік}}(t) = \sum_{k=5}^8 B_k e^{-p_k t} \sum_{i=1}^n \frac{\hat{A}_{2i-1}T_k}{\sqrt{1+T_k^2(2i-1)^2\Omega^2}} [e^{j\arctg T_k(2i-1)\Omega} - e^{-j\arctg T_k(2i-1)\Omega}]. \quad (14)$$

Математичну модель випадкової завади апаратних засобів обробки сигналу поздовжньої подачі ШК подано у вигляді фліккер-шуму, який діє на виході. Виконано аналіз характеристик цього випадкового процесу та встановлено його придатність для подання. Мінімізацією квадратичного критерію якості з використанням еталонної моделі апаратних засобів отримана передатна функція пристрою 2 обробки сигналу поздовжньої подачі ШК в такому вигляді [3]

$$W_{i2}(z^{-1}) = \frac{0.04752 + 0.862z^{-1} - 0.823z^{-2}}{0.374 - 0.374z^{-1}}. \quad (15)$$

На основі виразу (15) розроблено схему комп’ютерного моделювання процесу обробки сигналу поздовжньої подачі ШК (рис. 5).

У результаті аналізу структурної схеми апаратних засобів оцінювання прогнозованих мікронерівностей із використанням моделей його компонентів та математичного апарату z-перетворень отримано вираз для передатної функції [3]

$$W_{33}(z^{-1}) = \frac{b_1^* z^{-1}}{1 + a_1^* z^{-1} + a_2^* z^{-2}}, \quad (16)$$

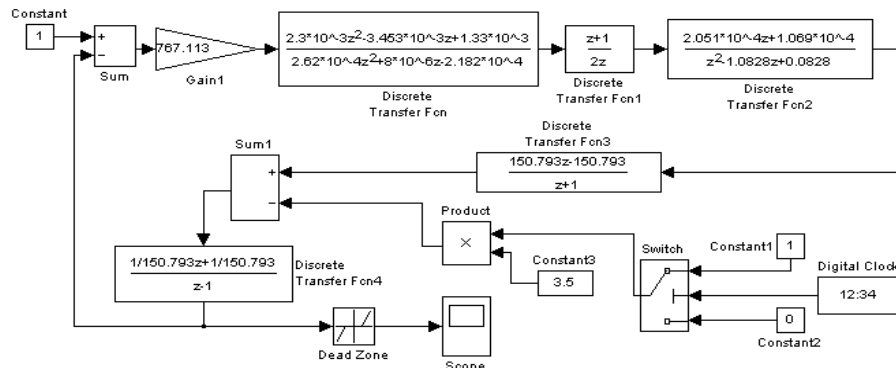


Рис. 4 – Схема комп’ютерного моделювання процесу обробки сигналу поперечної подачі ШК

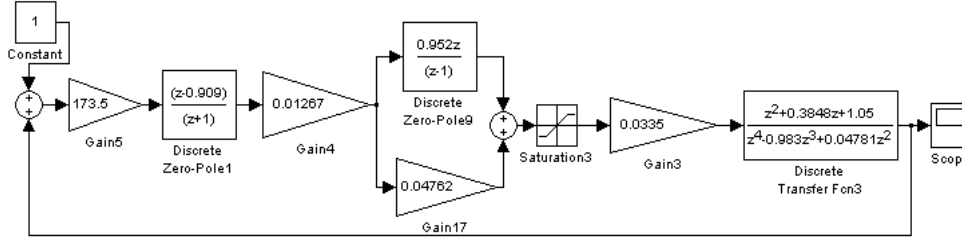


Рисунок 5 – Схема комп’ютерного моделювання процесу обробки сигналу поздовжньої подачі ШК

$$\begin{aligned}
 \text{де } b_1^* &= \frac{\Delta_5 k_{a3} k_{i4}}{\tau_{i4} - T_{a3}} \left(e^{-\frac{T_0}{\tau_{i4}}} - e^{-\frac{T_0}{T_{a3}}} \right), \\
 a_2^* &= e^{-\left(\frac{T_0}{T_{a3}} + \frac{T_0}{\tau_{i4}} \right)}, \\
 a_1^* &= - \left(e^{-\frac{T_0}{\tau_{i4}}} + e^{-\frac{T_0}{T_{a3}}} \right). \text{ Враховано запізнення}
 \end{aligned}$$

апаратних засобів та похибка вимірювань девіацій. На основі теореми про згортку з використанням передатної функції апаратних засобів оцінювання мікронерівностей отримано вираз, який описує вихідний сигнал [3]

$$\begin{aligned}
 y_{D2}(t) &= B_9 e^{-\frac{1}{T_{i6}} t} \sum_{k=1}^{10} \frac{A_k T_{i6}}{\sqrt{1+T_{i6}^2 k^2 \Omega^2}} \left[e^{j(\psi_k+0.5\pi-\arctg T_{i6} k \Omega)} - e^{-j(\psi_k+0.5\pi+\arctg T_{i6} k \Omega)} \right] + \\
 &+ B_{10} e^{-\frac{1}{T_{i7}} t} \sum_{k=1}^n \frac{A_k T_{i7}}{\sqrt{1+T_{i7}^2 k^2 \Omega^2}} \left[e^{j(\psi_k+0.5\pi-\arctg T_{i7} k \Omega)} - e^{-j(\psi_k+0.5\pi+\arctg T_{i7} k \Omega)} \right].
 \end{aligned} \tag{17}$$

Мінімізацію квадратичного критерію якості з використанням еталонної моделі апаратних засобів отримана передатна функція пристрою 4 обробки сигналу миттєвої швидкості в такому вигляді [3]

$$W_{i4}(z^{-1}) = \frac{1.54 - 2.096z^{-1} + 0.616z^{-2}}{2.574 + 0.083z^{-1} - 2.156z^{-2}}. \tag{18}$$

На основі виразів (16) та (18) розроблено схему комп’ютерного моделювання процесу перетворення інформації апаратними засобами оцінювання мікронерівностей (рис. 6).

Інформаційна технологія поділу внесків подач до виміральної часової реалізації девіацій швидкості

обертання круга розроблено на основі частотного подання вказаних сигналів.

Передатні функції внесків подач до сигналу девіацій отримано з аналізу математичної моделі процесу АШ в такому вигляді [6]

$$\begin{aligned}
 W_{iii}(p) &= \frac{K_n T_{i3} b_1 p^2}{(T_{i1} p + 1)(T_{i2} p + 1)(T_{i4} p + 1)(T_{i5} p + 1)}, \\
 W_{ii\zeta}(p) &= \frac{K_n T_{i3} b_0 p}{(a_1 p + a_0)(T_{i4} p + 1)(T_{i5} p + 1)}.
 \end{aligned}$$

За допомогою цих виразів комп’ютерним моделюванням отримано графіки внесків подач до сигналу девіацій (рис. 7). Визначено вагові коефіцієнти поділу внесків подач.

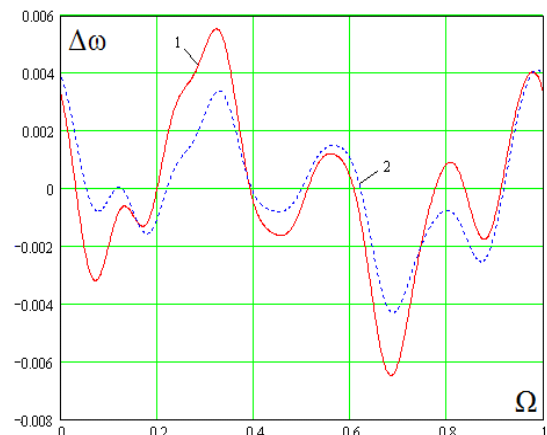


Рис. 7 – Графіки внесків подач до сигналу девіацій: 1 – поперечної подачі, 2 – поздовжньої

На основі допускового контролю сигналу девіацій розроблено такий алгоритм формування пристроєм 4 уставок для пристроїв 1, 2 та 3 обробки сигналів:

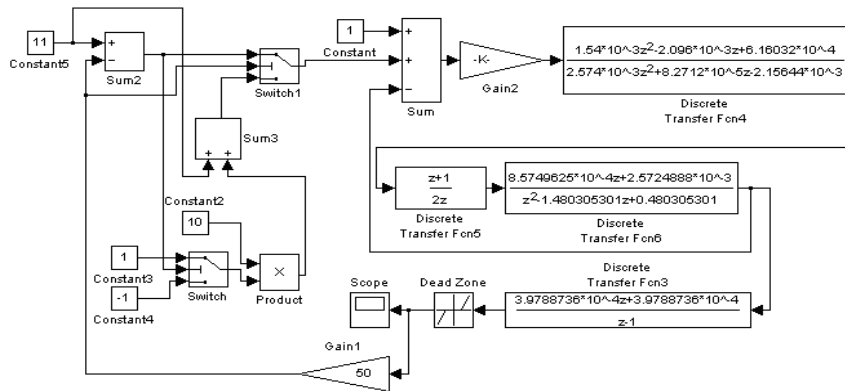


Рис. 6 – Схема комп’ютерного моделювання процесу перетворення інформації апаратними засобами оцінювання мікронерівностей

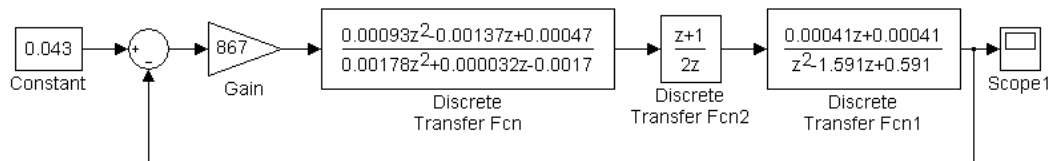


Рис. 8 – Схема комп’ютерного моделювання процесу задавання параметрів АПШ

- часову реалізацію сигналу девіацій після нормалізації його параметрів подаємо обмеженим рядом Фур’є;
- визначаємо діюче значення сигналу девіацій;
- нормовані значення подач одержуємо шляхом множення діючого значення сигналу девіацій на відповідний ваговий коефіцієнт;
- аналізуємо банк даних про еталонні рівні амплітуд девіацій і за потреби виконуємо коригування величин подач.

У результаті аналізу структурної схеми апаратних засобів задавання параметрів АПШ із застосуванням моделей компонент та апарату z-перетворень отримано вираз для передатної функції [7]

$$W_{P3}(z^{-1}) = \frac{k_{\dot{\theta} \dot{E} \dot{I} \dot{A} \dot{\Phi}} T_{\dot{a}} (T_{\dot{a}} + K_{I \dot{\theta}} T_{i \dot{\theta}}) \frac{T_{18}}{T_{17} - T_{16}} \left(e^{-\frac{T_0}{T_{17}}} + e^{-\frac{T_0}{T_{16}}} \right) z^{-1}}{1 - \left(e^{-\frac{T_0}{T_{16}}} + e^{-\frac{T_0}{T_{17}}} \right) z^{-1} + e^{-\frac{T_0}{T_{17}}} e^{-\frac{T_0}{T_{16}}} z^{-2}} \quad (19)$$

Поданням вхідного сигналу одиничною функцією Хевісайда та на основі теореми про згортку з використанням передатної функції апаратних засобів отримано вираз, який описує його вихідний сигнал, [7]

$$y_{\dot{E} \dot{I} \dot{A} \dot{\Phi}}(t) = 1(t) + \frac{B_{12} \dot{\theta}_{17}}{\dot{\theta}_{17} + 1} e^{-\frac{\dot{\theta}_{17} t}{T_{17} + 1}} - \frac{B_{11} \dot{\theta}_{16}}{\dot{\theta}_{16} + 1} e^{-\frac{\dot{\theta}_{16} t}{T_{16} + 1}} \quad (20)$$

Мінімізацією квадратичного критерію якості з використанням еталонної моделі каналу отримано передатну функцію пристрою 5 обробки сигналів у такому вигляді [7]

За допомогою виразів (19) та (21) розроблено схему комп’ютерного моделювання процесу перетворення інформації апаратними засобами задавання параметрів АПШ (рис. 8).

$$W_{I5}(z^{-1}) = \frac{k_{\dot{\theta} \dot{A} \dot{z}} T_{\dot{a}} (T_{\dot{a}} + K_{I \dot{\theta}} T_{i \dot{\theta}}) \frac{T_{18}}{T_{17} - T_{16}} \left(e^{-\frac{T_0}{T_{17}}} + e^{-\frac{T_0}{T_{16}}} \right) z^{-1}}{1 - \left(e^{-\frac{T_0}{T_{16}}} + e^{-\frac{T_0}{T_{17}}} \right) z^{-1} + e^{-\frac{T_0}{T_{17}}} e^{-\frac{T_0}{T_{16}}} z^{-2}} \quad (21)$$

Розроблено прикладне програмне забезпечення та бази даних триступінчастої ІВС.

Висновок. Уперше запропоновано концепцію програмного керування ІВС рухами апаратних засобів ШВ щодо скорочення часу обробки деталі та отримання прогнозованих мікронерівностей із використанням непрямих вимірювань шорсткості та різальної властивості ШК. На основі методів безпосереднього цифрового та покоординатного управління, принципів децентралізації та розпаралелювання процесів обробки вхідної інформації розроблено тривимірну триступеневу структуру ІВС. Встановлено структурно-алгоритмічні зв’язки між компонентами та принципи роботи апаратних засобів ІВС. На основі еталонних моделей каналів, які мають відоме запізнення, у результаті мінімізації квадратичного критерію якості розроблено апаратні засоби тривимірної триступінчастої ІВС для обробки сигналів. З використанням математичного апарату дискретного перетворення Лапласа побудовано схеми комп’ютерного моделювання процесів обробки інформації апаратними засобами тривимірної триступеневої ІВС. У результаті комп’ютерного моделювання встановлено, що апаратні засоби відповідають вимогам ІВС за продуктивністю.

Список літератури

1. Еникеев А.Ф. Оптимальное управление технологическим процессом алмазного шлифования. – Краматорск: ДГМА, 2001. – 160с.
2. Сниксеев А.Ф. Реализация непрямих вимірювань мікронерівностей деталей для підвищення ефективності алмазного шліфу-

- вання / О.Ф. Єнікєєв, Г.В. Соколовська, Т.Л. Щербак // Моделювання та інформаційні технології. – 2012. – Вип. 62. – С. 41–48.
- Єнікєєв А.Ф. Оптимальний цифровий регулятор привода обертання шліфувального круга / О.Ф. Єнікєєв, Ф.М. Євсюкова, І.С. Зиков, Л.О. Шищенко // Вестник национального технического университета «ХПИ». – 2007. – №17. – С. 91–98.
 - Єнікєєв А.Ф. Анализ эффективности аппаратных средств управления поперечной подачей шлифовального круга / А.Ф. Єнікєєв, Ф.М. Євсюкова, Л.А. Шищенко // Вестник национального технического университета «ХПИ». – 2015. – № 4. – С. 132–137.
 - Єнікєєв А.Ф. Синтез цифрового регулятора поперечної передачі шліфувального круга / О.Ф. Єнікєєв, І.С. Зиков // Вестник Национального технического университета «ХПИ». – Харьков: №57, 2008. – С. 87–93.
 - Єнікєєв А.Ф. Комп'ютерна система підвищення ефективності алмазного шліфування в умовах неповної інформації / О.Ф. Єнікєєв // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. – Вінниця: № 2, 2014. – С. 40–49.
 - Єнікєєв А.Ф. Система управління процесом правки шліфувальних кругів на металевому зв'язуванні / О.Ф. Єнікєєв, Ф.М. Євсюкова, Л.О. Шищенко // Вестник национального технического университета «ХПИ». – 2008. – №23. – С. 109–113.

References (transliterated)

- Ienikieiev A.F. *Optimalnoe upravlenie tehnologicheskim processom almaznogo shlifovaniya* [Optimum process control diamond grinding]. Kramatorsk, DGMA, 2001, 160 p.
- Yenikyeyev O.F., Sokolovska G.V., Shherbak T.L. Realizatsiia nepriamykh vymiriuvan mikronerivnostei detalei dlia pidvyshchennia

efektyvnostialmaznogo shlifuvannya [Implementation indirect measurements of microscopic detail to improve the efficiency of diamond polishing]. *Modeliuvannia ta informatsiini tehnologii*. 2012, No 62, pp. 41–48.

- Ienikieiev A.F., Ievsiukova F.M., Zikov I.S., Shushenko L.A. Optymalni tsyfrovii regulator pryvoda obertannia shlifovalnogo kruha [Optimal digital drive controller obertannya shlifovalnogo circle]. *Vestnik natsionalnogo tekhnicheskogo universiteta «KhPI»*. Kharkov, 2015, No 4, pp. 132–137.
- Ienikieiev A.F., Ievsiukova F.M., Shushenko L.A. The analysis of the efficiency of hardware control of the longitudinal feed of the grinding wheel [Analysis of the effectiveness of hardware management in peppermint feed wheel]. *Vestnik natsionalnogo tekhnicheskogo universiteta «KhPI»*. Kharkov, 2007, No 17, pp. 91–98.
- Ienikieiev A.F., Zikov I.S. Syntez tsyfrovoho rehuliatora poperechnoi peredachi shlifovalnogo kruha [Synthesis of digital regulator traverse grinding wheel]. *Vestnik natsionalnogo tekhnicheskogo universiteta «KhPI»*. Kharkov, 2008, No 57, pp. 87–93.
- Ienikieiev O.F. Komp'iuterna sistema pidvyshchennia efektyvnosti almaznogo shlifuvannya v umovakh nepovnoi informatsii [Computer system efficiency diamond grinding under incomplete information]. *Informatsiini tehnologii ta kompiuterna inzheneriia. Mizhnarodnii nauko-tekhnichii zhurnal VNTU*. Vinnitsa, 2014, No 2, pp. 40–49.
- Ienikieiev O.F., Ievsiukova F.M., Shushenko L.O. Sistema upravlinnia protsesom pravky shlifovalnykh kruhiv na metalovomu zviazuванні [Process control system edits grinding wheels on a metal binding]. *Vestnik natsionalnogo tekhnicheskogo universiteta «KhPI»*, 2008, No 23, pp. 109–113.

Поступила (received) 10.04.2016

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Тривимірний інформаційно-вимірювальна система задавання параметрів алмазного шліфування в умовах неповної інформації / О.Ф. Єнікєєв, Ф.М. Євсюкова, І.С. Зиков // Вісник НТУ «ХПИ». Серія: Технології в машинобудуванні. – Х.: НТУ «ХПИ», 2016. – № 5 (1177). С. 41-47. – Бібліогр.: 7 назв. – ISSN 2079-004X.

Трёхмерная информационно-измерительная система задания параметров алмазного шлифования в условиях неполной информации / А.Ф. Еникеев, Ф.М. Евсюкова, И.С. Зыков // Вестник НТУ «ХПИ». Серія: Технологии в машиностроении. – Х.: НТУ «ХПИ», 2016. – № 5 (1177). С. 41-47. – Бібліогр.: 7 названий. – ISSN 2079-004X.

The three-stage information-measuring system of setting parameters of diamond grinding of incomplete information / A. Ienikieiev, F.M. Evsiukova, I.S. Zikov // Bulletin NTU «KhPI». Series: Technologies in mechanical engineering. – Kharkiv. : NTU «KhPI», 2016. – № 5 (1177). – P. 41-47. – Bibliogr.: 7. – ISSN 2079-004X.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Єнікєєв Олександр Фанилович – канд. техн. наук, доцент, Український державний університет залізничного транспорту (УкрДУЗТ), м. Харків, (050)-194-33-57, (096)-245-32-83, e-mail: Al_enikeev@bigmir.net;

Єнікєєв Олександр Фанилович - канд. техн. наук, доцент, Украинский государственный университет железнодорожного транспорта (УкрГУЖТ), г. Харьков, (050) -194-33-57, (096) -245-32-83, e-mail: Al_enikeev@bigmir.net;

Єнікєєв Олександр Фанилович – Candidate of Technical Sciences, Docent, Kharkov State Academy of Railway Transport, Kharkov, tel.: (050)-194-33-57, (096)-245-32-83, e-mail: Al_enikeev@bigmir.net;

Євсюкова Фатима Магометдієвна – старший викладач НТУ «ХПИ», (097)-941-22-99, e-mail: evsyukova_fatima@mail.ru;

Євсюкова Фатима Магометдієвна - старший преподаватель НТУ «ХПИ», (097) -941-22-99, e-mail: evsyukova_fatima@mail.ru;

Євсюкова Фатима Магометдієвна – Senior Lecturer of National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», (097)-941-22-99, e-mail: evsyukova_fatima@mail.ru;

Зиков Ігор Семенович – канд. техн. наук, доцент, професор НТУ «ХПИ», (093)-503-11-90, e-mail: agent_00@mail.ru;

Зиков Ігор Семенович - канд. техн. наук, доцент, профессор НТУ «ХПИ», (093) -503-11-90, e-mail: agent_00@mail.ru;

Зиков Ігор Семенович – Candidate of Technical Sciences, Docent, Professor of National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute» (093) -503-11-90, e-mail: agent_00@mail.ru.

УДК 666.97.033.16

М. Н. ГОРБАНЬ**КОНСТРУКЦИЯ ИНЕРЦИОННОГО ВИБРОГРОХОТА С ДВУХЧАСТОТНЫМ ПРИВОДОМ**

Представлена новая конструкция виброгрохота с двухчастотным приводом. Показана актуальность и перспективы использования грохота с двухчастотным приводом при разделении сыпучих материалов на фракции в производстве сухих строительных смесей. Приведен математический анализ его работы.

Ключові слова: апаратні засоби, інформаційно-вимірвальна система, непрямі вимірювання, комп'ютерне моделювання.

Представлена новая конструкция виброгрохота с двухчастотным приводом. Показана актуальность и перспективы использования грохота с двухчастотным приводом при разделении сыпучих материалов на фракции в производстве сухих строительных смесей. Приведен математический анализ его работы.

Ключевые слова: сыпучие смеси, грохот, двухчастотный привод.

New vibrating screen design with dual frequency drive. The urgency and prospects of screen with two-frequency drive for the separation of bulk materials into fractions in the production of dry building mixtures. A mathematical analysis of his work.

Keywords: free-flowing mixture, roar, dual-frequency drive.

Введение. Классификация сухих компонентов используемых в производстве строительных материалов, а в частности приготовлении сухих строительных смесей, в последнее десятилетие широко развивается. Одним из основных критериев, предъявляемых к качеству получаемых строительных смесей, является его качественное разделение по фракционному составу [1]. Для этого используются современные технологии, использующие соответствующее классифицирующее оборудование, позволяющие не только качественно разделить материал по фракционному составу, а также включают в себя оборудование по дозированию, операций смешивания и расфасовку готовой продукции [2].

Как правило, наиболее распространенным оборудованием, входящим в состав технологической линии являются инерционные грохоты, теоретические и научные исследования которых широко известны [3-5].

Однако, создание новых конструкций грохотов, а в частности модернизация, усовершенствования, изобретение других машин, связанных с грохочением, отличных от классического оборудования является актуальной.

Наиболее остро стоит проблема при создании такого оборудования связанная с расчетом новых конструкций привода, позволяющего с наименьшими затратами энергоресурсов получить максимальный эффект от использования грохота [8].

Цель работы. Целью настоящего исследования является конструктивное решение инерционного грохота с двухчастотным зубчато-ременным приводом, обоснование и расчёт динамических параметров, обоснование движения рабочего органа инерционного грохота с виброприводом новой конструкции, построение математического аппарата - модели, получение дифференциальных уравнений и их решение.

Изложение основного материала. На Рис. 2 представлена конструкция инерционного виброгрохота с двухчастотным приводом, разработанная на кафедре механизации строительных процессов под руководством профессора Емельяненко Н.Г. Конструк-

ция виброгрохота защищена патентом Украины №104973.



Рис. 1 – Изображение патента Украины №104973

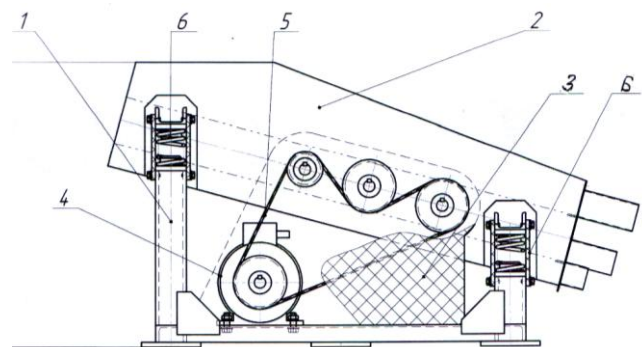


Рис. 2 – Виброгрохот с двухчастотным приводом : 1 – станина; 2 – корпус; 3 – кожух; 4 – двигатель; 5 – зубчато-ременной привод; 6 – амортизаторы

© М.Н. Горбань, 2016

Техническая характеристика инерционного виброгрохота с двухчастотным приводом представлена в Таблице 1.

Таблица 1 – Техническая характеристика инерционного виброгрохота с двухчастотным

№ п/п	Наименование параметра, размера	Единицы измерения	Значения
1	Производительность	м ³ /ч	3...10
2	Количество ярусов (решет)	шт.	2
3	Количество разделяемых фракций	шт.	3
4	Наибольший размер насыпного материала	мм	40
5	Размеры решет	мм	980x530 x2
6	Размеры отверстий решета	мм	3...15
7	Тип электродвигателя	-	АИС 90S4 УХЛ2
8	Мощность электродвигателя	кВт	1,1
9	Частота вращения электродвигателя	мин ⁻¹	1380
10	Частота колебаний сита	мин ⁻¹	1380
11	Амплитуда колебаний сита	мм	до 7,5
12	Характеристика питающей сети:		
12.1	род тока	-	трех-фазный переменный
12.2	напряжение	В	380
12.3	частота	Гц	50

Представленный конструктивный вариант инерционного виброгрохота, включающий в себя зубчатременной вибропривод с размещением среднего вала со шкивом и дебалансом таким образом, что ось вращения проходит через центр масс системы (рис.3), а крайние валы со шкивами и дебалансами расположены симметрично относительно центральной оси. Среднее положение центра масс системы принято за начало координат ХОУ.

Введены следующие обозначения: M – масса вибрирующих частей грохота; ω – низкая угловая скорость вращения навстречу друг другу крайних шкивов с валами и дебалансами, имеющими статический момент массы S_1 ; Ω – высокая угловая скорость вращения центрального шкива с дебалансом со статическим моментом массы S_2 ; α – угол наклона короба грохота; c_x, c_y – коэффициенты жёсткости по осям X, Y, характеризующие проекции равнодей-

ствующей упругих сил; b_x, b_y – коэффициенты сопротивления, характеризующие проекции равнодействующей диссипативных сил [9].

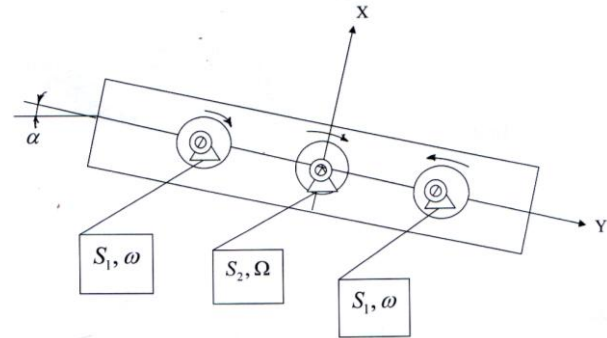


Рис. 3 – Схема к аналитическому исследованию динамики виброгрохота

При синхронном и синфазном вращении крайних низкочастотных дебалансов навстречу друг другу с частотой ω возникает возмущающая сила, направленная по оси X перпендикулярно плоскости сита а при вращении высокочастотного дебаланса с частотой Ω возникает круговая возмущающая сила, проекции которой на оси X и Y равны:

$$\begin{aligned} F_1 &= 2S_1\omega^2 \cos \omega t, \\ F_{2x} &= S_2\Omega^2 \cos \Omega t; \\ F_{2y} &= S_2\Omega^2 \sin \Omega t, \end{aligned} \quad (1)$$

где S_1, S_2 – статические моменты масс дебалансов.

При установке двухчастотного вибропривода на коробе грохота дифференциальные уравнения движения системы по осям X и Y принимают вид:

$$\begin{aligned} \ddot{x} + 2h_1\dot{x} + \omega_{01}^2 x &= \frac{2S_1\omega^2}{M} \cos \omega t + \frac{S_2\Omega^2}{M} \cos \Omega t; \\ \ddot{y} + 2h_2\dot{y} + \omega_{02}^2 y &= \frac{S_2\Omega^2}{M} \sin \Omega t, \end{aligned} \quad (2)$$

$$h_1 = \frac{b_x}{2M}; \quad \omega_{01}^2 = \frac{c_x}{M};$$

где $h_2 = \frac{b_y}{2M}; \quad \omega_{02}^2 = \frac{c_y}{M};$

$$F_{01} = 2S_1\omega^2; \quad F_{02} = S_2\Omega^2.$$

Частное решение записано в виде:

$$\begin{aligned} x &= A \cos(\omega t - \varphi) + B \cos(\Omega t - \psi); \\ y &= D \sin(\Omega t - \xi), \end{aligned} \quad (3)$$

где A, φ, ψ, ξ – фазы составляющих колебаний имеют вид:

$$A = \frac{2S_1\omega^2/c_x}{\sqrt{\left(1 - \left(\frac{\omega}{\omega_{01}}\right)^2\right)^2 + \left(\frac{2h_1\omega}{\omega_{01}^2}\right)^2}}; \quad B = \frac{S_2\Omega^2/c_x}{\sqrt{\left(1 - \left(\frac{\Omega}{\omega_{01}}\right)^2\right)^2 + \left(\frac{2h_1\Omega}{\omega_{01}^2}\right)^2}};$$

$$D = \frac{S_2 \Omega^2 / c_y}{\sqrt{\left(1 - \left(\frac{\Omega}{\omega_{02}}\right)^2\right)^2 + \left(\frac{2h_2 \Omega}{\omega_{02}^2}\right)^2}}; \quad (4)$$

$$\rho = \arctg \frac{\left(\frac{2h_1 \omega}{\omega_{01}^2}\right)}{\left(1 - \left(\frac{\omega}{\omega_{01}}\right)^2\right)}; \quad \psi = \arctg \frac{\left(\frac{2h_1 \Omega}{\omega_{01}^2}\right)}{\left(1 - \left(\frac{\Omega}{\omega_{01}}\right)^2\right)};$$

$$\xi = \arctg \frac{\left(\frac{2h_2 \Omega}{\omega_{02}^2}\right)}{\left(1 - \left(\frac{\Omega}{\omega_{02}}\right)^2\right)}.$$

Выводы.

1. Применение инерционного виброгрохота с двухчастотным зубчато-ременным приводом позволяет расширить его технологические возможности в части подбора требуемых режимов вибрационной классификации сыпучих материалов различной дисперсности.

2. Моделирование динамики инерционного грохота позволяет научно обосновать расчет параметров нового зубчато-ременного вибропривода.

Список литературы

1. Козлов В.В. Сухие строительные смеси: Учебное пособие. – М.: АСВ 2000. – 96 с.
2. Уткин В.Л. Новые технологии строительной индустрии. – М.: ЗАО «Русский издательский дом», 2004. – 116 с.
3. Блехман И.И. Вибрационное перемещение/ И.И. Блехман, Г.Ю. Джанелидзе. – М.: Наука, 1964. – 410 с.
4. Вибрационные машины в строительстве и производстве строительных материалов. Справочник. /Под. ред. В.А.Баумана и др. – М.: Машиностроение, 1970. – 548 с.
5. Вибрации в технике: В 6Т. / Под ред. Э.Э.Лавендела. – М.: Машиностроение, 1981. - Т.4: Вибрационные процессы и машины. - 509 с.

6. Гусев Б.В., Зазимко В.Г. Вибрационная технология бетона/ Б.В. Гусев, В.Г.Зазимко. – К.: Будівельник, 1991. – 160с.
7. Савченко О.Г. Обладнання комплексів для виробництва будівельних дрібноштучних стінових виробів: Навчальний посібник/ О.Г.Савченко – Х.: Тимченко, 2006. – 416 с.
8. Букин С.А. Стендовые испытания процесса грохочения зернистых материалов в бигармоническом режиме/ С.А. Букин, Н.Н. Соломичев, П.В. Сергеев// Сб. Обогащение полезных ископаемых. – Днепропетровск: вып. 4(45). – 1999. – С. 35-47.
9. Емельяненко Н.Г. Аналитическое исследование процесса виброгрохочения дисперсных материалов/ Н.Г.Емельяненко, Н.Д.Балера, А.Т.Гордиенко, Л.В.Саенко// Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2009. – № 46. – С. 74 – 81.

References (transliterated)

1. Kozlov V.V. *Sukhye stroitel'nye smesy: Uchebnoe posobyie* [Dry construction mixtures: Textbook]. Moscow, ASV, 2000. 96 p.
2. Utkyn V.L. *Novye tekhnologyy stroitel'noy yndustryi*. [New technologies of construction industry] Moscow, ЗАО «Russky yzdatel'skiy dom», 2004. 116 p.
3. Blekhan Y.Y., Dzhanelidze H.Yu. *Vybratsyonnoe peremeshchenye* [Vibration displacement]. Moscow, Nauka, 1964. 410 p.
4. Bauman V.A. and atc. *Vybratsyonnye mashyny v stroitel'stve y proizvodstve stroitel'nykh materiyalov. Spravochnyk*. [Vibrating machines in the construction and production of construction materials. Directory.] Moscow, Mashynostroeniye, 1970, 548 p.
5. E.E. Lavendel and atc. *Vybratsyy v tekhnike: V 6T. Vybratsyonnye protsessy y mashynu* [Vibrations in the technique: In 6 T. Vibratory processes and machines] Moscow: Mashynostroeniye, 1981, Vol.4, 509 p.
6. Husev B.V., Zazymko V.H. *Vybratsyonnaya tekhnologyya betona* [Vibratory concrete technology]. Kiev: Budivel'nyk. 1991. 160 p.
7. Savchenko O.H. *Obladnannya kompleksiv dlya vyrobnystva budivel'nykh dribnoshtuchnykh stinovykh vyrobiv: Navchal'nyy posibnyk* [Hardware systems for building small wall products: Textbook]– Kharkov, Tymchenko, 2006, 416 p.
8. Bukyn S.A., Solomychev N.N., Serheev P.V. *Stendovyye usprytanyya protsessha hrokhocheniya zernystykh materiyalov v byharmonycheskom rezhyme* [Bench tests of the screening process of granular materials in the harmonic mode] *Sb. Obohashchenye poleznykh yskopaemykh*. Dnepropetrovsk, Issue. 4(45), 1999, pp. 35-47.
9. Emel'yanenko N.H., Balera N.D., Hordyenko A.T., Saenko L.V. *Analytycheskoye yssledovanyie protsessha vybrohrokhocheniya dyspersnykh materiyalov* [Analytical study of the process of vibration screening particulate materials] *Bulletin of NTU «KhPI»*. Kharkov, NTU «KhPI», 2009, No 46, pp. 74 – 81.

Поступила (received) 05.03.2016

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Конструкція інерційного віброгрохоту з двочастотним приводом / М.М. Горбань // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. – Х. : НТУ «ХПІ», 2016. – № 5 (1177). – С. 48-50. – Бібліогр.: 9 назв. – ISSN 2079-004X.

Конструкция инерционного виброгрохота с двухчастотным приводом / М.Н. Горбань // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. – Х. : НТУ «ХПІ», 2016. – № 5 (1177). – С. 48-50. – Бібліогр.: 9 назв. – ISSN 2079-004X.

Construction of inertia vibrating screen with two-frequency drive / M.N. Horban' // Bulletin of NTU «KhPI». Series: Technologies in mechanical engineering. – Kharkiv: NTU «KhPI», 2016. – № 5 (1177). – P. 48-50 – Bibliogr.: 13. – ISSN 2079-004X.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Горбань Михайло Миколайович - здобувач, Харківський національний університет будівництва і архітектури, м. Харьков, (066) 124-85-94.;

Горбань Михаил Николаевич – соискатель, Харьковский национальный университет строительства и архитектуры, г. Харьков, (066) 124-85-94.

Horban Mykhayl Nykolaevych – applicant, Kharkov National University of Construction and Architecture, Kharkov, tel.: (066) 124-85-94.

УДК (07) 608.1.6:347.77/.78

А.С. РОМАШКО, О.Я. ЮРЧИШИН, К.О. БОГИНЯ**КОДУВАННЯ ОБ'ЄКТА ГОСПОДАРСЬКОЇ ДІЯЛЬНОСТІ ПРОТЯГОМ ЙОГО ЖИТТЄВОГО ЦИКЛУ**

В статті наведено процес послідовності визначення різних кодів одного об'єкта господарської діяльності на різних етапах його життєвого циклу. Актуальність досліджень обумовлена проблемою недостатньої обізнаності стосовно можливості одночасного використання кодів для патентного пошуку та пошуку конкурентів, і регулярного моніторингу ситуації довкола конкретних об'єктів господарської діяльності. Результати досліджень будуть корисними при визначенні існуючої нормативної бази з вимогами до продукції, а також для визначення патентної чистоти та кола конкурентів виробників чи постачальників аналогічної продукції.

Ключові слова: об'єкт господарської діяльності, кодування, інтелектуальна власність, життєвий цикл, класифікація.

В статье приведен процесс последовательности определения различных кодов одного объекта хозяйственной деятельности на разных этапах его жизненного цикла. Актуальность исследований обусловлена проблемой недостаточной осведомленности о возможности одновременного использования кодов для патентного поиска и поиска конкурентов, и регулярного мониторинга ситуации вокруг конкретных объектов хозяйственной деятельности. Результаты исследований будут полезны при определении существующей нормативной базы к требованиям к продукции, а также для определения патентной чистоты и круга конкурентов производителей или поставщиков аналогичной продукции.

Ключевые слова: объект хозяйственной деятельности, кодирование, интеллектуальная собственность, жизненный цикл, классификация.

In the article the process of determining the sequence of various other codes of economic activity at different stages of its life cycle. Relevance of the research problem is caused by a lack of awareness of the simultaneous use of codes for patent search and search competitors, and regular monitoring of the situation around specific objects of economic activity. The research results will be useful in determining the current regulatory framework to product requirements, and to determine the range and Novelty competitor's manufacturers or suppliers of similar products.

Key words: object of economic activity, coding, intellectual property, life cycle, classification.

Постановка проблеми. На сьогодні існує недостатня поінформованість осіб, які застосовують об'єкти господарської діяльності стосовно їх кодування, на різних етапах життєвого циклу. Як правило особи, що пов'язані з інтелектуальною власністю, застосовують міжнародні коди стосовно конкретних об'єктів права інтелектуальної власності, але є ще коди, які супроводжують об'єкт господарської діяльності і протягом його життєвого циклу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На цей час в Україні на офіційному сайті Державного підприємства «Український інститут інтелектуальної власності» (далі – УІВ) надається доступ до різноманітних баз даних (далі – БД) [1] та інформаційно-довідкових систем (далі – ІДС), зокрема і до тих, що стосуються торговельних марок. На сайті УІВ також опубліковані праці Виноградової С.Л. [2], де описані наявні бази даних та інформаційно-довідкові системи УІВ, Грищенко В.Л. [3], де описані міжнародні класифікації об'єктів інтелектуальної власності, Дахно І.І. [4], де описана класифікація товарів зовнішньоекономічної діяльності, інформація на сайтах окремих патентних повірених (агенцій), зокрема на сайті ТОВ "Власна марка" [5], які пропонують визначення кодів за класифікатором товарів зовнішньоекономічної діяльності та державним класифікатором товарів і послуг.

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми. Основною проблемою є недостатня обізнаність стосовно можливості одночасного використання кодів для патентного пошуку та пошуку конкурентів, і регулярного моніторингу ситуації довкола конкретних об'єктів господарської діяльності.

Мета статті. Головною метою статті є створення послідовності визначення різних кодів одного об'єкта

господарської діяльності на різних етапах його життєвого циклу.

Виклад основного матеріалу досліджень. Як відомо, один об'єкт господарської діяльності (ОГД) може стосуватись різних об'єктів інтелектуальної власності.

Об'єкт, захищений патентом на винахід (корисну модель) може мати новизну у своєму зовнішньому вигляді і потребувати окремого захисту патентом на промисловий зразок. Також, для виробництва цього об'єкту може бути створена торговельна марка, яка охороняється відповідним свідоцтвом.

Стосовно одного об'єкту господарської діяльності можуть бути набуті права як на ОГД в цілому так і на окремі вузли (складові). І не всі складові можуть бути виробництва тієї ж особи, яка здійснює виробництво ОГД (покупні вироби).

Тобто один ОГД може містити в собі різні об'єкти права інтелектуальної власності, як виробника ОГД так і його партнерів-виробників комплектуючих, зокрема:

- винаходи (корисні моделі) – продукти, процеси, застосування відомого за новим призначенням;
- промислові зразки – зовнішній вигляд ОГД та окремих складових чи пакування (форма, розфарбування, ергономічні особливості);
- торговельні марки – словесні, зображальні, комбіновані, пласкі та тривимірні;
- авторське право – фотографії ОГД, каталоги продукції, технічна документація, креслення;
- комерційні таємниці – наприклад на способи отримання матеріалів, способи виконання технологічних операцій, технічна документація,

© А.С. Ромашко, О.Я. Юрчишин, К.О. Богиня, 2016

креслення, оригінальні пристосування та обладнання, призначені виключно для застосування в процесі виробництва об'єкту господарської діяльності.

Виходячи з вищесказаного, об'єкт, захищений патентом на винахід (корисну модель) може мати новизну у своєму зовнішньому вигляді і потребувати окремого захисту патентом на промисловий зразок. Також, для виробництва цього об'єкту може бути створена торгівельна марка, яка охороняється відповідним свідоцтвом.

Всі ці об'єкти охорони мають свої міжнародні класифікаційні коди. Так для винаходу (корисної моделі) це **Міжнародна патентна класифікація (МПК)** [6]. Це ієрархічна класифікація, що має 5 рівнів – розділ, клас, підклас, група, підгрупа.

Складемо таблицю кодів МПК (табл.1) для такого об'єкта, як "зошит шкільний" та його складових аркуша, обкладинки та засобу кріплення (скоба чи клей) з урахуванням того, що об'єктом винаходу (корисної моделі) може бути продукт, процес та застосування відомого за новим призначенням.

Таблиця 1 – Таблиця можливих кодів МПК для об'єкта господарської діяльності "зошит шкільний" та його складових

Об'єкт промисловості	Об'єкт винаходу (корисної моделі)	Рубрика МПК
Зошит шкільний	Пристрій зошит шкільний	B42D 1/00
	Технологічне обладнання для отримання пристрою	B41F
	Спосіб виготовлення пристрою	B42C
Аркуш	Пристрій Аркуш	B42
	Технологічне обладнання для отримання пристрою	B41F
	Речовина (композиція) для виготовлення аркуша	B29K 711/12
	Спосіб виготовлення пристрою	B42C
	Спосіб виготовлення композиції	B42C
Засіб кріплення	Пристрій "Засіб кріплення"	F16B15/00
	Спосіб виготовлення пристрою	B42C5/00
	Індивідуальна хімічна сполука, (яка входить до засобу)	B42C9/00
	Речовина (композиція)	B42B2/00, B42B4/00
	Технологічне обладнання для отримання засобу кріплення	B27F7/00
	Спосіб виготовлення композиції	B42C1/00
	Спосіб застосування композиції	B42B

Для промислового зразка існує система аналогічна до МПК – **Міжнародна класифікація промислових**

зразків (МКПЗ) [7]. Вона є 2-рівневою і складається з класу і підкласу.

Складемо таблицю (табл. 2) кодів МКПЗ для такого об'єкта, як "зошит шкільний" та його складових аркуша, обкладинки та засобу кріплення (скоба) з урахуванням того що об'єктом промислового зразка може бути форма, малюнок чи розфарбування або їх поєднання, які визначають зовнішній вигляд промислового виробу і призначені для задоволення естетичних та ергономічних потреб.

Для класифікації торгових марок існує **Міжнародна класифікація товарів та послуг (МКТП)** [8], яка поділяється на 45 класів. Перші 34 – для товарів, з 35 по 45 – для послуг.

Таблиця 2 – Таблиця можливих кодів МКПЗ для об'єкта господарської діяльності "зошит шкільний" та його складових

Об'єкт промисловості	Об'єкт промислового зразка	Рубрика МКПЗ
Зошит шкільний	Форма виробу в цілому	19-08
	Матеріал	19-01
	Розфарбування обкладинки	19-06
	Розфарбування аркушів	19-06
Аркуш	Форма виробу в цілому	19-04, 19-08
	Розфарбування аркуша	19-06
	Матеріал	19-01
Засіб кріплення	Форма виробу в цілому	19-02
	Матеріал	05-01

Галузі торгівельної марки для зошитів для писання або креслення відповідає 16 клас - папір, картон і вироби з них, що не належать до інших класів; друкована продукція; матеріали для книжкових оправ; фотографії; канцелярські товари; клеї канцелярські і побутові; приладдя для художників; пензлі; друкарські машинки та канцелярське обладдя (крім меблів); навчальні матеріали (крім апаратури); пластмасові матеріали для пакування (що не належать до інших класів); друкарські шрифти; друкарські кліше.

Також слід згадати і класи зображальних елементів знаків, які можна визначити користуючись ІДС "Міжнародна класифікація зображувальних елементів знаків (Віденська класифікація) [9]. При оформленні документів заявки на торгівельну марку Віденська класифікація не застосовується, але оскільки її основна мета полягає у тому, щоб за будь-яких обставин полегшувати пошук схожих чи тотожних знаків, визначення цих класів є доцільним.

Протягом життєвого циклу конкретного виробу його також супроводжують різні коди.

Якщо виробник виявить бажання виробляти, продавати та імпортувати продукцію, то йому необхідно класифікувати свій товар та діяльність за рядом кодів.

При виготовленні товару виробнику необхідно спиратися на нормативні документи, які регламентують вимоги до об'єкта та методи його випробувань. Для визначення цих вимог потрібно знайти нормативні документи, які їх регламентують. Для цього краще користуватись **Українським класифікатором нормативних документів ДК 004:2008** [10]. Український класифікатор нормативних документів (УК НД) є ієрархічною класифікацією та має три рівні: клас, група і підгрупа. В нашому випадку:

85. ПАПЕРОВА ПРОМИСЛОВІСТЬ;

85.080. Вироби з паперу;

85.080.99. Інші стандарти стосовно виробів з паперу.

Отже для зошитів шкільних код УК НД – 85.080.99.

На підставі застосування класифікатора знайдено ДСТУ 4736:2007 Зошити шкільні. Технічні умови.

Використання **Державної класифікації продукції та послуг (ДК 016:2010)** [11] забезпечує умови для вирішення таких завдань, як виконання комплексу облікових функцій щодо продукції та послуг в рамках робіт з державної статистики; складання міжгалузевого балансу виробництва і розподілу продукції та послуг відповідно до системи національних рахунків; подання інформації про вітчизняну продукцію та послуги на ринки інших країн через відповідні кодові позначення; організація та забезпечення функціонування системи оподаткування суб'єктів господарювання та ін.

Дана класифікація є ієрархічною, багаторівневою. В нашому випадку:

Секція С – ПРОДУКЦІЯ СІЛЬСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА, ЛІСОВОГО ГОСПОДАРСТВА ТА РИБНОГО ГОСПОДАРСТВА;

розділ 17 - Маса паперова, папір і картон;

17.2 Вироби паперові та картонні

17.23.1 Вироби канцелярські паперові

Загалом **код ДКПП** для шкільного зошита виглядає наступним чином - 17.23.1.

Якщо ж продукція, передбачена для виробництва на експорт/ імпорт, то для цілей оформлення митних декларацій потрібно визначити код **Української класифікації товарів зовнішньоекономічної діяльності (УКТ ЗЕД)** [12]. В нашому випадку:

Група 48 Папір і картон; вироби з паперової маси, паперу або картону

Тобто, **загалом код УКТ ЗЕД** для зошита шкільного виглядає наступним чином - 4820 20 00 00 .

При проведенні державної реєстрації юридичних осіб необхідно вказати види діяльності, що передбачені уставом юридичної особи, які ця юридична особа має намір здійснювати.

Такі види економічної діяльності мають відповідати **Класифікатору видів економічної діяльності (КВЕД) ДК 009:2010** [13], затвердженому Державним комітетом України з питань технічного регулювання і споживчої політики, який передбачає вичерпний перелік видів економічної діяльності, що здійснюються на території України.

Загалом код КВЕД для зошита шкільного буде:

Секція С Переробна промисловість

Розділ 17 Виробництво паперу та паперових виробів

Група 17.2 Виготовлення виробів з паперу та картону

Підгрупа 17.23 Виробництво паперових канцелярських виробів

Висновок. Виявлення різних кодів, які стосуються конкретного виробу може бути необхідним для визначення існуючої нормативної бази з вимогами до продукції, а також для визначення патентної чистоти та кола конкурентів виробників чи постачальників аналогічної продукції.

Список літератури

1. *Бази даних та інформаційно-довідкові системи / Український інститут промислової власності (УІПВ).* [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.uipv.org/ua/bases2.html>.
2. Виноградова С.Л. "Інтернет-бази даних та інформаційно-довідкові системи Державного підприємства «Український інститут промислової власності»: матеріали семінару "Інформаційно-аналітична підтримка діяльності підприємств у сфері промислової власності" (5 грудня 2014 р. м.Київ). [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://www.uipv.org/ua/statty_2014.
3. Грищенко В.Л. "Міжнародні класифікації об'єктів промислової власності у перекладі українською мовою та їх запровадження в державній системі правової охорони інтелектуальної власності у контексті інформаційного забезпечення користувачів": матеріали семінару "Інформаційно-аналітична підтримка діяльності підприємств у сфері промислової власності" (5 грудня 2014 р. м.Київ). [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://www.uipv.org/ua/statty_2014.
4. Дахно І.І. Міжнародне приватне право : навчальний посібник для студ. вищ. навч. закладів / І. І. Дахно. - Київ : Центр учбової літератури, 2008. - 316 с.
5. Определение кода УКТЗЕД, ДКПП / сайт ТОВ "Власна марка" [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://vlasnamarka.spravka.ua/products/19.html>.
6. Міжнародна патентна класифікація. Українська версія (2015.01). [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://base.uipv.org/mpk2009/index.html?level=c>.
7. ІДС "Міжнародна класифікація промислових зразків (Локарнська класифікація). Десята редакція". [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://base.uipv.org/locarno10/>.
8. ІДС «Міжнародна класифікація товарів і послуг для реєстрації знаків (Ніщцька класифікація). Десята редакція, версія 2015 року». [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://nice102015.uipv.org/>.
9. ІДС "Міжнародна класифікація зображувальних елементів знаків (Віденська класифікація). Сьома редакція". [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://base.uipv.org/vienna7/>.
10. Український класифікатор нормативних документів ДК 004:2008 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://normativ.ucoz.org/_ld/4/429__004.pdf.
11. Державний класифікатор продукції та послуг (ДКПП) ДК 016:2010 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://csm.gov.ua/files/File/030_004_001.pdf.
12. Український класифікатор товарів зовнішньоекономічної діяльності (УКТ ЗЕД). [Електронний ресурс]. – Режим доступу: zakon.rada.gov.ua/go/584a-18.
13. Класифікатор видів економічної діяльності (КВЕД) ДК 009:2010 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: kved.ukrstat.gov.ua/KVED2010/kv10_i.html.

References (transliterated)

1. Bazy danykh ta informatsiino-dovidkovi systemy [Database and Information and Reference System]/ Ukrainskyi instytut promyslovoi vlasnosti (UIPV). – Retrieved from: <http://www.uipv.org/ua/bases2.html>.
2. Vynogradova S.L. (2014). Internet-bazy danykh ta informatsiino-dovidkovi systemy Derzhavnoho pidpriemstva «Ukrainskyi instytut promyslovoi vlasnosti»: materialy seminaru "Informatsiino-analitychna pidtrymka diialnosti pidpriemstv u sferi promyslovoi vlasnosti". [Internet databases and

- information and referral system of the State Enterprise "Ukrainian Institute of Industrial Property". Retrieved from: http://www.uipv.org/ua/statty_2014.
3. Hryshchenko V.L. (2014). Mizhnarodni klasyfikatsii ob'ektiv promyslovoi vlasnosti u perekhadi ukrainskoiu movoiu ta yikh zaprovadzhennia v derzhavni systemi pravovoi okhorony intelektualnoi vlasnosti u konteksti informatsiinoho zabezpechennia korystuvachiv: materialy seminaru "Informatsiino-analitychna pidtrymka diialnosti pidpriemstv u sferi promyslovoi vlasnosti". [International classifications of industrial property rights in Ukrainian and their implementation in the state system of intellectual property protection in the context of information support of users]. Retrieved from: http://www.uipv.org/ua/statty_2014.
 4. Dakhno I.I. (2008). Mizhnarodne pryvatne pravo: navchalnyi posibnyk dlia stud. vyshch. navch. zakladiv [International private law]. Kyiv, Tsentr uchbovoi literatury (in Ukrainian).
 5. Opredelenye koda UKTZED, DKPP / TOV "Vlasna marka". Retrieved from: <http://vlasna-marka.spravka.ua/products/19.html>.
 6. Mizhnarodna patentna klasyfikatsiia. Ukrainska versiiia (2015.01). [International Patent Classification]. Retrieved from: <http://base.uipv.org/mpk2009/index.html?level=c/>
 7. IDS Mizhnarodna klasyfikatsiia promyslovykh zrazkiv (Lokamska klasyfikatsiia). Desiata redaktsiia. [International Classification for Industrial Designs]. Retrieved from: <http://base.uipv.org/locarno10/>.
 8. IDS Mizhnarodna klasyfikatsiia tovariv i posluh dlia reiestratsii znakiv (Nitska klasyfikatsiia). Desiata redaktsiia, versiiia 2015. [International Classification of Goods and Services for the Registration of Marks]. Retrieved from: <http://nice102015.uipv.org/>.
 9. IDS "Mizhnarodna klasyfikatsiia zobrazhuvalnykh elementiv znakiv (Videnska klasyfikatsiia). 7 redaktsiia". [International Classification of the Figurative Elements of Marks]. Retrieved from: <http://base.uipv.org/vienna7/>.
 10. Ukrainyski klasyfikator normatyvnykh dokumentiv DK 004:2008 [Ukrainian qualifier regulations]. Retrieved from: http://normativ.ucoz.org/_ld/4/429_004.pdf.
 11. Derzhavnyi klasyfikator produktiv ta posluh (DKPP) DK 016:2010 [State classification of goods and services]. Retrieved from: http://csm.gov.ua/files/File/030_004_001.pdf.
 12. Ukrainyski klasyfikator tovariv zovnishnoekonomichnoi diialnosti (UKTZED). [Ukrainian Classification of Goods for Foreign Economic Activities]. Retrieved from: zakon.rada.gov.ua/go/584a-18.
 13. Klasyfikator vydiv ekonomichnoi diialnosti (KVED) DK 009:2010 [Classification of Economic Activities]. Retrieved from: kved.ukrstat.gov.ua/KVED2010/kv10_i.html.

Поступила (received) 12.04.2016

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Кодування об'єкта господарської діяльності протягом його життєвого циклу / А.С. Ромашко, О.Я. Юрчишин, К.О. Богиня // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. – X. : НТУ «ХПІ», 2016. – № 5 (1177). – С. 51-54. – Бібліогр.: 13 назв. – ISSN 2079-004X.

Кодирование объекта хозяйственной деятельности в течение его жизненного цикла / А.С. Ромашко, О.Я. Юрчишин, К.О. Богиня // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. – X. : НТУ «ХПІ», 2016. – № 5 (1177). – С. 51-54. – Бібліогр.: 13 назв. – ISSN 2079-004X.

Object coding of economic activities during its life cycle / A.S. Chamomile, O.J. Yurchushun, K.O. Goddess // Bulletin of NTU «KhPI». Series: Technologies in mechanical engineering. – Kharkiv: NTU «KhPI», 2016. – № 5 (1177). – P. 51-54 – Bibliogr.: 13. – ISSN 2079-004X.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Ромашко Алла Сазоновна - к.т.н., доц., Доцент кафедри конструювання станків и машин, Національний технічний університет України «КПІ», тел.: (044) 204-94-61, e-mail: as_romashko@ukr.net;

Ромашко Алла Сазонівна – к.т.н., доц., доцент кафедри конструювання верстатів та машин, Національний технічний університет України «КПІ», тел.: (044) 204-94-61, e-mail: as_romashko@ukr.net;

Romashko Alla Sazonivna, Candidate of Technical Sciences, Docent, National Technical University of Ukraine «KPI», tel.: (044) 204-94-61, e-mail: as_romashko@ukr.net;

Юрчишин Оксана Ярославівна – к.т.н., доц., Національний технічний університет України «КПІ», тел.: (044) 204-94-61, e-mail: urchyshynoks@ukr.net;

Юрчишин Оксана Ярославівна - к.т.н., доц., Национальный технический университет Украины «КПИ», тел.: (044) 204-94-61, e-mail: urchyshynoks@ukr.net;

Yurchyshyn Oksana Yaroslavivna – Candidate of Technical Sciences, Docent, National Technical University of Ukraine «KPI», tel.: (044) 204-94-61, e-mail: urchyshynoks@ukr.net;

Богиня Костянтин Олександрович – студент, Національний технічний університет України «КПІ», тел.: (044) 204-94-61, e-mail: kvm_mmi@mail.ru;

Богиня Константин Александрович - студент, Национальный технический университет Украины «КПИ», тел.: (044) 204-94-61, e-mail: kvm_mmi@mail.ru;

Bohynya Kostyantyn Oleksandrovych – student, National Technical University of Ukraine «KPI», tel.: (044) 204-94-61, e-mail: kvm_mmi@mail.ru.

УДК 621.9.06

В.Б. СТРУТИНСЬКИЙ, В.М. ЧУПРИНА, О.Я. ЮРЧИШИН**ПОБУДОВА ДИНАМІЧНОЇ ТЕНЗОРНО-ГЕОМЕТРИЧНОЇ МОДЕЛІ ПРОСТОРОВОЇ ЖОРСТКОСТІ МЕТАЛОРІЗАЛЬНОГО ВЕРСТАТУ ЗА ОСНОВНИМИ ПІДСИСТЕМАМИ**

На основі тензорно-геометричного підходу до опису статичної жорсткості основних підсистем верстату у вигляді еліпсоїдів жорсткості побудовано динамічну модель просторової жорсткості у формі 3D-поверхні. Розроблено підхід до знаходження динамічної жорсткості верстату в довільному напрямку тривимірного простору на основі моделі статичної жорсткості з використанням коефіцієнтів динамічності системи.

Ключевые слова: металорізальний верстат, пружна система, підсистема, динамічна жорсткість, тензор, просторова модель.

На основе тензорно-геометрического подхода к описанию статической жесткости основных подсистем станка в виде эллипсоидов жесткости построено динамическую модель пространственной жесткости в форме 3D-поверхности. Разработан подход к нахождению динамической жесткости станка в произвольном направлении трехмерного пространства на основе модели статической жесткости с использованием коэффициентов динамичности системы.

Ключевые слова: металлорежущий станок, упругая система, подсистема, динамическая жесткость, тензор, пространственная модель.

Based on the tensor-geometrical approach to describing static rigidity major subsystems of the machine in the form of ellipsoids rigidity built a dynamic model of spatial rigidity in the form of 3D-surface. The approach to the dynamic stiffness of the machine in any direction in three dimensional space based on the model of static stiffness coefficient using the dynamic system.

Key words: metal-cutting machine tools, elastic system, subsystem, dynamic stiffness, tensor, spatial model.

Вступ. В зв'язку з інтенсифікацією процесу обробки на металорізальних верстатах в сучасних технологічних системах суттєво зростає роль динаміки, зокрема динамічних процесів, що впливають на точність обробки [1]. Найбільш важливою характеристикою верстатів є жорсткість пружної системи (ПС), причому як статична, так і динамічна.

В попередніх дослідженнях теоретично обґрунтовано і практично побудовано статичну тензорно-геометричну модель просторової жорсткості (податливості) металорізального верстату з використанням еліпсоїдів жорсткості (податливості) основних підсистем – інструменту і деталі [2-5]. Ця модель у вигляді 3D-поверхні відображає неоднорідність (анізотропію) статичної податливості ПС верстату в різних напрямках робочого простору від зони (точки) різання. На її основі можна знайти величину деформації верстату від діючого силового навантаження в довільному напрямку, зокрема відтиснення інструменту від деталі по нормалі до оброблюваної поверхні, яке безпосередньо впливає на точність обробки, тобто розміри і форму деталі.

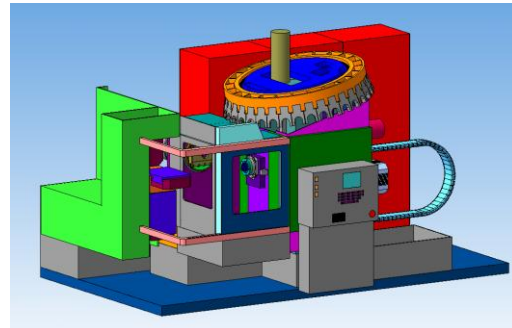
Проте в динаміці ці деформації суттєво збільшуються і залежать від динамічної якості верстату, зокрема від динамічної жорсткості системи.

Мета статті. Метою статті є розробка динамічної тензорно-геометричної моделі металорізального верстату з використанням еліпсоїдів жорсткості (податливості) основних підсистем (інструменту і деталі) та побудова 3D-поверхні динамічної податливості пружної системи верстату.

Основна частина. Для визначення і побудови 3D-поверхні динамічної податливості необхідно виконати необхідні розрахункові та експериментальні дослідження.

Усі дослідження проводились на базі спеціального багатоопераційного верстата-модуля з числовим програмним керуванням типу обробляючий центр моделі ІР320ПМФ4. З метою розрахункових до-

сліджень і моделювання в системі КОМПАС побудована повна твердотільна 3D-модель верстату ІР320ПМФ4, загальний вид якої показаний на рисунку 1а. При статичних і динамічних розрахунках верстату ІР320ПМФ4 в програмі Cosmos використовувалась спрощена твердотільна 3D-модель ПС, яка була побудована в САД-системі SolidWorks. Вона містить основні базові компоненти системи СПІД верстату (без кабінету, кожухів, шаф і інших). Загальний вид 3D-моделі ПС верстату показаний на рисунку 1б.



а

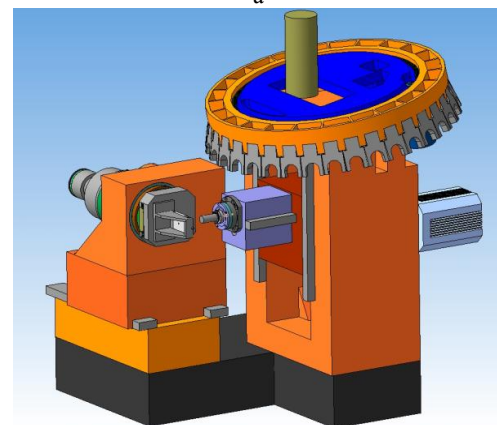


Рис. 1 – 3D-модель багатоцільового верстату ІР320ПМФ4
а – повна система, б – пружна система

Розрахунок статичних параметрів ПС верстату IP320ПМФ4 виконувався за методом кінцевих елементів в програмі CosmosWorks. Розрахункова 3D-модель ПС верстату з мережею кінцевих елементів показана на рисунку 2а. Верстат закріплений жорсткими фіксаторами за станину до абсолютно жорсткої підлоги, що відповідає реальному встановленню на бетонній основі (підливка).

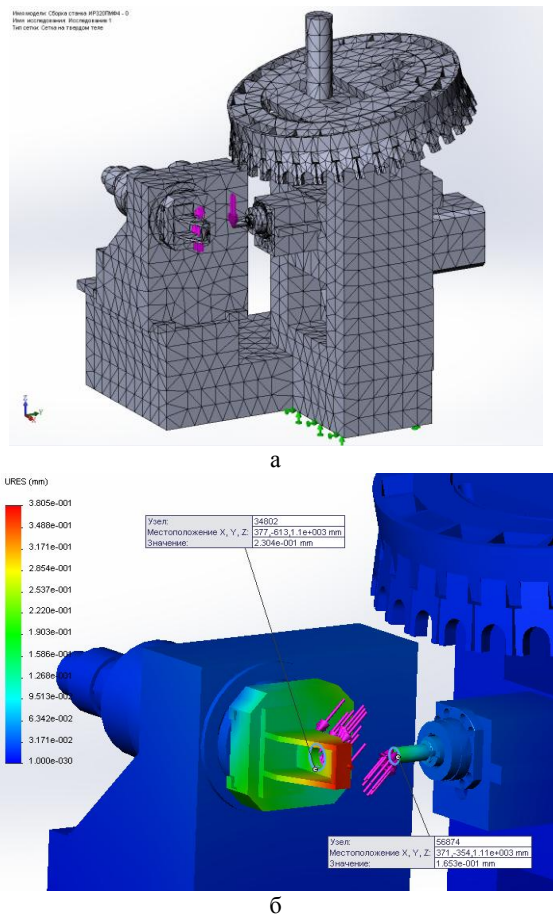


Рис. 2 – Розрахункова 3D-модель пружної системи верстату IP320ПМФ4: а – мережа кінцевих елементів; б – приклад результатів розрахунку

Для визначення анізотропії статичної податливості ПС був проведений комплекс розрахункових досліджень. ПС верстату навантажувалась в зоні різання силами, які діють як сили різання. Радіальна сила прикладалась на консолі інструментальної оправки, а її реакція – в отворі оброблюваної деталі в протилежному напрямку. Величина сили в усіх розрахунках задавалась на постійному рівні ($P=10000\text{H}$). При цьому змінювався напрямок прикладення сил навантаження ПС в зоні різання з кутовим кроком 45° .

Для визначення параметрів еліпсоїдів податливості розрахунковий експеримент проводився в двох площинах – XOY та YOZ . При цьому розраховувались напруження, деформації і переміщення ПС та визначались показники жорсткості системи в зоні різання. Визначення переміщень в необхідних точках моделі виконувалось шляхом зондування. Приклад розрахунку одного з варіантів навантаження показаний на рисунку 2б. Результати зондування переміщень ПС в зоні різання подані в таблиці 1.

ний на рисунку 2б. Результати зондування переміщень ПС в зоні різання подані в таблиці 1.

Таблиця 1 – Результати зондування статичних деформацій ПС

Кут вимірювання (градуси)	Величина переміщення, мм			
	В площині XOY		В площині YOZ	
	Деталь	Оправка	Деталь	Оправка
0	0,0281	0,2249	0,1394	0,0167
45	0,1365	0,2266	0,2304	0,1653
90	0,2241	0,2257	0,2240	0,2257
135	0,1716	0,2237	0,2223	0,1538
180	0,0274	0,2237	0,1394	0,0157
225	0,1472	0,2246	0,2432	0,1653
270	0,2240	0,2257	0,2240	0,2257
315	0,1616	0,2250	0,2350	0,1541

За результатами розрахункового експерименту побудовані криві переміщень заданих точок ПС та на їх основі – криві статичної податливості. Результати побудов в площинах XOY та YOZ показані на рисунку 3.

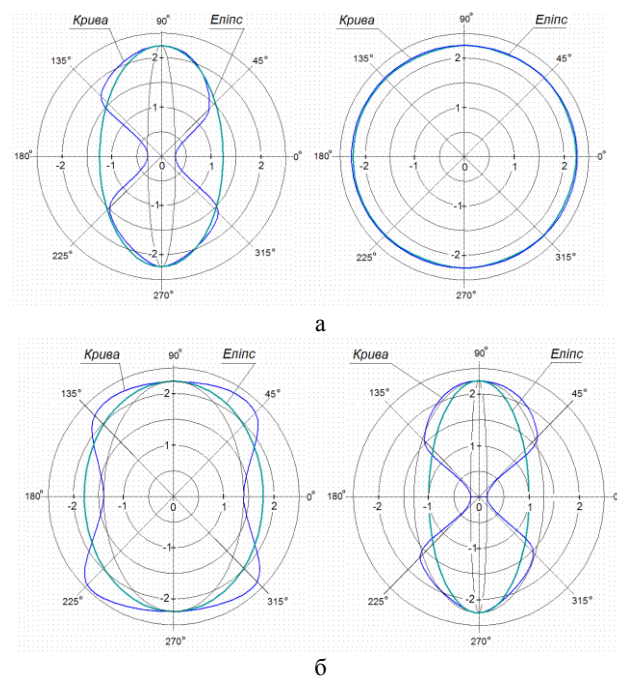


Рис. 3 – Побудова кривих податливості деталі та інструмента: а – в площині XOY верстату (масштаб 1:10-4 мм/даН); б – в площині YOZ верстату (масштаб 1:10-4 мм/даН)

Криві податливостей за формою нагадують або коло, або деформовані (приталені) еліпси. Ці приталення викликані тим, що осьова жорсткість шпинделя і ротора обертового стола практично на порядок більша за радіальну (особливо на вильоті оправки чи пристосування). При вирішенні задачі знаходження максимальних значень податливостей ПС приталення

практично можна не враховувати, а для визначення форми поверхонь податливостей – приблизно замінити опосередкованими еліпсами, як це зроблено в даній роботі.

При постійній величині діючої сили форма еліпса (еліпсоїда) податливості повністю повторює форму еліпса (еліпсоїда) переміщень. Тому задача побудови еліпсоїдів податливості фактично зводиться до побудови еліпсоїдів переміщень (з наступною заміною одиниць вимірювання).

Як видно з виконаних побудов головні осі еліпсоїдів податливості співпадають з головними осями координат верстату ИР320ПМФ4. З виконаних побудов визначимо головні півосі еліпсоїдів. Для еліпсоїду підсистеми інструмента вони складають 2,3 - 2,3 - 1 ($\times 10^{-4}$ мм/даН), а для підсистеми деталі 2,3 - 1,25 - 1,8 ($\times 10^{-4}$ мм/даН). По цих даних в програмі MathCAD побудовані еліпсоїди податливості, які зображені на рисунку 4.

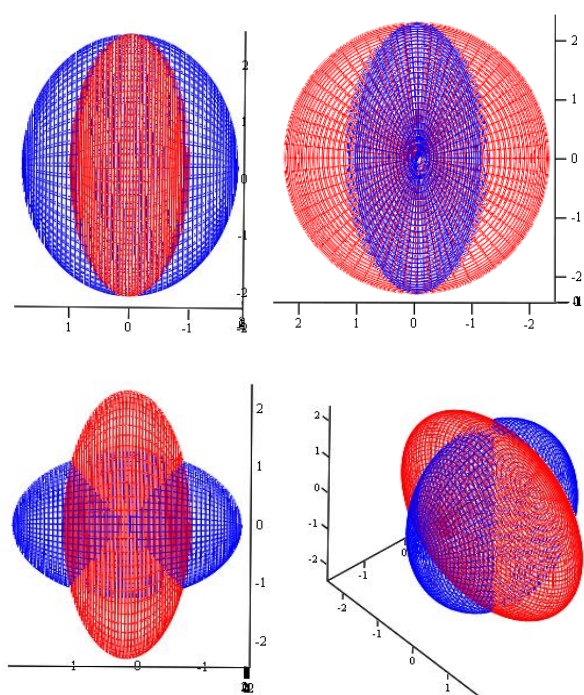


Рис. 4 – Вихідні еліпсоїди статичної податливості підсистем верстату
(масштаб графіків $1:1 \times 10^{-3}$ мкм/даН)

Розташування еліпсоїдів податливості для кожної з підсистем показано на рисунку 5а. При різанні на верстаті центри еліпсоїдів збігаються в одну точку (звично це точка на вершині інструменту).

Масштаб зображення еліпсоїдів вибраний задля наочності збільшеним в 100 разів і складає 0.1 мкм/даН на 1 мм.

Для отримання поверхні статичної податливості верстату ИР320ПМФ4 необхідно для кожного напрямку в просторі визначити сумарну податливість шляхом складання податливостей обох підсистем.

На рисунку 6 показана побудова поверхні статичної податливості ПС верстату ИР320ПМФ4 (в

проекціях) в програмі MathCAD згідно розробленого авторами алгоритму.

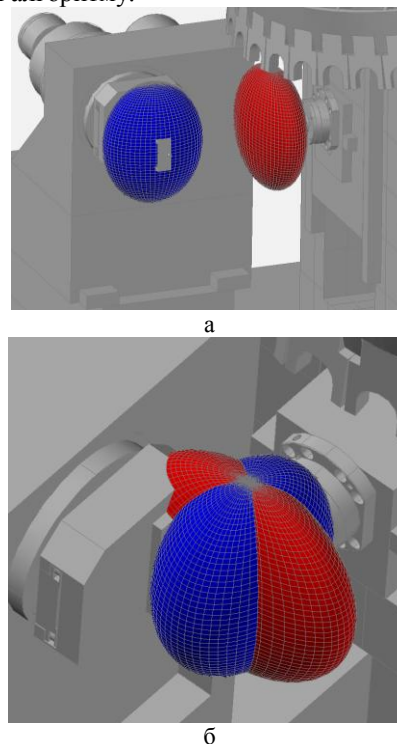


Рис. 5 – Розташування еліпсоїдів статичної податливості підсистем:
а – на вузлах верстату; б – при різанні (в зоні різання)

Просторова жорсткість (податливість) ПС верстату в різних напрямках нерівномірна і змінюється майже в два рази.

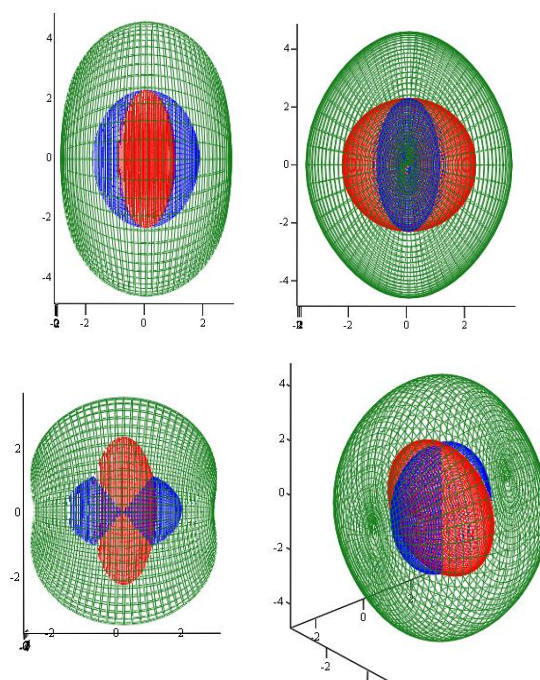


Рис. 6 – Побудова поверхні статичної податливості верстату ИР320ПМФ4 (масштаб графіків $1:1 \times 10^{-3}$ мкм/даН)

Розташування побудованої поверхні на верстаті ИР320ПМФ4 показано на рисунку 7. Масштаб зобра-

ження поверхні статичної податливості залишається незмінним і складає 0.1 мкм/даН на 1 мм (як і для поверхонь вихідних еліпсоїдів).

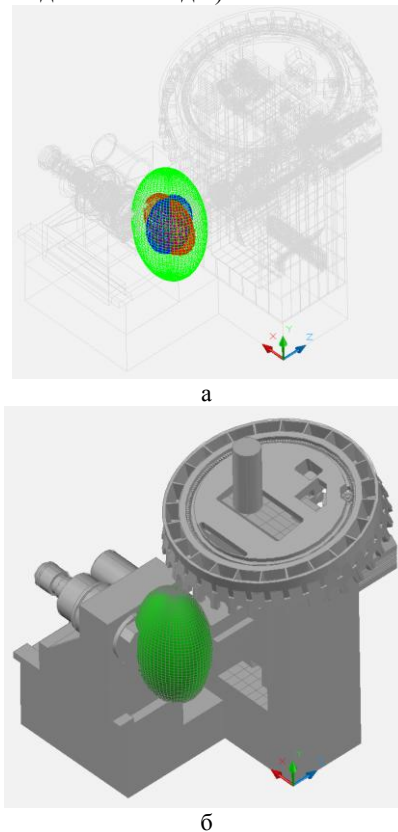


Рис. 7 – Поверхня статичної податливості верстату ІР320ПМФ4:
а – каркасний варіант; б – непрозорий варіант

При роботі верстату (в динаміці) на нього діють різноманітні силові і кінематичні збурення. Тому під час різання статичні переміщення елементів верстату доповнюються динамічними переміщеннями (коливаннями). При цьому амплітуди переміщень значно зростають. Величини динамічних відхилень від статичних визначаються динамічною якістю ПС верстату.

При наближенні до резонансних зон (частот) коливної системи амплітуди коливань і, відповідно, переміщення елементів в зоні різання суттєво зростають (іноді більш ніж на порядок), що відображається на динамічній точності обробки, зокрема на формі і якості поверхні оброблюваної деталі у вигляді мікро- і макропохибок.

При цьому також проявляються інші динамічні властивості верстату, зокрема анізотропія динамічної податливості ПС в різних напрямках робочого простору. Особливо нерівномірність просторової жорсткості (податливості) проявляється при розточувальних операціях (при обертанні вектора сили різання) у вигляді похибок форми деталі (еліпсність, огранка...), хвилястості, шорсткості поверхні.

Для оцінки динамічної якості верстату доцільно ввести коефіцієнти динамічності Kd_i (загальні чи по координатах головних осей жорсткості), які можна отримати розрахунковим або експериментальним шляхом, зокрема по АЧХ або АФЧХ ПС верстату.

Коефіцієнт динамічності Kd_i визначається за співвідношенням

$$Kd_i = A_i / K_{ПС}, \quad (1)$$

де A_i - амплітуда динамічної податливості на i -й резонансній частоті;

$K_{ПС}$ - статична характеристика (податливість) пружної системи.

Коефіцієнти динамічності ПС змінюються в залежності від наближення до резонансних частот, а тому зазвичай виділяють їх максимальні значення, яких вони набувають на основних резонансних частотах системи. З цих значень визначають найбільше, яке і приймають за головний розрахунковий коефіцієнт динамічності Kd .

Проте коефіцієнти динамічності Kd можуть суттєво змінюватись також в залежності від напрямку визначення динамічних характеристик, що доведено численними експериментальними дослідженнями. Тому їх часто визначають окремо по головних координатних осях верстату, як Kd_x, Kd_y, Kd_z .

Поверхню динамічної податливості можна отримати на основі поверхні статичної податливості за допомогою афінних перетворень, зокрема розтягненням її по осях координат пропорційно величинам цих коефіцієнтів.

Для верстату ІР320ПМФ4 поверхня динамічної податливості будувалась з використанням коефіцієнтів динамічності по осях координат, які отримані на основі експериментальних даних.

На рисунку 8 показані схема зняття експериментальних АФЧХ ПС верстату ІР320ПМФ4 за методикою ЕНІМС та отримані характеристики.

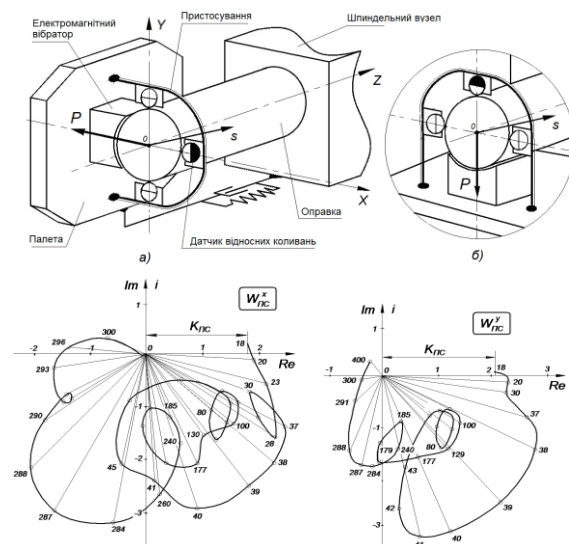


Рис. 8 – Схема установки та експериментальні АФЧХ верстату ІР320ПМФ4:

а – у горизонтальному напрямку ($W_{P_x}^x$);

б – у вертикальному напрямку ($W_{P_y}^y$)

Навантаження ПС здійснювалось вздовж головних осей верстату за допомогою електромагнітного вібратора ЛДС-69.050, який закріплений на столі (палеті) верстату. Відносні коливання між столом і

оправкою вимірювались в тих же напрямках датчиком відносних коливань ЛДС-29, розміщеним у спеціальному пристосуванні.

Основні параметри знятих АФЧХ ПС верстату наведені в таблиці 2.

Таблиця 2 – Параметри АФЧХ верстату ІР320ПМФ4

АФЧХ	Параметри АФЧХ		
	Статична характеристика, мкм/даН	Резонансні частоти, Гц	Коефіцієнт динамічності
$W_{P_x}^x$	$3.65 \cdot 10^{-3}$	28,40,78, 100,177,287	1.87
$W_{P_y}^y$	$4.3 \cdot 10^{-3}$	40,80,129, 178,287	1.53
$W_{P_z}^z$	$0.7 \cdot 10^{-3}$	38, 180, 291	1.31

Аналіз отриманих характеристик показує, що статична податливість в різних напрямках (окрім осьового) відрізняється на 15-20%. Основні резонансні частоти ПС (40, 177, 287 Гц) практично залишаються незмінними, але їх амплітуди відрізняються суттєво. Коефіцієнти динамічності при зміні напрямків навантажень між собою відрізняються до 30%.

На рисунку 9 показана поверхня динамічної податливості ПС верстату ІР320ПМФ4 (в проєкціях та в розрізі), яка побудована в програмі MathCAD згідно розробленому алгоритму з урахуванням приведених вище коефіцієнтів динамічності. Її форма суттєво відрізняється від форми поверхні статичної податливості ПС верстату.

Розташування цієї поверхні на верстаті ІР320ПМФ4 показано на рисунку 10. Головні осі жорсткості (податливості) ПС верстату співпадають з глобальними осями координат верстату. Масштаб зображення поверхні динамічної податливості прийнятний однаковим, як і для поверхні статичної податливості - 0.1 мкм/даН на 1 мм. Розміри максимальної поверхні динамічної податливості в 1.87 разів більше за розміри статичної поверхні.

При динамічних режимах роботи верстату статичні деформації суттєво зростають за рахунок динамічної податливості ПС. При цьому величина зростання залежить від частоти збуджуючої сили, її наближення до резонансних частот системи і визначається коефіцієнтами динамічності.

Наприклад, для АФЧХ ПС верстату $W_{P_x}^x$, яка показана на рисунку 8-а, можна визначити резонансні (25-28, 35-45, 90-180, 250-290 Гц) і антирезонансні зони (38-35, 45-90, 180-250 Гц). Для інших АФЧХ $W_{P_y}^y$ і $W_{P_z}^z$ ці зони є практично аналогічними.

В резонансних зонах амплітуди переміщень (коливань) збільшуються і еліпсоїд податливості зростає, а в антирезонансних зонах – зменшуються.

Для оцінки динамічної податливості ПС пропонується застосовувати максимальні коефіцієнти динамічності, які проявляються на найбільших резонансах ПС. Для верстату ІР320ПМФ4 максимальні значення коефіцієнтів динамічності отримані на резонансних частотах 40 і 287 Гц.

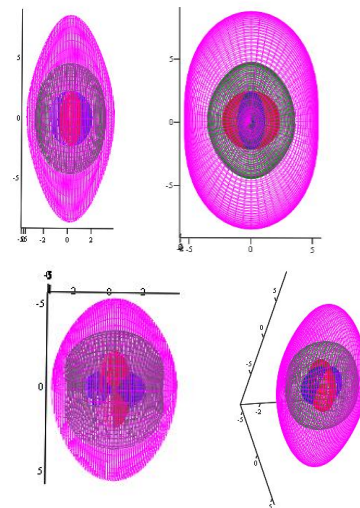
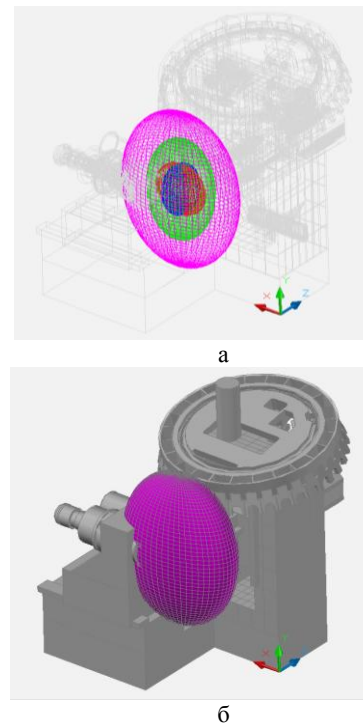
Рис. 9 – Побудова поверхні динамічної податливості верстату ІР320ПМФ4 (масштаб графіків 1:1×10⁻³ мкм/даН)

Рис. 10 – Поверхня динамічної податливості верстату ІР320ПМФ4: а – каркасний варіант; б – непрозорий варіант

Висновки

1. Динамічна модель пружної системи металорізального верстату може бути складена з двох основних підсистем - інструмента і деталі. Просторова жорсткість кожної підсистеми описується тензогеометричними моделями у формі еліпсоїдів жорсткості (податливості). Просторова податливість верстату визначається за розробленим алгоритмом і являє собою 3D-поверхню статичної податливості. Ця поверхня відображає зміну (анізотропію) величини податливості верстату в різних напрямках робочої зони, що суттєво відображується на точності обробки деталей.

2. В динамічних режимах роботи верстату статичні деформації суттєво збільшуються за рахунок динамічної податливості ПС. При цьому величина

зростання залежить від частоти збуджуючої сили, її наближення до резонансних частот, дисипативних властивостей системи і безпосередньо пов'язана з коефіцієнтами динамічності.

3. Поверхня динамічної податливості являє собою обмежуючу поверхню максимальної податливості верстату. Вона будується на основі поверхні статичної податливості за допомогою афінних перетворень, зокрема розтягненням її по осях координат пропорційно величинам відповідних коефіцієнтів динамічності верстату.

4. Реальна динамічна податливість верстату може бути різною (в залежності від частоти), але її значення буде знаходитись в діапазоні між поверхнями статичної та динамічної податливостей.

Список літератури

1. Кудинов В.А. Динамика станков. / В.А.Кудинов – М.: Машиностроение, 1967 – 360 с.
2. Кудинов В.А. Чуприна В.М. Пуозловой анализ динамических характеристик упругой системы станка. - М., Станки и инструмент, 1989. – №11. – С.8-11.

3. Подураев Ю.В. Мехатроника: основы, методы, применение: учебн. пос. для вузов. / Ю.В. Подураев – М.: Машиностроение, 2006. – 256 с.
4. Струтинський В.Б. Математичне моделювання процесів та систем механіки: підручник. / В.Б. Струтинський – Житомир, ЖИТИ, 2001– 612 с.
5. Струтинський В.Б. Тензорні математичні моделі процесів та систем: Підручник. – Житомир: ЖДТУ, 2005. – 635 с.

Bibliography (transliterated)

1. Kudinov V.A. *Dinamika stankov* [Dynamics machines]. Moscow. Mashinostroenie, 1967, 360 p.
2. Kudinov V.A., Chupryna V.M. Pouzlovoj analiz dinamicheskikh harakteristik uprugoj sistemy stanka [A rolling analysis of the dynamic characteristics of elastic system of the machine]. Moscow, Machines and tools. Publ., 1989. no. 11, pp.8-11.
3. Poduraev Ju.V. *Mehatronika: osnovyi, metody, primeneniye: uchebn. pos. dlya vuzov.* [Mechatronics: Fundamentals, Methods, Applications]. Moscow, Mashinostroenie, 2006. 256 p.
4. Strutyn'skij V.B. *Matematichne modelyuvannya protsesiv ta sistem mehaniki: pidruchnik* [Mathematical modeling of processes and systems mechanics]. Zhitomir, ZhITI, 2001. 612 p.
5. Strutyn'skij V.B. *TenzornI matematichnI modell protsesiv ta sistem: PIdruchnik.*[Tensor mathematical models of processes and systems]. Zhitomir: ZhDTU, 2005. 635 p.

Поступила (received) 14.04.2016

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Побудова динамічної тензорно-геометричної моделі просторової жорсткості металорізального верстату за основними підсистемами/ Б.В. Струтинський, О.Я. Юрчишин, В.М. Чуприна // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. – Х. : НТУ «ХПІ», 2016. – № 5 (1177). – С. 55-60. – Бібліогр.: 5 назв. – ISSN 2079-004X.

Построение динамической тензорно-геометрической модели пространственной жесткости металло-режущего станка по основным подсистемами / Б.В. Струтинский, Я. Юрчишин, В.М. Чуприна // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. – Х. : НТУ «ХПІ», 2016. – № 5 (1177). – С. 55-60. – Бібліогр.: 5 назв. – ISSN 2079-004X.

Building a dynamic tensor-geometrical model of spatial rigidity of machine tools for the main subsystems / B.V. Strutynsky, O.J. Yurchushun, V.M. Forelock // Bulletin of NTU «KhPI». Series: Technologies in mechanical engineering. – Kharkiv: NTU «KhPI», 2016. – № 5 (1177). – P. 55-60 – Bibliogr.: 5. – ISSN 2079-004X.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Струтинський Василь Борисович – д.т.н., проф., заслужений діяч науки і техніки України, завідувач кафедри конструювання верстатів та машин, Національний технічний університет України «КПІ», тел.: (044) 204-94-61, e-mail: kvm_mmi@mail.ru;

Струтинский Василий Борисович - д.т.н., проф., Заслуженный деятель науки и техники Украины, заведующий кафе-дри конструирования станков и машин, Национальный технический университет Украины «КПИ», тел. : (044) 204-94-61, e-mail: kvm_mmi@mail.ru;

Strutynskiy Vasyil Borysovych – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, honored worker of science and engineering of Ukraine, head of design tools and machines, National Technical University of Ukraine «KPI», tel.: (044) 204-94-61, e-mail: kvm_mmi@mail.ru;

Юрчишин Оксана Ярославівна – к.т.н., доц., Національний технічний університет України «КПІ», тел.: (044) 204-94-61, e-mail: urchyshynoks@ukr.net;

Юрчишин Оксана Ярославовна - к.т.н., доц., Национальный технический университет Украины «КПИ», тел.: (044) 204-94-61, e-mail: urchyshynoks@ukr.net;

Yurchyshyn Oksana Yaroslavivna – Candidate of Technical Sciences, Docent, National Technical University of Ukraine «KPI», tel.: (044) 204-94-61, e-mail: urchyshynoks@ukr.net;

Чуприна Володимир Михайлович – к.т.н., доц. Державний науково-випробувальний центр Збройних Сил країни, м. Чернігів, e-mail: voldchu@ukr.net;

Чуприна Владимир Михайлович - к.т.н., доц. Государственный научно-испытательный центр Вооруженных Сил страны, м. Чернигов, e-mail: voldchu@ukr.net;

Chupryna Volodymyr Mykhailovych – Candidate of Technical Sciences, Docent, The Chernihiv State Research and Testing Center of the Armed Forces of Ukraine, Chernihiv, e-mail: voldchu@ukr.net.

УДК 621. 923

С. А. КЛИМЕНКО, А. С. МАНОХИН

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССА «БРЕЮЩЕГО» ТОЧЕНИЯ

Запропоновано використання різального інструмента, робоча кромка якого виконана з криволінійною ділянкою в формі кола з радіусом відповідним радіусу кривизни еліпса, утвореного в перерізі деталі площиною, нахиленою до вісі під кутом λ в точці перетину еліпса з його малою піввіссю. При цьому, на поверхні обробленої деталі формуються пологі поздовжні мікронерівності значно меншої висоти.

Ключові слова: різальний інструмент, «бреюче» точіння, поздовжні мікронерівності

Предложено использование режущего инструмента, рабочая кромка которого выполнена с криволинейным участком в форме окружности с радиусом соответствующим радиусу кривизны эллипса, образованного в сечении детали плоскостью, наклоненной к оси под углом λ в точке пересечения эллипса с его малой полуосью. При этом, на обработанной детали формируются пологие продольные микронеровности значительно меньшей высоты.

Ключевые слова: режущий инструмент, «бреющее» точение, продольные микронеровности.

Proposed to use a cutting tool, the working edge of which is formed with a curved portion in the shape of a circle with a radius corresponding to the radius of curvature of the ellipse formed by the cross-sectional detail plane inclined at an angle to the axis λ ellipse at its intersection with the minor axis. In this case, the treated parts are formed flat longitudinal roughness significantly lower height.

Keywords: cutting tools, «shaving» turning, longitudinal unevenness.

Безвершинные режущие инструменты («бреющие» инструменты) позволяют эффективно выполнять чистовую обработку крупногабаритных деталей из закаленных сталей, легированных и отбеленных чугунов. Они дают возможность производить обработку с подачами, значительно превышающими характерные для обычного чистового точения.

В работах [1, 2] получены зависимости для определения высоты микронеровностей на обработанной поверхности R_z и активной длины режущей кромки L при безвершинном «бреющем» резании:

$$R_z = \frac{S^2 \operatorname{tg}^2 \lambda}{4(2R - 2t)}; \quad (1)$$

$$L = \frac{\sqrt{2 \cdot R \cdot t}}{\sin \lambda} + \frac{S}{2 \cos \lambda}, \quad (2)$$

где R – радиус обрабатываемой детали; t – глубина резания.

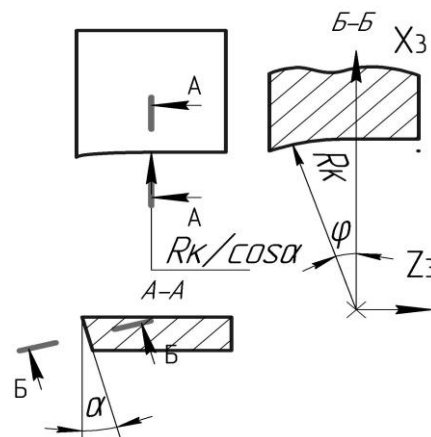
Как видно из зависимости (1) расчетная высота микронеровностей при увеличении λ и S возрастает, а при увеличении R – снижается.

Главным фактором, ограничивающим величину подачи, а значит и производительность обработки, является длина активной части режущей кромки (или ширина среза), определяемая зависимостью (2).

Для обеспечения заданной шероховатости нужно выбрать такое значение угла наклона режущей кромки λ , которое даст возможность вести обработку с максимальной подачей, учитывая ограничения, накладываемые размером используемого инструмента или режущей пластины в случае применения инструмента с механическим креплением режущего элемента. Например, если обработка производится инструментом с режущей пластиной квадратной формы со стороной 12,7 мм, величина L должна быть меньше этой величины. Оптимальные для обеспечения минимальной шероховатости при максимальной подаче значения λ находятся в диапазоне (10–15)°. Однако, при малых углах наклона режущей

кромки увеличивается ширина среза L , что вынуждает применять пластины больших размеров. При этом нужно учитывать, что более крупные пластины имеют, во-первых, большую стоимость и, во-вторых, механические свойства их материала, зачастую, имеют более низкие значения.

В настоящей работе рассмотрен оригинальный подход к созданию «бреющих» инструментов для токарной обработки, который позволяет увеличить подачу, не вызывая значительного роста высоты микронеровностей на обработанной поверхности, за счет предания режущей кромке инструмента соответствующей формы. Такой формой может быть окружность, имеющая радиус, соответствующий радиусу кривизны эллипса, образованного в сечении детали плоскостью, наклоненной к ее оси под углом λ в точке пересечения эллипса с его малой полуосью. В таком случае, форма микронеровностей в продольном сечении детали будет более полой, а их высота значительно уменьшится. Очевидно, что одновременно увеличится и ширина среза, однако этого можно избежать, если в виде окружности формировать лишь одну часть кромки, оставляя другую – расположенную ниже точки скрещивания режущей кромки и оси детали – прямолинейной (рис. 1).



© О.О. Баранов, Г.И. Костюк, 2015

Рис. 1 – Эскиз режущей части инструмента с криволинейной кромкой

Задней поверхности пластины необходимо придать вогнутую форму. При этом в сечении Б-Б она будет цилиндрической с радиусом основания R_k . В этом случае, при $\gamma = 0^\circ$, режущая кромка представляет собой эллипс с полуосями R_k и $R_k/\cos\alpha$.

Применительно к обработке инструментом с криволинейной кромкой, определить высоту микронеровностей на обработанной поверхности, исходя из кинематико-геометрических соображений, можно следующим образом.

Задавая движение линии контакта поверхности детали и режущей кромки инструмента (вращательное вокруг продольной оси детали и прямолинейное вдоль нее) можно установить винтовой профиль обработанной поверхности. Для определения высоты микронеровностей необходимо найти кривую пересечения этой винтовой поверхности и осевой плоскости детали.

Зададимся системами координат (рис. 2): $OXYZ$ – неподвижная система, ось OZ которой направлена вдоль оси детали; $(OXYZ)_0$ – вращается вокруг оси OZ и перемещается вдоль нее; $(OXYZ)_1$ – система, образованная параллельным переносом системы $(OXYZ)_0$ вдоль оси X_0 на расстояние $(R - t)$. Плоскость $(OXZ)_1$ этой системы совпадает с основной плоскостью инструмента; $(OXYZ)_2$ – образована поворотом системы $(OXYZ)_1$ против часовой стрелки на угол λ вокруг оси OX_1 ; $(OXYZ)_3$ – образована поворотом системы $(OXYZ)_2$ вокруг оси OZ_2 на угол γ (плоскость этой системы совпадает с передней поверхностью инструмента).

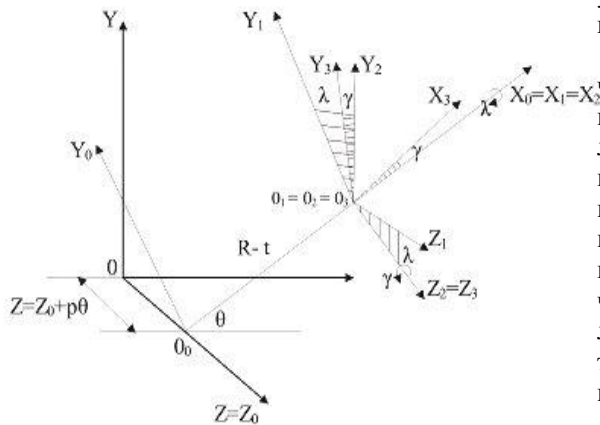


Рис. 2 – Системы координат для определения высоты микронеровностей на обработанной поверхности

Форму режущей кромки при $\varphi \in \varphi_0 \dots \varphi_1$ определим в системе $(OXYZ)_3$:

$$\begin{cases} X_3 = \frac{R\hat{e} \cdot (\cos\phi - 1)}{\cos\alpha} \\ Y_3 = 0 \\ Z_3 = R\hat{e} \cdot \sin\phi \end{cases}$$

При $\varphi \geq 0^\circ$ режущая кромка имеет прямолинейную форму, что соответствует бесконечно большому значению R_k .

Параметрические уравнения траекторий движения точек режущей кромки инструмента в неподвижной системе XYZ определяются выражениями:

$$\begin{cases} X = \left(\frac{R\hat{e}}{\cos\alpha} \cdot (\cos\phi - 1) \cdot \cos\gamma + R - t \right) \cdot \cos\theta + \\ + \left(\frac{R\hat{e}}{\cos\alpha} \cdot (\cos\phi - 1) \sin\gamma \cos\lambda + R_k \sin\phi \cdot \sin\lambda \right) \cdot \sin\theta \\ Y = \left(\frac{R\hat{e}}{\cos\alpha} \cdot (\cos\phi - 1) \cdot \cos\gamma + R - t \right) \cdot \sin\theta - \\ - \left(\frac{R\hat{e}}{\cos\alpha} \cdot (\cos\phi - 1) \sin\gamma \cos\lambda + R_k \sin\phi \cdot \sin\lambda \right) \cdot \cos\theta \\ Z = -\frac{R\hat{e}}{\cos\alpha} \cdot (\cos\phi - 1) \sin\gamma \sin\lambda + R_k \sin\phi \cdot \cos\lambda + p \cdot \theta \end{cases}$$

Проекция огибающей кривой в осевом сечении обработанной поверхности при $X = 0$ определяется уравнениями:

$$Y = \left(\frac{R\hat{e}}{\cos\alpha} (\cos\phi - 1) \cdot \cos\gamma + R - t \right) \sin\theta - \\ - \left(\frac{R\hat{e}}{\cos\alpha} (\cos\phi - 1) \cdot \cos\lambda + R\hat{e} \cdot \sin\phi \cdot \sin\lambda \right) \cos\theta \quad (3)$$

$$Z = -\frac{R\hat{e}}{\cos\alpha} (\cos\phi - 1) \sin\gamma \cdot \sin\lambda + \\ + R\hat{e} \cdot \sin\phi \cdot \cos\lambda + p \cdot \theta \quad (4)$$

где $p = \theta/2\pi$; $\varphi \in \varphi_0 \dots 0$. При $\varphi \in 0 \dots \varphi_1$ значение R_k следует принять равным ∞ , в этом случае указанные уравнения будут описывать движение прямолинейного участка кромки.

Форма огибающей в осевом сечении, полученная численным решением данной системы уравнений в пакете MATHCAD, показана на рис. 3. Сплошной линией на рисунке обозначена огибающая, образующаяся в случае, если режущая кромка имеет криволинейный участок, пунктирной – огибающая, если кромка прямолинейна. Как видно, правая ветвь кривой, соответствующая участку режущей кромки заточенной по радиусной форме, существенно более пологая, чем левая (прямолинейный участок). Найдя точку пересечения двух огибающих, смещенных относительно друг друга на расстояние, равное подаче S , определим высоту поперечных микронеровностей.

На рис. 4 показана схема для расчета длины активной части режущей кромки и минимальной ширины инструмента или режущей пластины, при которой возможна обработка.

Уравнение окружности радиуса $R - t + Rz$ в системе $X'Y'$ запишем в виде $(X' + R - t)^2 + Y'^2 = (R - t + Rz)^2$. Уравнение, описывающее форму криволинейной части режущей кромки в проекции на торцевую плоскость детали.

$$\begin{pmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \\ 1 \end{pmatrix} = M\lambda \cdot M\gamma \cdot \begin{pmatrix} X_3 \\ Y_3 \\ Z_3 \\ 1 \end{pmatrix},$$

откуда:

$$\begin{cases} X' = \frac{R\hat{e} \cdot (\cos \varphi - 1)}{\cos \alpha} \cdot \cos \gamma \\ Y' = -R\hat{e} \cdot (\cos \varphi - 1) \cdot \sin \gamma \cdot \cos \lambda - R\hat{e} \cdot \sin \varphi \cdot \sin \lambda \end{cases}$$

Найдя координаты точки *A*, получим возможность рассчитать длину режущей кромки.

Выражая *Y'* через *X'* получаем:

$$Y' = -X' \cdot \operatorname{tg} \gamma \cdot \cos \lambda - R\hat{e} \cdot \sin \lambda \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{X' \cdot \cos \alpha}{R\hat{e} \cdot \cos \gamma} + 1 \right)^2}.$$

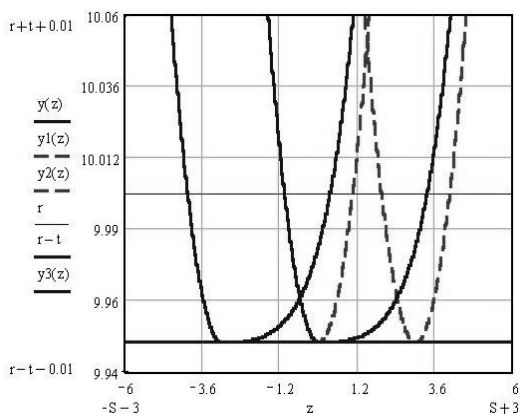


Рис. 3 – Схема образования поперечных микронеровностей: --- — прямолинейная режущая кромка; - - - - радиусная режущая кромка

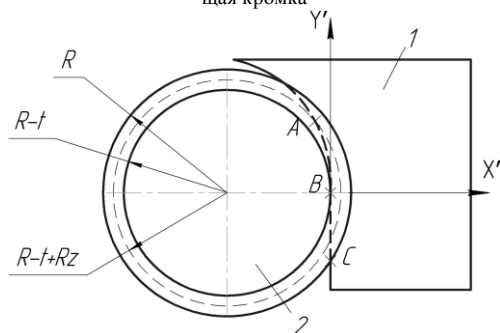


Рис. 4 – Схема для расчета длины активной части режущей кромки *ABC*: *t* – глубина резания; *R* – радиус необработанной детали; *Rz* – высота микронеровностей; *1* – инструмент; *2* – деталь

Координаты точки *A* найдем, решая систему уравнений:

$$\begin{cases} Y' = -X' \cdot \operatorname{tg} \gamma \cdot \cos \lambda - R\hat{e} \cdot \sin \lambda \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{X' \cdot \cos \alpha}{R\hat{e} \cdot \cos \gamma} - 1 \right)^2} \\ Y' = \sqrt{(R - t + Rz)^2 - (X' + R - t)^2}. \end{cases}$$

Минимальная необходимая ширина пластины:

$$L_{\min} = \frac{Y_A}{\sin \lambda} + \frac{\sqrt{t \cdot (2 \cdot R - t)}}{\sin \lambda},$$

где второе слагаемое уравнения соответствует длине контакта прямолинейного участка режущей кромки.

Активная длина режущей кромки определяется зависимостью:

$$L_{\text{акт}} = 2R\kappa \cdot \arcsin \left[\frac{\sqrt{X_A^2 + Y_A^2 + Z_A^2}}{2 \cdot R\kappa} \right].$$

Ввиду больших значений *Rκ*, значения *L_{min}* и *L_{акт}* близки между собой.

Радиус *Rκ* заточки пластины зависит от угла наклона режущей кромки, углов γ и α , а также от радиуса обрабатываемой детали. Если будет выбрано недостаточное значение *Rκ*, величина *L_{min}* будет излишне большой. При больших размерах *Rκ* шероховатость обработанной поверхности увеличивается. Учитывая влияние указанных параметров, величина *Rκ* определяется по выражению:

$$R\hat{e} = \frac{R}{\sin^2 \lambda \cdot \cos^2 \gamma \cdot \cos \alpha} \quad (5)$$

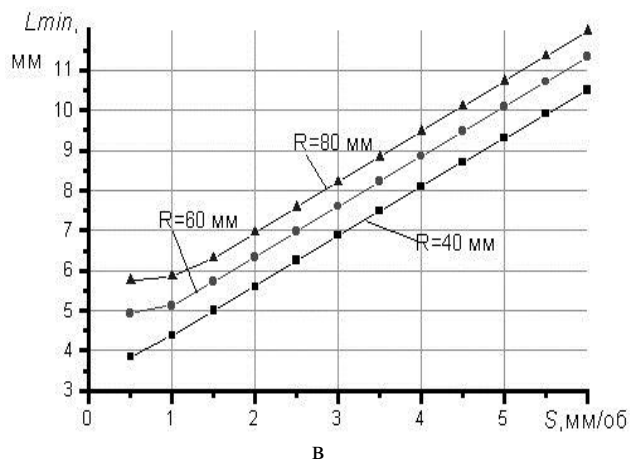
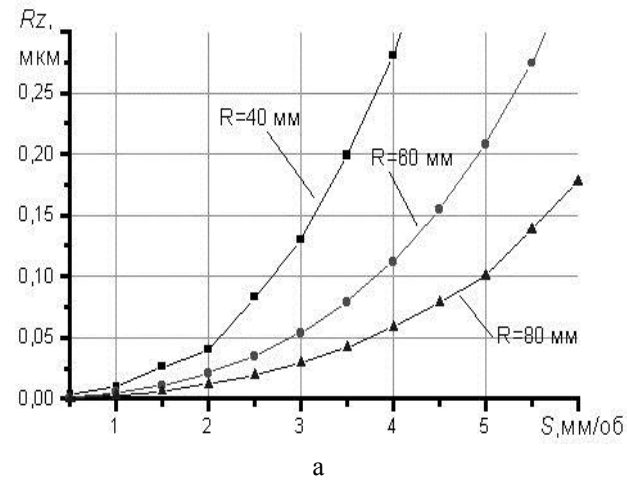
Анализ влияния углов α и γ инструмента на шероховатость обработанной поверхности и минимальную необходимую ширину кромки инструмента показывает, что в случае, если она имеет участок, заточенный по радиусной форме, отличные от нуля значения переднего угла γ приводят к росту величин *L_{min}* и *Rz*. По этой причине данный параметр следует принимать 0°. Задний угол не оказывает существенного влияния на *L_{min}* и *Rz* и может изменяться в широких пределах. Значения угла наклона режущей кромки λ , переднего и заднего углов инструмента γ и α , а также глубины резания *t* приняты при дальнейших расчетах равными соответственно 40°, 0°, 15° и 0,05 мм.

Результаты расчетов высоты микронеровностей и величины *L_{min}* по приведенным выше зависимостям представлены на рис. 5. Там же для сравнения приведены результаты расчетов *Rz* и *L_{min}* по зависимостям (1) и (2) в случае применения инструмента с прямолинейной режущей кромкой.

Анализ зависимостей на рис. 5 показывает, что путем изменения формы режущей кромки «бреющего» инструмента можно достичь снижения расчетных значений *Rz*, при той же величине подачи, в 10–15 раз. Это снижение тем больше, чем меньше диаметр обрабатываемой детали, больше подача и угол наклона λ инструмента с прямолинейной кромкой. Учитывая влияние вибраций, износ инструмента, пластические явления в зоне резания и т.д. в реальном процессе обработки, особенно при больших подачах, расчетный уровень микронеровностей недостижим. Однако предлагаемый способ заточки делает возможным увеличение подачи в 2–3 раза без образования характерных для «бреющей» обработки микронеровностей, расчетная величина которых для *R* = 80 мм при λ = 18° и *S* = 5 мм/об составляет уже *Rz* 4. Сравнивая полученные результаты, заметим что, если радиусная кромка позволяет применять подачи до 5–6 мм/об и при этом величина *L_{min}* не превышает 12,5 мм даже для *R* = 80 мм, то обычный косоугольный безвершин-

ный инструмент работает с более широкой режущей кромкой.

При условии, что $Rz \leq 1$ мкм, прямолинейная кромка позволяет применять подачу до 3,8 мм/об (при $R = 80$ мм и $\lambda = 12^\circ$), но в этом случае $L_{min} = 16$ мм.



Для тех же условий, но при $\lambda = 18^\circ$, требуемая ширина кромки меньше – 12,5 мм, однако, исходя из условия $Rz \leq 1$, подача ограничивается величиной 2,5 мм/об.

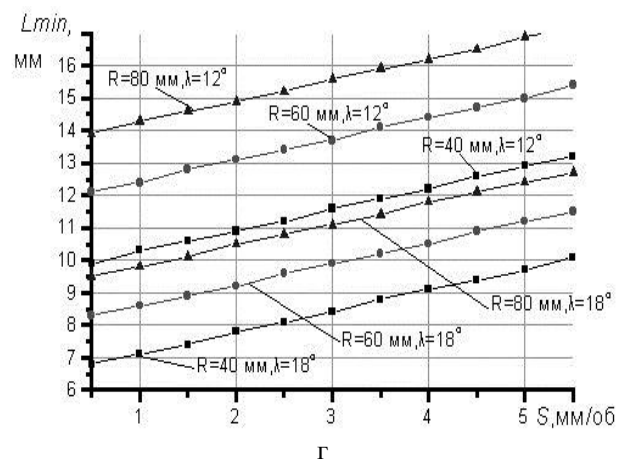
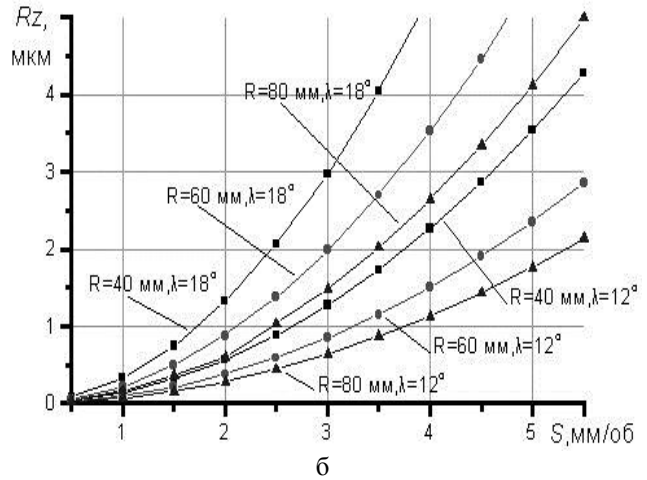


Рис. 5 – Расчетная высота микронеровностей Rz (а, б), величина L_{min} (в, г) в зависимости от подачи и радиуса заготовки
Р: а, в – радиусная режущая кромка; б, г – прямолинейная режущая кромка

Недостатком «бреющего» инструмента с криволинейной режущей кромкой является необходимость заточки инструмента, учитывая размер обрабатываемой заготовки. Диаметр обработки можно варьировать лишь в очень незначительных пределах путем небольшого изменения угла λ . Кроме того, такой инструмент требует точного позиционирования его относительно детали на станке.

Учитывая вышеизложенное, применение «бреющих» инструментов, оснащенных радиусными пластин, может быть перспективно в случае серийного производства деталей типа «вал» с повышенными требованиями к качеству обработанной поверхности.

Опытная проверка предлагаемого способа повышения эффективности применения косоугольных («бреющих») инструментов производилась при обработке заготовки из стали 40X13, закаленной до 40 HRC, инструментом из твердого сплава T15K6. При диаметре заготовки $\varnothing 75$ мм и $\lambda = 36^\circ$ оптимальный

радиус кривизны режущей кромки, рассчитанный в соответствии с выражением (5) составляет 117 мм, а высота микронеровностей, определенная в ходе совместного решения уравнений (3) и (4) составляет 1,74 мкм. При заточке режущей кромки пластины типоразмера SNUN-120408 из сплава T15K6 алмазным инструментом марки AC6 (форма 12A2) был обеспечен радиус кривизны режущей кромки реза равный 125 мм.

В сравнении с оптимальной величиной $R_k = 117$ мм, больший радиус кривизны режущей кромки приводит к росту величины формируемых при обработке микронеровностей. При прочих равных условиях расчетная их величина составляет в данном случае 3,13 мкм.

На рис. 6 представлены профилограммы поверхностей, обработанных инструментами с прямолинейной и радиусной режущими кромками. Как видно, высота микронеровностей во втором случае снижается почти в три раза (Rz 14 и 5 мкм соответ-

ственно) за счет эффекта «подрезания» пиков микронеровностей.

Хотя в реальном процессе снижение высоты микронеровностей при использовании криволинейной режущей кромки не столь значительно, в срав-

нении с расчетными данными, как показывают эксперименты, применение рассматриваемого метода ведет к повышению эффективности косоугольной безвершинной обработки.

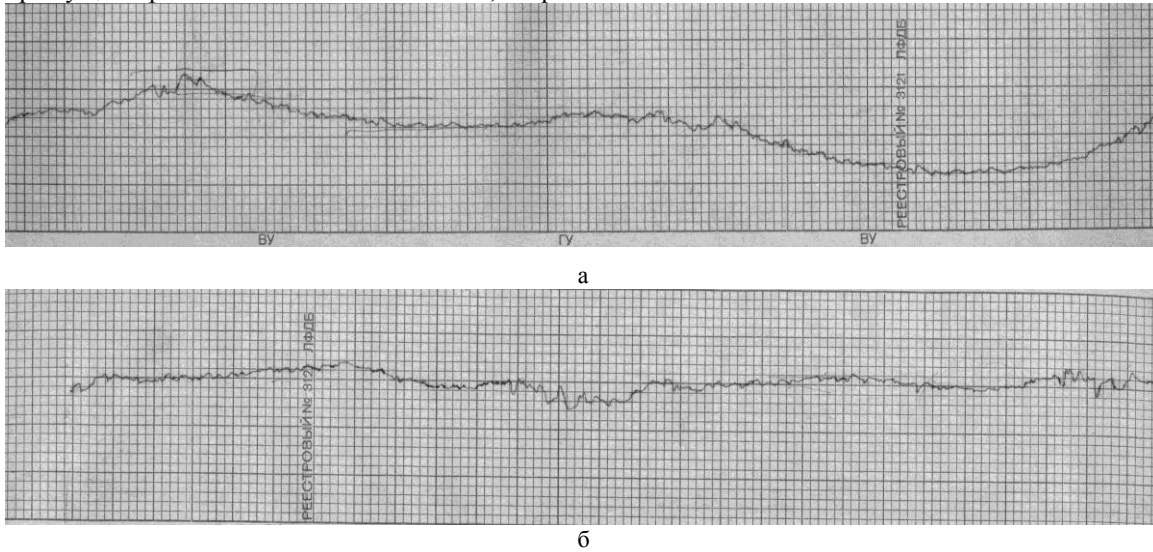


Рис. 6 – Профилограмма поверхности, обработанной инструментом (ГУ 50; ВУ1000) (сталь 40Х13 (40 HRC); $\varnothing = 75$ мм; $v = 94$ м/мин; $S = 2,66$ мм/об; $t = 0,05$ мм; $\lambda = 36^\circ$; $\gamma = -10^\circ$; $\alpha = 10^\circ$); а – с прямолинейной режущей кромкой; б – с радиусной режущей кромкой

Список литературы

1. Киппер Э. Е. Исследование процесса образования неровностей поверхности при обработке коррозионностойких сталей лезвийным инструментом: автореф. дис. канд. техн. наук. – Брянск : БИТМ, 1970. – 19 с.
2. Харфен Р. В. Исследование чистового точения труднообрабатываемых металлов и сталей с большими подачами: автореф. дис. канд. техн. наук. – Киев : КПИ, 1974. – 17 с.
3. *instrumentom* [The study of the formation of surface irregularities in the processing of corrosion-resistant steel blade tool]. Abstract of dissertation of the candidate of technical sciences. Bryansk: BITM, 1970. 19 p.
4. Harfen R. V. *Issledovaniye chistovogo tocheniya trudnoobrabatyvayemykh metallov i staley s bol'shimi podachami* [Research finish turning of hard metals and steels with high feed]. Abstract of dissertation of the candidate of technical sciences. Kiev. KPI, 1974. 17 p.

References (transliterated)

1. Kipper E. E. *Issledovaniye protsesssa obrazovaniya nerovnostey poverkhnosti pri obrabotke korrozionnostoykikh staley lezviynym*

Поступила (received) 26.04.2016

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Підвищення ефективності процесу «брючого» точіння / С. А. Клименко, А. С. Манохін // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. – Х. : НТУ «ХПІ», 2016. – № 5 (1177). – С. 61–65. – Бібліогр.: 2 назв. – ISSN 2079-0023.

Повышение эффективности процесса «брюющего» точения / С. А. Клименко, А. С. Манохин // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – № 5 (1177). – С. 61–65. – Бібліогр.: 2 назв. – ISSN 2079-0023.

Increasing the efficiency of «shaving» turning / S. A. Klimenko, A. S. Manokhin // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technologies in mechanical engineering. – Kharkov: NTU "KhPI", 2016. – No. 5 (1177). – P. 61–65. – Bibliogr.: 2. – ISSN 2079-0023.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Клименко Сергій Анатолійович – доктор технічних наук, професор, зам. директора ІСМ ім. Бакуля, м. Київ; тел.: (050) 331-19-22; e-mail: atmu@meta.ua.

Клименко Сергей Анатольевич – доктор технических наук, профессор, зам. директора ИСМ им. Бакуля, г. Киев; тел.: (050) 331-19-22; e-mail: atmu@meta.ua.

Klimenko Sergey Anatol'yevich – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Vice Director of V.Bakul Institute for Superhard materials, Kyiv; tel.: (050) 331-19-22; e-mail: atmu@meta.ua.

Манохин Андрій Сергійович – докторант, ІСМ ім. Бакуля, м. Київ; тел.: (050) 331-19-22;

Манохин Андрей Сергеевич – докторант, ИСМ им. Бакуля, г. Киев; тел.: (050) 331-19-22;

Manokhin Andrii Serhiiovych – doctoral candidate, V.Bakul Institute for Superhard materials, Kiev; tel.: (050) 331-19-22.

УДК 621.9

О.Ю. ПРИХОДЬКО, А.Н. УШАКОВ, С.Е. СЛИПЧЕНКО**ВОПРОСЫ АЛГОРИТМИЗАЦИИ РАБОТЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ SWITCH-ТЕХНОЛОГИИ**

Використання SWITCH-технології при здійсненні управління складними технологічними системами і виробничими автоматичними лініями розглядалося для автоматичної лінії, що містить три одиниці технологічного обладнання та обслуговується конвеєрною системою і роботами-маніпуляторами. Використання запропонованих підходів дозволяє: по-перше, побудова всіх основних моделей засновано на застосуванні тільки автоматної термінології, а по-друге, використовувати динамічну модель тільки одного типу - система взаємопов'язаних автоматів; - Застосування такої динамічної моделі дозволяє ефективно описувати і реалізовувати завдання розглянутого класу навіть при великій їх розмірності.

Ключевые слова: мережі Петрі, кінцеві автомати, моделювання, алгоритм, керовані переходи, програмовані логічні контролери, SWITCH-технологія, автомат Мура, вкладені автомати.

Использование SWITCH – технологии при осуществлении управления сложными технологическими системами и производственными автоматическими линиями рассматривалось для автоматической линии, содержащей три единицы технологического оборудования и обслуживаемой конвейерной системой, и роботами-манипуляторами. Использование предложенных подходов позволяет: во-первых, построение всех основных моделей основано на применении только автоматной терминологии, а во-вторых, использовать динамическую модель только одного типа – система взаимосвязанных автоматов; – применение такой динамической модели позволяет эффективно описывать и реализовывать задачи рассматриваемого класса даже при большой их размерности.

Ключевые слова: сети Петри, конечные автоматы, моделирование, алгоритм, управляемые переходы, программируемые логические контроллеры, SWITCH-технология, автомат Мура, вложенные автоматы.

Using the SWITCH-technology in the management of complex technological systems and production automatic lines considered for the automatic line-ing containing three units processing equipment and serviced by a conveyor system and manipulators. Using the proposed approach allows: first, the construction of all the major models based on the use of terminology only an automaton, and secondly, the use of a dynamic model of only one type - a system of interconnected machines; - The use of a dynamic model can effectively describe and implement the objectives of this class, even with their big-time dimension.

Keywords: Petri nets, state machines, modeling, algorithm-driven transitions, programmable logic controllers, SWITCH-technology, Moore automaton, nested automata.

Введение. В настоящее время в различных областях программирования все шире применяются конечные автоматы, которые в течение многих десятилетий использовались в основном при аппаратных реализациях. В работе на основе обзора методов алгоритмизации и программирования для систем логического управления и "реактивных" систем, сформулированы некоторые положения технологии алгоритмизации и программирования для этих классов систем. При этом проектируемые программы рассматриваются как взаимосвязанные конечные автоматы. Конечные автоматы начинают применяться ведущими фирмами мира для программирования программируемых логических контроллеров (ПЛК), а также для описания поведения отдельных объектов в объектно-ориентированном программировании. Они используются при программировании протоколов, игр и схем программируемой логики, а также в такой традиционной для их применения области как создание компиляторов.

Анализ последних исследований и литературы. Известен международный стандарт [1], определяющий языки программирования для ПЛК и программно реализованных ПЛК (PC - контроллеров) – промышленных (управляющих) компьютеров (обычно IBM PC совместимых) с программным обеспечением класса SoftPLC и SoftLogic для создания прикладных программ. Известны также языки программирования для микроконтроллеров и собственно промышленных (управляющих) компьютеров [2]. Однако ведущими в области автоматизации фирмами мира [1-

7], как показал обзор, выполненный в [8], до сих пор не был выбран (разработан) язык алгоритмизации для задач логического (основанного на истинности и ложности) управления

Целью данной статьи является рассмотрение вопросов использования STATE-технологии при осуществлении управления сложными технологическими системами и производственными автоматическими линиями.

Постановка проблемы. Язык алгоритмизации который позволил бы: – специалистам различных областей знаний однозначно и просто понимать, что должно быть сделано, что делается и что сделано в программно реализуемом проекте; – формально и изоморфно переходить от алгоритма к программам на различных языках программирования, используя минимальное число внутренних (управляющих) переменных в программах, так как эти переменные затрудняют понимание программ; – легко и корректно вносить изменения в разработанные алгоритмы и в построенные по ним программы; – корректно проводить сертификацию программ. Отсутствие такого языка оставляло открытым вопрос о создании сквозной технологии алгоритмизации и программирования для систем логического управления, которая позволила бы повысить качество проектирования их программного обеспечения.

В [8] выполнен обзор известных технологий алгоритмизации и программирования для систем рассматриваемого класса, на основе которого была раз-

работана новая технология, названная "SWITCH-технология", позволяющая обеспечить выполнение указанных выше требований. Эта технология может быть названа также "STATE-технология" или, более точно, "AUTOMATON-технология". Основные положения этой технологии. 1. В качестве основного в предлагаемой технологии используется понятие "внутреннее состояние" (в дальнейшем — "состояние"). Состояния рассматриваются как некоторые абстракции, вводимые в начале процесса алгоритмизации, например, путем однозначного сопоставления каждого из них с одним из физических состояний управляемого объекта, так как обычно "функционирование производственных систем проявляется через изменение их состояний" [9]. При этом каждое состояние в алгоритме поддерживает объект в соответствующем состоянии, а переход в новое состояние в алгоритме приводит к переходу объекта в новое соответствующее состояние, что и обеспечивает процесс логического управления объектом. Например, объект "технологическая система" может находиться в одном из четырех рабочих состояний ("наладочный режим", "переходный режим", "рабочий режим", "отключенное состояние"), каждое из которых может поддерживаться соответствующим состоянием в алгоритме управления. Для технологической системы «с памятью» алгоритм управления может иметь и меньшее количество состояний. При необходимости в алгоритм управления могут быть введены также и другие состояния, связанные, например, с неисправностями объекта и неправильными действиями оператора, учитывающие разного рода блокировки. Связь состояний с внутренними (управляющими) переменными появляется в дальнейшем на этапе кодирования состояний, отсутствующем в традиционном программировании. При этом число вводимых управляющих переменных зависит от принятого вида кодирования. Такой подход, известный из теории автоматов, принципиально отличается от подхода, обычно применяемого в программировании, при котором в ходе процесса программирования по необходимости вводятся внутренние (обычно двоичные) переменные, а затем каждый различный набор их значений объявляется состоянием программы [10]. Однако, так как понятие "состояние" в программировании прикладных задач обычно не используется, ответ на вопрос о количестве состояний в программе, содержащей, например, n двоичных внутренних переменных, остается в большинстве случаев открытым. Отметим, что в этом случае число состояний может находиться в диапазоне от n до 2^n . Так как любое состояние может быть представлено двумя значениями (логических нуля или единицы). При решении задачи должны быть учтены особенности обрабатываемых деталей, технологические возможности станков и предусмотрены алгоритмы минимизации производственных ресурсов.

Для синтеза вариантов технологической структуры элементы системы соединяют технологической (согласование технологических процессов единиц оборудования), кинематической

(объединение единиц оборудования), конструктивной (выполнение одним устройством функций разных единиц оборудования) и управляющей (блокировка команд управления) связями.

При циклическом выполнении программы (например, при обработке с использованием агрегированной технологической системы) ввиду наличия обратной связи от выхода к входу, она может быть последовательностной даже и при отсутствии управляющих переменных.

В качестве основной структурной модели технологической системы предлагается использовать автоматы Мура, в которых коды состояний и значения выходов принципиально разделены, а значения выходных переменных в каждом состоянии не зависят от входных воздействий, что упрощает внесение изменений в описания таких автоматов. Эти свойства алгоритмов и программ, обеспечивающие упрощение внесения корректных изменений в них, обеспечивают управляемость технологическим объектом. Первоначально число состояний в автомате Мура может быть выбрано равным числу состояний в управляемом им объекте (включая его неисправные состояния при необходимости). В дальнейшем в автомат могут вводиться дополнительные состояния, связанные, например, с неправильными действиями оператора или срабатыванием какой-либо блокировки, а после этого число состояний в автомате может минимизироваться за счет объединения эквивалентных состояний.

При использовании этой технологии нужно учитывать некоторые особенности:

- в качестве базового используется понятие «автомат», а не «агрегатный станок», «обрабатывающий центр», «робот-манипулятор» и т.д.;

- в общем случае автоматы рассматриваются не изолированно, а как составные части взаимосвязанной системы (автоматической линии) — системы взаимосвязанных автоматов, поведение которой формализуется с помощью системы взаимосвязанных графов переходов;

- в качестве основной применяется модель смешанного автомата, для описания поведения которого используется соответствующий граф переходов, содержащий только «простые» состояния.

- на этапе изучения предметной области на основе технического задания, которое при автоматизации технологических процессов обычно выдается заказчиком в словесной форме в виде совокупности сценариев и случаев использования, строится структурная схема технологической системы, позволяющая получить общее представление об организации управления, применяемой аппаратуре и интерфейсе объекта управления.

На этапе анализа на основе технического задания выделяются сущности, каждая из которых называется автоматом (например, обрабатывающий центр или силовой агрегат). Состояния каждого автомата первоначально определяются по выделенным состояниям объекта управления или его части, а при большом их количестве – по алгоритму управления, построенному

в другой нотации (например, в виде схемы алгоритма). В автоматы также могут быть введены и другие состояния, связанные, например, с неправильными действиями оператора, каждый автомат при необходимости может быть декомпозирован. Итеративный процесс анализа может выполняться многократно и завершается созданием перечня автоматов и перечня состояний для каждого автомата.

На этапе проектирования в отличие от традиционного программирования вводится подэтап — кодирование состояний автомата. При этом в каждом автомате для различия состояний применяется многозначный код, в качестве комбинаций которого вводят-

ся десятичные номера состояний; — автоматы взаимодействуют за счет обмена номерами состояний, вложенности и вызываемости. Они также могут быть одновременно вложенными и вызываемыми;

Далее строится схема взаимодействия автоматов, отражающая указанные типы взаимодействий. Она формализует систему взаимодействующих автоматов. Эта схема заменяет в предлагаемой технологии диаграмму объектов и частично диаграмму взаимодействий (диаграмму кооперации), которые применяются в объектном моделировании. Пример схемы связей автомата для модели управления автоматической линией приведен на рис. 1.

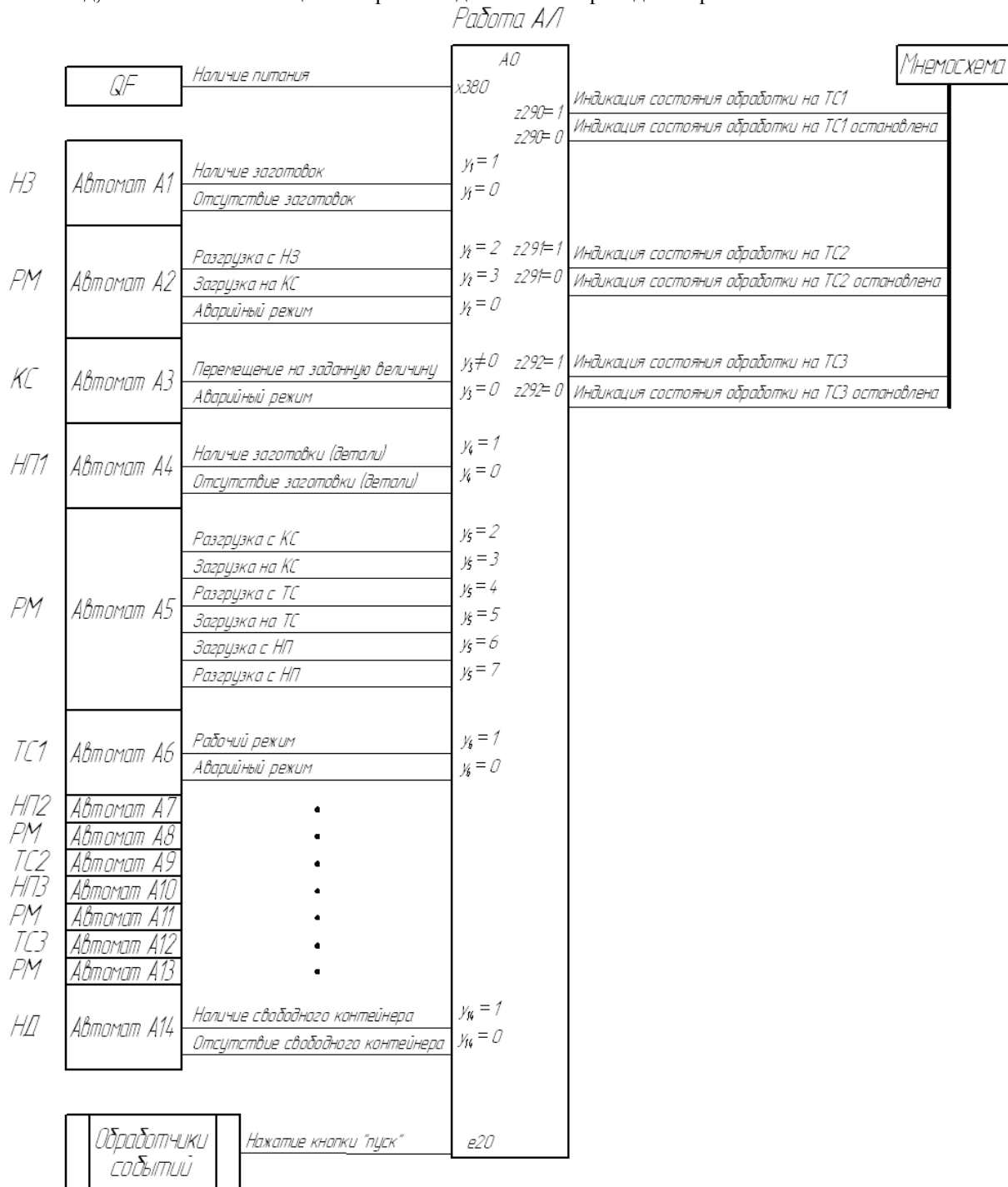


Рис. 1 – Схема связей автоматической линии

Связи каждого автомата с его «окружением» формализуются схемой связей автомата, предназначенной для полного описания интерфейса автомата. В этой схеме приводятся источники и приемники информации, полные названия всех воздействий и их обозначения, а также информация о том, в какой автомат он вложен и какие автоматы вложены в него.

Основные обозначения на схеме: QF – входные автоматические выключатели; АЛ-автоматическая линия; НЗ-накопитель заготовок; НД- накопитель деталей; НП- накопитель промежуточный; РМ- робот-манипулятор; КС- конвейерная система; ТС – технологическая система (металлорежущий станок); имя автомата начинается с символа А, имя события – с символа е (от английского слова event — событие), имя входной переменной — с символа х, имя переменной состояния автомата — с символа у, а имя выходного воздействия — с символа z. После каждого из указанных символов следует номер соответствующего автомата или воздействия.

Нами рассматривается модель управления автоматической линией, содержащей три единицы технологического оборудования представленная при помощи сети Петри (рис.2), в которой P_1, P_2, P_3 – обработка на технологических системах; P_4, P_5 – работа промежуточных накопителей (складов); P_6 – работа накопителя заготовок; P_7 – работа накопителя готовых деталей; $P_8, P_9, P_{10}, P_{11}, P_{12}$ – осуществление погрузочно-разгрузочных операций роботами-манипуляторами.

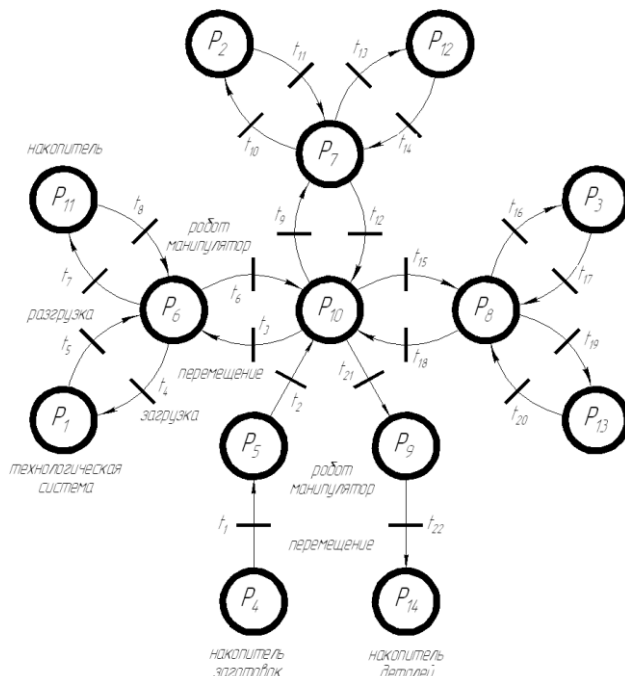


Рис.2 – Модель управления автоматической линией, содержащей три единицы технологического оборудования

Важным вопросом является согласование работы звеньев автоматической линии. Расхождение в производительности технологических систем приводит к накоплению объемов незавершенного

производства. Определение мест задержки маркеров перед позициями позволит изменить производительность участков автоматической линии так, чтобы между ними отсутствовали промежуточные склады (промежуточные накопители). В автоматической линии, содержащей три технологические системы, все операции загрузки и разгрузки осуществляются пятью роботами манипуляторами, обслуживающими конвейерную систему. Возникает необходимость согласования скорости перемещения конвейерной системы и времени технологической операции на каждой из технологических систем.

Мнемосхема, которой оснащена автоматическая линия позволяет отслеживать нештатные и аварийные ситуации на рабочих местах (технологических системах) и принимать экстренные решения.

Выводы

Использование предложенных подходов позволит повысить качество проектирования и реализации программ логического управления технологическими системами, в том числе и за счет автопрограммирования, при котором человек, знающий объект, сам выполняет алгоритмизацию и программирование. В отличие от объектного моделирования, во-первых, построение всех основных моделей основано на применении только автоматной терминологии, а во-вторых, используется динамическая модель только одного типа — система взаимосвязанных автоматов; — применение такой динамической модели позволяет эффективно описывать и реализовывать задачи рассматриваемого класса даже при большой их размерности. Имитация взаимодействия единиц оборудования в виде сети Петри позволяет выбрать структуру сложной технологической системы, согласовать работу единиц оборудования, выявить «узкие места» в работе единиц автоматической линии, определить емкости промежуточных накопителей, оценить уровень отказоустойчивости системы, определить влияние времени переналадки оборудования на производительность системы.

Список литературы

1. International standard IEC 1131-3. Programmable controllers. Part 3. Programming languages. International Electrotechnical Commission. 1993.
2. SIMATIC. Simatic S7/M7/C7. Programmable controllers. SIEMENS. Catalog ST 70. 1996.
3. TSX T607. Programming terminal. User's manual. Telemecanique. 1987.
4. Modicon catalog & specifier's guide. Modicon. AEG Schneider Automation. 1995.
5. Programmable controller. MELSEC - A. Programming manual. Type ACPU. Common instructions. Mitsubishi Electric.
6. ABB Procontic T200. Mid-range automation systems using modern technology. Asea Brown Boveri. 1994.
7. ET-PDS. Software for programmable logic controllers. Toshiba International (Europe) Ltd. 1995.
8. Шальто А.А. SWITCH-технология. Алгоритмизация и программирование задач логического управления. СПб.: Наука, 1998.
9. Гузик И.М. Стандарт МЭК 1131: язык GRAFCET — знакомство поближе //Schneider Automation Club. 1999. N6.

10. Лавров С.С. Лекции по теории программирования. Учебное пособие. СПб.: СПбГТУ, Нестор, 1999.

Bibliography (transliterated)

1. International standard IEC 1131-3. Programmable controllers. Part 3. Programming languages. International Electrotechnical Commission. 1993.
2. SIMATIC. Simatic S7/M7/C7. Programmable controllers. SIEMENS. Catalog ST 70. 1996.
3. TSX T607. Programming terminal. User's manual. Telemecanique. 1987.
4. Modicon catalog & specifier's guide. Modicon. AEG Schneider Automation. 1995.
5. Programmable controller. MELSEC - A. Programming manual. Type ACPU. Common instructions. Mitsubishi Electric.

6. ABB Procontic T200. Mid-range automation systems using modern technology. Asea Brown Boveri. 1994.
7. ET-PDS. Software for programmable logic controllers. Toshiba International (Europe) Ltd. 1995.
8. Shalito A.A. SWITCH-technologija. Algoritmizacija i programirovanie zadach logicheskogo upravljenija. [SWITCH-technology. Algorithmic and programming logic control tasks.]. Sankt-Peterburg, Nauka Publ., 1998.
9. Guzik I.M. Standart MEK 1131: jazyk GRAFCET — znakomstvo poblege [IEC 1131 standard: GRAFCET language - closer acquaintance]//Schneider Automation Club. 1999. No 6.
10. Lavrov C.C. Lekcii po teorii programirovanija. [Lectures on the theory of programming.] Tutorial. Sankt-Peterburg, Nestor Publ., 1999.

Поступила (received) 10.05.16

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic description

Питання алгоритмізації роботи технологічних систем з використанням SWITCH-технології/
О.Ю. Приходько, А.Н. Ушаков, С.Е. Слипченко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. – Х. : НТУ «ХПІ», 2016. – № 5 (1177). – С. 66–40. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-0023.

Вопросы алгоритмизации работы технологических систем с использованием SWITCH-технологии/
О.Ю. Приходько, А.Н. Ушаков, С.Е. Слипченко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – № 5 (1177). – С. 66-70. – Библиогр.: 10 назв. – ISSN 2079-0023.

Questions algorithmization of technological systems using the SWITCH-technology/O.Y. Prihodko, O.M. Ushakov, S.E. Slipchenko // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technologies in mechanical engineering. – Kharkov : NTU "KhPI", 2016. – No. 5 (1177). – P. 66-70. – Bibliogr.: 10. – ISSN 2079-0023.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Приходько Ольга Юрївна – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри технології машинобудування та металорізальних верстатів; тел.: (057)-720-66-25, e-mail: olmurakami@mail.ru;

Приходько Ольга Юрьевна – кандидат технических наук, доцент, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», доцент кафедры технологии машиностроения и металло-режущих станков; тел.: (057)-720-66-25, e-mail: olmurakami@mail.ru;

Prihodko Olga Yurievna - Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Associate Professor at the Department of engineering technology and machine tools; tel .: (057)-720-66-25, e-mail: olmurakami@mail.ru;

Ушаков Олександр Миколайович – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри технології машинобудування та металорізальних верстатів; тел.: (057)-720-66-25, e-mail: parom38@yandex.ru;

Ушаков Александр Николаевич – кандидат технических наук, доцент, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», доцент кафедры технологии машиностроения и металлорежущих станков; тел.: (057)-720-66-25, e-mail: parom38@yandex.ru;

Ushakov Oleksandr Mukolajovych - Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Associate Professor at the Department of engineering technology and machine tools; tel .: (057)-720-66-25, e-mail: parom38@yandex.ru;

Слипченко Сергій Євгенович – старший викладач Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут» ; тел.: (057)-720-66-25, e-mail: serg.slip@gmail.com;

Слипченко Сергей Евгеньевич – старший преподаватель, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»; тел.: (057)-720-66-25, e-mail: serg.slip@gmail.com;

Slipchenko Sergij Evgenovych - – National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Senior Lecturer; tel .: (057)-720-66-25, e-mail: serg.slip@gmail.com.

УДК 621

С. С. ДОБРОТВОРСКИЙ, Д. Д. САЛЕНКО, Б. А. АЛЕКСЕНКО

ОБЗОР ОБОРУДОВАНИЯ И РАСХОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ, НЕОБХОДИМЫХ ДЛЯ ОСУШЕНИЯ СЖАТОГО ВОЗДУХА ЛИБО ГАЗОВ

Рассмотрены основные вопросы, необходимые для выбора эффективного фильтра-осушителя начинающему предпринимателю для его специальных условий работы. Приведен краткий обзор оборудования, необходимого для осушения воздуха, принцип его работы и области его применения. Также в работе были рассмотрены основные применяемые на производстве для осушения сжатого воздуха или газов адсорбенты, а также типы гранул, в виде которых они применяются.

Ключові слова: фільтр-осушувач, адсорбція, адсорбенти, цеоліти, компресор, точка роси, фільтрація, стиснене повітря.

Рассмотрены основные вопросы, необходимые для выбора эффективного фильтра-осушителя начинающему предпринимателю для его специальных условий работы. Приведен краткий обзор оборудования, необходимого для осушения воздуха, принцип его работы и области его применения. Также в работе были рассмотрены основные применяемые на производстве для осушения сжатого воздуха или газов адсорбенты, а также типы гранул, в виде которых они применяются.

Ключевые слова: фильтр-осушитель, адсорбция, адсорбенты, цеолиты, компрессор, точка росы, фильтрация, сжатый воздух.

The basic questions necessary to select effective filter drier beginning entrepreneur to his special work conditions. A brief overview of the equipment needed for dehumidification, how it works and its use. Also we considered in the main used for dewatering in the production of compressed air or gas adsorbents and the types of granules as they are used.

Keywords: filter drier, adsorption, adsorbents, zeolites, compressor, pressure dew point, filtration, compressed air.

Введение.

На современном этапе развития предприятий и технологий - достаточно остро стоит вопрос о качестве очистки воздуха на производстве в целом и в каждом цехе отдельно, и об очистке некоторых газов, используемых в производственных процессах в частности. Игнорирование влажности используемых газов и сжатого воздуха негативно сказывается на качестве работы, качестве изготавливаемых изделий, износоустойчивости и коррозионной устойчивости пневматического оборудования.

Актуальность статьи заключается в том, чтобы помочь предпринимателю выбрать требующийся для его сферы деятельности инвентарь в осушении газа.

Выбор фильтров для осушения сжатого воздуха либо газа.

Известно, что конденсат плохо влияет на пневматические, стальные элементы систем, вызывает коррозию. Крупные скопления конденсата достаточно легко отделить, применив сепараторы, но для отделения водяного пара необходимо использовать осушители.

В большинстве случаев промышленного применения достаточно осушить воздух лишь до того момента, когда водяной пар не будет вызывать коррозии стальных элементов пневмосистемы. С этой задачей успешно справляются осушители холодильного типа.

Осушители холодильного типа.

Принцип действия осушителя холодильного типа: сжатый воздух либо газ поступает в камеру и охлаждается до температуры требуемой точки росы, далее отложившийся на стенках камеры конденсат сливается конденсатоотводчиком, затем воздух нагревается до требуемой температуры.

Во многих конструкциях осушителей поступающий воздух сначала проходит через пластинчатый теплообменник, где охлаждается выходящим из камеры воздухом. После воздух доохлаждается до точки

росы теплообменником, охлаждаемым фреоновым контуром. Для более высокого отделения конденсата от воздуха в камере устанавливают сопротивления потоку в виде металлических сеток. Далее воздух проходит через первый теплообменник, но уже с другой стороны, где нагревается поступающим воздухом. Такой двойной способ охлаждения позволяет втрое уменьшать требуемую холодильную мощность фреонового контура.

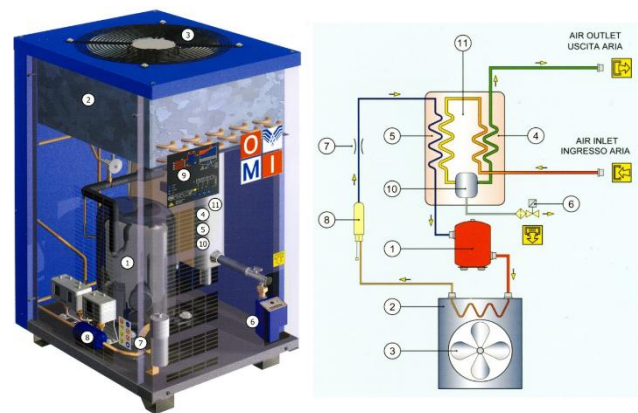


Рис. 1 – Устройство фильтра-осушителя холодильного типа: 1 - компрессор; 2 – конденсатор; 3 - вентилятор охлаждения; 4 - предварительный охладитель «воздух-воздух»; 5 - испаритель; 6 - автоматический клапан слива конденсата; 7 - капиллярная трубка; 8 – дегидратор; 9 - микропроцессорный блок управления; 10 - сепаратор конденсата; 11 - теплообменник комбинированный

Мощность осушителей влияет на их конструкцию. Так, обычно осушители производительностью от нескольких кубов до нескольких десятков кубов воздуха в минуту имеют электронный конденсатоотводчик и полноценный фреоновый контур с терморегулирующим вентилем, клапаном перепуска горячего газа, прессостатами и прочими комплектующими, что

обеспечивает точное удержание точки росы. Более мелкие осушители с целью снижения себестоимости имеют лишь термодатчик, выключающий компрессор по достижении предельно низкой точки росы +1 градус Цельсия.

Более крупные осушители в качестве опции могут иметь водяное охлаждение конденсатора, а также строятся по модульному принципу - камеры конденсации ставятся параллельно друг другу.

Осушители адсорбционного типа.

Адсорбционные осушители применяются в ситуациях, где наличие влаги недопустимо – системы подачи сжатого воздуха, подверженные промерзанию в зимнее время, специальные производственные процессы, химическое, фармацевтическое и лабораторное оборудование.

В зависимости от температуры в помещении, в котором находится осушительная система применяют адсорбционные осушители с точками росы 20°C, -40°C и -70°C.



Рис. 2 – Схема работы фильтров-осушителей сжатого воздуха адсорбционного типа

Принцип действия осушителя адсорбционного типа: есть 2а баллона, в которых поочередно происходит процесс осушения сжатого воздуха и регенерации адсорбента. Через баллон, в котором в данный момент происходит осушение пропускается газовый поток. Влага поглощается поверхностным слоем адсорбента, обычно в качестве которого используется активированный алюминий, силикагели и(или) цеолиты. После прохождения адсорбента газ либо сжатый воздух является очищенным. Процесс регенерации проходящих во 2м баллоне протекает продуванием адсорбента сухим (уже очищенным от влаги в первом баллоне воздухом), но в меньшем объеме, чем это было получено в 1м баллоне и(или) прокаливанием баллона с адсорбентом при определенной, высокой температуре. Адсорбенты чувствительны к загрязняющим элементам, поступающим с воздухом из компрессора, поэтому перед адсорбционным осушителем обязательно устанавливаются фильтры грубой и чистой очистки. После осушителя также стоит поста-

вить фильтр грубой очистки, чтобы частички адсорбента не попадали в осушенный воздух.

Осушители сжатого воздуха адсорбционного типа с горячей регенерацией

В адсорбционных осушителях с горячей регенерацией восстановление свойств адсорбента происходит под действием горячего воздуха, который проходит через адсорбент. Высокая температура регенерации разрывает адгезивные связи и высвобождает влагу из адсорбента, которая поглощается горячим воздухом и выводится в атмосферу.

Применяют следующие схемы горячей регенерации:

-Горячая внутренняя регенерация: используют нагревательные элементы внутри адсорбера. Воздух для регенерации подается из второй колонны. Потери сжатого воздуха составляют ~ 5 %.

-Горячая внешняя регенерация: для регенерации используется атмосферный воздух, подаваемый в адсорбер через внешние нагревательные элементы с помощью воздуходувки. Потери сжатого воздуха возможны на этапе охлаждения адсорбента и составляют ~ 2-2,5 %.

-Тепло от компрессора (НОС – heat of compressor): горячий сжатый воздух подается от безмасляного компрессора. Потери сжатого воздуха отсутствуют.

-Горячая вакуумная регенерация: для регенерации используется атмосферный воздух, подаваемый в адсорбер через внешние нагревательные элементы с помощью вакуумного насоса. Потери сжатого воздуха отсутствуют.

Стандартный полный цикл работы адсорбционного осушителя с горячей регенерацией составляет 6-8 часов – по 3-4 часа на каждую колонну. При горячей регенерации продуктовый воздух расходуется значительно меньше, чем при холодной, а в некоторых схемах отсутствует вообще. Управление циклом регенерации может быть традиционным по времени либо по датчику точки росы. Удлинение фазы осушения в системе управления через датчики точки росы способствует экономии электроэнергии.

Осушители с горячей регенерацией имеют несколько режимов работы, среди которых режим «охлаждение адсорбента» и «безнагревный режим». При режиме «охлаждение адсорбента» на регенерацию кроме нагретого воздуха, идет часть осушенного воздуха. Такой комбинированный режим полезен при необходимости избежать всплеска температуры сжатого воздуха на выходе из осушителя (до 150°C) и низкой точки росы (до -7°C) при смене колонн, который наблюдается в стандартном режиме. В «безнагревном режиме» осушитель работает аналогично осушителю с холодной регенерацией.

Адсорбенты, применяемые для осушения воздуха.

Активный оксид алюминия, он же активированный алюминий является важнейшим адсорбентом при осушении воздуха от влаги по причинам того, что имеет стойкость к влаге и обеспечивает высокую степень очистки до точки росы вплоть до -60°C.

Основными сферами применения активированного алюминия являются:

- адсорбционная осушка газов;
- адсорбционная очистка масел;
- применение в статических адсорбционных системах;
- адсорбционная очистка газов и жидкостных потоков.

Также для осушения воздуха от влаги широко применяются синтетические цеолиты NaA-Y(4A) и KA-Y(3A) по причине высоких показателей емкости по парам воды, хорошей водостойкости и малой подверженности разрушению при прокаливании.

Основные сферы их применения:

KA-Y(3A):

-осушка легкополимеризующихся углеводородных потоков, в частности осушка газов пиролиза в производстве этилена;

-концентрирование растворов спиртов;

-осушка органических жидкостей (керосин, гексан, бензол, циклогексан, метанол, этанол, изопропанол и так далее).

NaA-Y(4A):

-осушка природного и нефтяного попутного газов;

-осушка технологического воздуха и воздуха для КИПиА;

-осушка газа риформинга и крекинга;

-осушка и регенерация трансформаторного масла;

-осушка и регенерация фреономасляных агентов холодильных установок;

-в качестве фильтра для осушки и регенерации моторных масел, дизельного и бензинового топлива;

-очистка гальванических стоков машиностроительных производств.

Основные типы гранул синтетических цеолитов.

Всего основных типов гранул синтетических цеолитов, используемых у нас есть 4е: шар, цилиндр, трилистник и квадролоб.

Особенности типовых форм гранул:

1. Сферические гранулы (шар):

- удобство загрузки и выгрузки из адсорбера;
- излишняя подвижность слоя и как следствие высокая истираемость гранул;
- высокое удельное давление гранул друг на друга в точках соприкосновения.

2. Экструдаты (цилиндр, трилистник, квадролоб):

- минимальная подвижность адсорбционного слоя;
- возможность применения технологии равномерной загрузки;
- меньшее давление гранул друг на друга при контакте по образующей;

2.1. Для гранул типа трилистник и квадролоб:

- большая доступность внутреннего объема, высокий предел насыщаемости гранул;
- диффузия углеводородов через слой адсорбента протекает легче, перепад давления не увеличивается;

- динамическая емкость по извлекаемым компонентам (H₂O, H₂S и др.) выше на 15% чем других типов гранул.

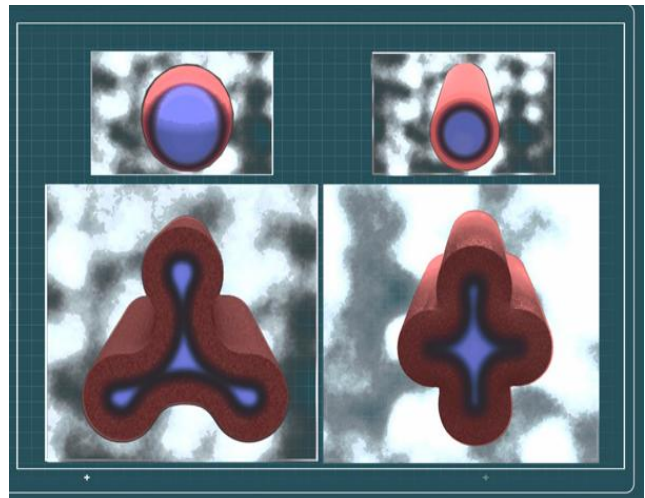


Рис. 3 - Предел насыщаемости для разных типов гранул цеолитов

Выводы.

Предприниматель, выбирая для своей работы требуемый для него фильтр-осушитель должен главным образом понимать для чего именно ему нужно осушать газ либо сжатый воздух. В случае если задачей является сохранность оборудования от коррозии, то правильней будет выбрать фильтр-осушитель холодильного типа по причине того, что он дешевле, а также он дешевле и проще в эксплуатации. Фильтры-осушители адсорбционного типа следует брать в случаях, когда наличие конденсата в системе не допустимо, по той причине, что они много эффективней холодильных осушителей.

Выбор наполнителя адсорбционных фильтров зависит от среды осушения, а выбор форм гранул зависит от конструкции фильтра-осушителя и длины рабочего цикла.

Список литературы

1. УКРСМАРТИНЖИНИРИНГ: осушение. – Режим доступа: <http://uaengineering.com.ua/draining.html>. – Дата обращения: 15 мая 2016.
2. Данферм Эйр Хендлин: способы осушения воздуха. – Режим доступа: <http://www.dantherm.com.ua/allinfo1.html>. – Дата обращения 15 мая 2016.
3. Рутектор: осушители сжатого воздуха. – Режим доступа: <http://www.rutector.ru/catalog/osushiteli-szhatogo-vozdukha-i-filtry>. – Дата обращения: 15 мая 2016.
4. Рутектор: осушители сжатого воздуха холодильного типа. – Режим доступа: <http://www.rutector.ru/catalog/osushiteli-szhatogo-vozdukha>. – Дата обращения: 15 мая 2016.
5. Рутектор: осушители сжатого воздуха адсорбционного типа. – Режим доступа: <http://www.rutector.ru/catalog/osushiteli-szhatogo-vozdukha-adsorbtsionnogo-tipa>. – Дата обращения: 15 мая 2016.
6. КНТ групп: о цеолитах. – Режим доступа: http://www.kntgroup.ru/ru/information/about_zeolites. – Дата обращения: 15 мая 2016.
7. КНТ групп: виды и структура цеолитов. – Режим доступа: http://www.kntgroup.ru/ru/information/types_and_structure. – Дата обращения: 15 мая 2016.

8. КНТ групп: основные типы гранул синтетических цеолитов. – Режим доступа: <http://new.kntgroup.ru/ru/information/osnovnyie-tipyi-granul-sinteticheskix-czeolitov>. – Дата обращения: 15 мая 2016.
9. КНТ групп: область применения цеолитов. – Режим доступа: http://www.kntgroup.ru/ru/information/sphere_of_application. – Дата обращения: 15 мая 2016.
10. КНТ групп: синтетический цеолит КА-У-3А. – Режим доступа: http://kntgroup.ru/ru/production/adsorbentyi/molecular_sieve_3a. – Дата обращения: 15 мая 2016.
11. КНТ групп: синтетический цеолит NaA-У-4А. – Режим доступа: <http://www.kntgroup.ru/ru/production/adsorbentyi/naa-y>. – Дата обращения: 15 мая 2016.
12. Техноинфа.ру: технология переработки нефти и газа, часть 2. – Режим доступа: <http://www.tehnoinfra.ru/pererabotkinefti/20.html>. – Дата обращения: 15 мая 2016.
5. Rutector: compressed air drainers adsorption type. – Available at: <http://www.rutector.ru/catalog/osushiteli-szhatogo-vozdukha-adsorbtsionnogo-tipa>. (accessed 15.05.2016)
6. KNTgroup: about zeolites. – Available at: http://www.kntgroup.ru/ru/information/about_zeolites. (accessed 15.05.2016)
7. KNTgroup: types and structure of zeolites. – Available at: http://www.kntgroup.ru/ru/information/types_and_structure. (accessed 15.05.2016)
8. KNTgroup: main types of synthetic zeolite pellets. – Available at: <http://new.kntgroup.ru/ru/information/osnovnyie-tipyi-granul-sinteticheskix-czeolitov>. (accessed 15.05.2016)
9. KNTgroup: application area of zeolites. – Available at: http://www.kntgroup.ru/ru/information/sphere_of_application. (accessed 15.05.2016)
10. KNTgroup: synthetic zeolite KA-Y-3A. – Available at: http://kntgroup.ru/ru/production/adsorbentyi/molecular_sieve_3a. (accessed 15.05.2016)
11. KNTgroup: synthetic zeolite NaA-Y-4A. – Available at: <http://www.kntgroup.ru/ru/production/adsorbentyi/naa-y>. (accessed 15.05.2016)
12. Tehnoinfra.ru: technology for processing oil and gas, part 2. Available at: <http://www.tehnoinfra.ru/pererabotkinefti/20.html>. (accessed 15.05.2016)

References (transliterated)

1. UKRSMARTENGINEERING: draining. – Available at: <http://uaengineering.com.ua/draining.html>. (accessed 15.05.2016)
2. Dantherm Air Handling: ways of air draining. – Available at: <http://www.dantherm.com.ua/allinfo1.html>. (accessed 15.05.2016)
3. Rutector: compressed air drainers. – Available at: <http://www.rutector.ru/catalog/osushiteli-szhatogo-vozdukha-i-filtry>. (accessed 15.05.2016)
4. Rutector: compressed air drainers-refrigerants. – Available at: <http://www.rutector.ru/catalog/osushiteli-szhatogo-vozdukha>. (accessed 15.05.2016)

Поступила (received) 14.05.2016

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic description

Огляд обладнання і витратних матеріалів необхідних для осушення стисненого повітря або газів / С.С. Добротворський, Д.Д. Саленко, Б.О. Алексенко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. – Х.: НТУ «ХПІ», 2016. – № 5 (1177). – С. 71–74. – Бібліогр.: 12 назв. – ISSN 2079-0023.

Обзор оборудования и расходных материалов, необходимых для осушения сжатого воздуха либо газов / С.С. Добротворский, Д.Д. Саленко, Б.А. Алексенко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – № 5 (1177). – С. 71-74. – Библиогр.: 12 назв. – ISSN 2079-0023.

Review of equipment and supplies required for dry air or gas/ S.S. Dobrotvorsky, D.D. Salenko, B.A. Alexsenko // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technologies in mechanical engineering. – Kharkov: NTU "KhPI", 2016. – No. 5 (1177). – P. 71-74. – Bibliogr.: 12. – ISSN 2079-0023.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Добротворський Сергій Семенович – доктор технічних наук, професор кафедри металорізання та металоріжучих верстатів; тел.: (011) 847-83-70; e-mail: sdobro@mail.ru;

Добротворський Сергій Семенович – доктор технических наук, профессор кафедры металорезания и металлорежущих станков; тел.: (011) 847-83-70; e-mail: sdobro@mail.ru;

Dobrotvorskiy Sergey Semenovych – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Full Professor at the Department of Metal Cutting and Metal Cutting Machines; tel.: (011) 847-83-70; e-mail: sdobro@mail.ru;

Саленко Дмитро Дмитрович – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», студент; тел.: (063) 891-13-19; e-mail: lol06@mail.ru

Саленко Дмитрій Дмитрієвич – Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», студент; тел.: (063) 891-13-19; e-mail: lol06@mail.ru

Salenko Dmītriy Dmitrievych – National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", student; tel.: (063) 891-13-19; e-mail: lol06@mail.ru

Алексенко Борис Олександрович - аспірант НТУ «ХПІ» тел.: (057) -720-66-25 e-mail: commerage@list.ru;

Алексенко Борис Олександрович – аспирант НТУ «ХПІ» тел.: (057)-720-66-25 e-mail: commerage@list.ru;

Alexsenko Borys Aleksandrovych – graduate student, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», tel.: (057)-720-66-25, e-mail: commerage@list.ru.

УДК 621.923

Ф.В. НОВИКОВ, В.И. ПОЛЯНСКИЙ**УСЛОВИЯ УМЕНЬШЕНИЯ УДЕЛЬНОЙ РАБОТЫ ПРОЦЕССА МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ РЕЗАНИЕМ**

Проведено аналіз питомої роботи (енергоємності обробки) процесів механічної обробки різанням і встановлені умови її зменшення. Показано, що умови зменшення енергоємності обробки узгоджуються з умовами зменшення витрат на обробку, пов'язаних із заробітною платою робітника-верстатника, витратою ріжучих інструментів і електроенергії. Цим доведено можливість оцінки ефективності застосування процесів механічної обробки різанням на основі аналізу енергоємності обробки, не вдаючись до економічних методів оцінки. Це дозволяє виконувати вибір раціональних процесів механічної обробки різанням з використанням технічних параметрів, таких як енергоємність обробки і робота різання

Ключові слова: механічна обробка різанням, питома робота, енергоємність обробки, витрати на обробку, ріжучі інструменти, електроенергія.

Проведен анализ удельной работы (энергоёмкости обработки) процессов механической обработки резанием и установлены условия ее уменьшения. Показано, что условия уменьшения энергоёмкости обработки согласуются с условиями уменьшения затрат на обработку, связанных с заработной платой рабочего-станочника, расходом режущих инструментов и электроэнергии. Этим доказана возможность оценки эффективности применения процессов механической обработки резанием на основе анализа энергоёмкости обработки, не прибегая к экономическим методам оценки. Это позволяет производить выбор рациональных процессов механической обработки резанием с использованием технических параметров, таких как энергоёмкость обработки и работа резания.

Ключевые слова: механическая обработка резанием, удельная работа, энергоёмкость обработки, затраты на обработку, режущие инструменты, электроэнергия.

The analysis of the specific work (processing energy intensity) of machining processes and cutting conditions are set to decrease it. It is shown that the conditions of reducing energy intensity of treatment are consistent with the terms of reducing the cost of processing non-wage worker, machine operator, cutting tools and consumption of electricity. This proves the ability to assess the effectiveness of processes machining based on the analysis of processing power intensity without resorting to economic valuation methods. This allows the rational selection of cutting machining processes using the technical parameters, such as processing and power consumption of the cutting operation.

Keywords: machining, specific work, the energy intensity of processing, the processing costs, cutting tools, power.

Постановка проблеми. Создание конкурентоспособной машиностроительной продукции требует обеспечения высоких показателей производительности и качества на операциях металлообработки. Это достигается применением технологических процессов механической обработки резанием, которые характеризуются относительно низкой удельной работой (энергоёмкостью обработки), в результате чего снижаются силы и температура резания. К таким технологическим процессам следует отнести лезвийную обработку, которая, как известно, является менее энергоёмкой по сравнению с абразивной обработкой. В свою очередь, наименее энергоёмким процессом абразивной обработки следует рассматривать прерывистое шлифование, которое обеспечивает поддержание в процессе обработки высокой режущей способности абразивного круга вследствие специфики его ударного взаимодействия с обрабатываемым материалом. В итоге резко снижаются силы и температура резания, повышаются производительность и качество обрабатываемых поверхностей. Все это указывает эффективность уменьшения удельной работы процесса механической обработки резанием и требует разработки надежных методов ее оценки.

Анализ последних исследований и публикаций. Исследованию удельной работы процессов механической обработки в научно-технической литературе уделено большое внимание [1–3]. Так, установлено, что наименьшие значения удельной работы (энергоёмкости обработки) достигаются при обработке металлов давлением (методами пластического деформирования без образования стружки). При этом

энергоёмкость обработки может во много раз быть меньше энергоёмкости процессов механической обработки резанием. Вместе с тем, исследования энергоёмкости обработки a производятся, как правило, с использованием экспериментальных методов и физических зависимостей $a = P/Q$ или $a = A/V$, где P , A – соответственно мощность и работа резания; Q – производительность обработки; V – объем снятого материала. Для более обоснованного определения энергоёмкости обработки важно располагать ее аналитическими зависимостями, что позволит теоретически определять условия ее уменьшения, обеспечивая одновременно повышение производительности и качества обрабатываемых поверхностей деталей машин.

Цель работы – проведение теоретических исследований удельной работой (энергоёмкости обработки) процессов механической обработки резанием и анализ условий ее уменьшения.

Изложение основного материала. Условия уменьшения удельной работы процесса механической обработки резанием можно установить на основе аналитической зависимости, приведенной в работе [4]:

$$a = \frac{\sigma_{сж}}{\operatorname{tg}\beta} = \frac{2\sigma_{сж}}{K_{рез}}, \quad (1)$$

где $\sigma_{сж}$ – предел прочности на сжатие обрабатываемого материала, Н/м²;

β – условный угол сдвига обрабатываемого материала (0 ... 45°);

$$K_{рез} = P_z / P_y;$$

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

Исходя из приведенной зависимости (1), удельная работа (энергии) процесса a имеет размерность Н/м², поскольку от размерности Дж/м³ с учетом размерности Дж=Н·м, несложно перейти к размерности Н/м². Следовательно, с физической точки зрения удельная работа (энергии) процесса a идентична условному напряжению резания σ , равному отношению тангенциальной составляющей силы резания P_z к площади поперечного сечения среза $S_{срез}$.

При максимальном значении условного угла сдвига обрабатываемого материала $\beta=45^\circ$ удельная работа (энергии) процесса $a = \sigma_{сж}$, что равносильно разрушению прямолинейного бруса в условиях его сжатия силой P_z . Таким образом, наименьшее значение параметра a равно пределу прочности на сжатие обрабатываемого материала $\sigma_{сж}$, а наибольшее значение параметра a , исходя из условия $\beta=0$, равно бесконечности. Следовательно, параметр a изменяется в широких (бесконечных) пределах и основным условием его уменьшения до минимального значения $a = \sigma_{сж}$ является увеличение условного угла сдвига обрабатываемого материала $\beta \rightarrow 45^\circ$.

Очевидно, с физической точки зрения условное напряжение резания σ не может превышать предельное значение $\sigma_{сж}$. В данном случае это связано с тем, что условное напряжение резания σ определяется отношением $P_z / S_{срез}$, а не отношением тангенциальной составляющей силы резания P_z к фактической площади контакта образующейся стружки с передней поверхностью инструмента, которая может многократно (до 10 раз) превышать площадь поперечного сечения среза $S_{срез}$. Поэтому противоречивое, на первый взгляд, условие $\sigma > \sigma_{сж}$ и обусловлено превышением фактической площади контакта образующейся стружки с передней поверхностью инструмента над площадью поперечного сечения среза $S_{срез}$.

Согласно формуле К. А. Зворыкина [5], угол сдвига материала β равен:

$$\beta = 45^\circ + \frac{(\gamma - \psi)}{2}, \quad (2)$$

где γ – положительный передний угол режущего инструмента;

ψ – условный угол трения обрабатываемого материала с передней поверхностью инструмента ($\text{tg} \psi = f$ – коэффициент трения).

Следовательно, увеличить угол сдвига β и соответственно уменьшить параметр a можно увеличением угла γ и уменьшением угла ψ (коэффициента

трения f). Для отрицательного переднего угла режущего инструмента γ формула К. А. Зворыкина принимает вид:

$$\beta = 45^\circ - \frac{(\gamma + \psi)}{2}. \quad (3)$$

В этом случае с увеличением отрицательного переднего угла режущего инструмента γ угол сдвига материала β уменьшается, что приводит к увеличению параметра a . Этим объясняются более высокие значения энергоемкости обработки процесса шлифования и в целом процессов абразивной обработки (которые имеют место на практике) по сравнению с процессами лезвийной обработки вследствие резания абразивными зернами, имеющими отрицательные передние углы. Применение эффективных технологических сред, способствующих уменьшению интенсивности трения в зоне резания и соответственно уменьшению угла ψ , приводит к увеличению угла сдвига материала β и уменьшению удельной работы (энергии) процесса a .

Из зависимости (1) для определения параметра a следует его уменьшение с увеличением коэффициента $K_{рез} = P_z / P_y$. Экспериментально установлено, что с уменьшением угла сдвига β уменьшается коэффициент $K_{рез} = P_z / P_y$, принимая значения меньше единицы. Это соответствует условиям абразивной обработки. При лезвийной обработке коэффициент $K_{рез} > 1$ и параметр a принимает меньшие значения, чем при абразивной обработке.

По мере износа лезвийного инструмента его фактический передний положительный угол уменьшается, что приводит к уменьшению угла сдвига материала β и увеличению параметра a . В этом случае значения удельной работы (энергии) процессов лезвийной и абразивной обработки могут быть сопоставимы, что имеет место, например, при обработке алмазно-абразивными инструментами, характеризующимися высокой остротой режущих кромок и низким коэффициентом трения.

Параметры режима резания, исходя из приведенной зависимости, в явном виде не влияют на параметр a , однако они влияют на углы γ и ψ , входящие в зависимость для определения угла сдвига материала β . Так, экспериментально установлено, что увеличение скорости резания при лезвийной обработке приводит к уменьшению интенсивности трения в зоне резания, условного угла трения ψ и соответственно к увеличению угла сдвига материала β и уменьшению удельной работы (энергии) процесса a . Это позволяет уменьшить силовую и тепловую напряженность процесса резания и повысить показатели точности и качества обрабатываемых поверхностей.

С увеличением подачи увеличивается фактический передний угол инструмента, что также способ-

ствуєт увеличению угла сдвига материала β и уменьшению удельной работы (энергии) процесса a .

При шлифовании параметр a следует рассматривать суммой двух слагаемых, обусловленных энергией «чистого резания» и энергией трения связки шлифовального круга с обрабатываемым материалом. Приведенная выше зависимость для определения параметра a получена лишь для условий «чистого резания». Поэтому уменьшить параметр a при шлифовании можно, прежде всего, за счет уменьшения или даже исключения трения связки круга с обрабатываемым материалом.

Экспериментально установлено, что энергия обработки, обусловленная трением связки круга с обрабатываемым материалом, может многократно (до 10 раз) превышать энергию «чистого резания». В связи с этим следует применять эффективные методы правки кругов, например, электроэрозионную или электрохимическую правку алмазных кругов на прочных металлических связках типа М2-01, которые фактически не поддаются обычной механической правке, осуществляемой с помощью абразивного бруска или абразивного круга. Это обеспечивает высокую режущую способность алмазного круга и высокие показатели производительности, точности и качества обработки при шлифовании [6].

Рассматривая $V = Q \cdot t$, параметр a может быть представлен в виде:

$$a = \frac{P \cdot t}{V} = \frac{P}{Q}, \quad (4)$$

где V – объем снимаемого материала, м³;
 Q – производительность обработки, м³/с;
 P – мощность резания, Вт;
 t – время обработки, с.

Следовательно, для заданной мощности резания P , определяемой, например мощностью металлорежущего станка, увеличить производительность обработки Q можно исключительно уменьшением параметра a за счет применения менее энергоемких способов обработки [7; 8].

Затраты на обработку, связанные с заработной платой рабочего-станочника, выражаются:

$$Z = N \cdot t_0 \cdot S_1 \cdot k, \quad (5)$$

где N – количество обрабатываемых деталей;
 t_0 – основное технологическое время обработки, мин;
 S_1 – тарифная ставка рабочего, грн/мин;
 k – коэффициент, учитывающий всевозможные начисления на тарифную ставку рабочего.

Представляя $N \cdot t_0 = V_{\Sigma} / Q$, получено:

$$Z = \frac{V_{\Sigma} \cdot S_1 \cdot k}{Q}, \quad (6)$$

где V_{Σ} – объем материала, снимаемого с N деталей, м³.

Как видно, затраты на обработку Z вполне однозначно определяются производительностью обработки Q : чем больше Q , тем меньше Z .

Выражая $Q = P / a$, имеем:

$$Z = \frac{V_{\Sigma} \cdot S_1 \cdot k \cdot a}{P} = \frac{S_1 \cdot k \cdot A}{P}, \quad (7)$$

где $A = a \cdot V_{\Sigma}$ – работа резания, Дж.

Для заданных значений V_{Σ} и P , уменьшить затраты на обработку Z можно за счет уменьшения параметра a или работы резания A . Поэтому процессы лезвийной обработки, которые характеризуются меньшими значениями параметров a и A по сравнению с процессом шлифования, требуют и меньших затрат для их практической реализации [7; 8].

Из зависимости (7) также следует, что с увеличением мощности станка P затраты на обработку Z уменьшаются, т.е. целесообразно обработку производить на металлорежущих станках повышенной мощности.

Зависимость для определения суммы двух статей затрат на обработку, связанных с заработной платой рабочего-станочника и расходом режущих инструментов, принимает вид:

$$Z = N \cdot t_0 \cdot S_1 \cdot k + N_0 \cdot C, \quad (8)$$

где $N_0 = N / n$ – количество потребляемых режущих инструментов;

$n = T / t_0$ – количество деталей, обработанных

одним инструментом;

T – стойкость режущего инструмента, мин;

C – цена режущего инструмента, грн;

С учетом зависимости для определения стойкости режущего инструмента $T = \frac{C_4}{V_{рез}^{m_1} \cdot t^q \cdot S^p}$ [5] и за-

висимости $N \cdot t_0 = V_{\Sigma} / Q$, затраты на обработку Z описываются:

$$Z = \frac{V_{\Sigma} \cdot S_1 \cdot k}{Q} + \frac{V_{\Sigma} \cdot C}{C_4} \cdot \frac{Q^{m_1-1}}{S^{m_1-p} \cdot t^{m_1-q}}, \quad (9)$$

где C_4 , m_1 , q , p – постоянные, определяются экспериментально ($m_1 > p > q$; $m_1 > 1$);

$Q = V_{рез} \cdot t \cdot S$ – производительность обработки

при продольном точении, м³/мин;

$V_{рез}$ – скорость резания, м/мин;

t – глубина резания, м;

S – подача, м/об.

Расчетами установлено, что затраты на обработку Z с изменением производительности обработки Q изменяются по экстремальной зависимости, проходя точку минимума (рис. 1) [9]. Поэтому, подчиняя функцию Z необходимому условию экстремума $Z'_Q = 0$, определены экстремальные значения произ-

водительности обработки $Q_{экрп}$, стойкости инструмента $T_{экрп}$ и минимальные затраты на обработку Z_{min} :

$$Q_{экрп} = \left[\frac{C_4}{T_{экрп}} \cdot S^{m_1-p} \cdot t^{m_1-q} \right]^{\frac{1}{m_1}}; \quad (10)$$

$$T_{экрп} = \frac{C \cdot (m_1 - 1)}{S_1 \cdot k}; \quad (11)$$

$$Z_{min} = \frac{V_{\Sigma} \cdot S_1 \cdot k}{Q_{экрп}} \cdot \left[1 + \frac{1}{(m_1 - 1)} \right]. \quad (12)$$

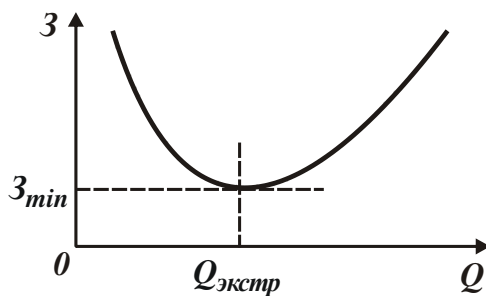


Рис. 1 – Зависимость затрат Z от производительности обработки Q

Как видно, с уменьшением $T_{экрп}$ увеличивается значение $Q_{экрп}$ и уменьшается Z_{min} , т.е. повышается эффективность механической обработки резанием. Это достигается за счет уменьшения параметра m_1 , определяющего износостойкость инструментального материала: чем меньше m_1 , тем она выше. Этим можно объяснить высокую эффективность применения новых твердосплавных инструментов с износостойкими покрытиями зарубежного производства ($1 < m_1 < 3$), которые в настоящее время широко внедряются на машиностроительных предприятиях Украины и обеспечивают повышение производительности и качества обработки при одновременном снижении себестоимости обработки.

Необходимо отметить, что для отечественных режущих инструментов, изготовленных из твердых сплавов и быстрорежущих сталей, как правило, выполняется условие $m_1 > 5$. Этим значениям параметра m_1 соответствует достаточно высокая стойкость твердосплавных режущих инструментов – на уровне 60 мин. Стойкость указанных выше новых сборных конструкций твердосплавных инструментов с износостойкими покрытиями зарубежного производства устанавливается меньше (в связи с меньшими значениями параметра m_1), что и предопределяет многократное повышение производительности обработки Q и снижение затрат на обработку Z .

Например, на ряде операций лезвийной обработки деталей из труднообрабатываемых материалов за счет применения новых сборных конструкций твердосплавных инструментов с износостойкими покрытиями зарубежного производства удалось в более чем 5 раз повысить производительность обработки и примерно во столько же раз снизить себестоимость обработки при обеспечении высоких требований к точности и качеству обрабатываемых поверхностей. При этом также достигнуто увеличение скорости резания, что открывает новые технологические возможности широкого применения высокоскоростного резания на современных высокооборотных станках с ЧПУ типа “обрабатывающий центр”.

Из зависимостей (10) – (12) следует, что минимальное значение Z_{min} тем меньше, чем больше экстремальное значение $Q_{экрп}$. Сравнивая полученное значение $Q_{экрп}$ с расчетным значением $Q = P/a$, можно оценить экономическую эффективность рассматриваемого процесса обработки. Если $Q_{экрп} > Q$, то, очевидно, мощности станка недостаточно для реализации минимального значения Z_{min} . Если $Q_{экрп} < Q$, то, наоборот, в процессе обработки недоиспользуется мощность станка.

При условии $Q_{экрп} = Q$ зависимость (12) для определения минимального значения Z_{min} принимает вид:

$$\begin{aligned} Z_{min} &= \frac{V_{\Sigma} \cdot S_1 \cdot k \cdot a}{P} \cdot \left[1 + \frac{1}{(m_1 - 1)} \right] = \\ &= \frac{S_1 \cdot k \cdot a \cdot A}{P} \cdot \left[1 + \frac{1}{(m_1 - 1)} \right]. \end{aligned} \quad (13)$$

В итоге получена зависимость, аналогичная зависимости (7) для определения затрат на обработку по заработной плате рабочего-станочника без учета статьи затрат на инструменты.

Из зависимости (13) следует, что чем меньше параметр a для заданного значения мощности резания P , или работа резания A тем меньше Z_{min} . Следовательно, и в данном случае удельная работа (энергии) процесса a и работа резания A определяют условия уменьшения затрат на обработку и увеличения производительности обработки.

Условие $Q_{экрп} = Q$ можно использовать для определения оптимальных параметров режима резания, характеристик инструментов и других технико-экономических показателей обработки.

Зависимость для определения суммы двух статей затрат на обработку, связанных с заработной платой рабочего-станочника и расходом электроэнергии, описывается:

$$Z = N \cdot t_0 \cdot S_1 \cdot k + N \cdot A \cdot S_{элект}, \quad (14)$$

где $S_{\text{элект}}$ – стоимость единицы электроэнергии, грн./Дж.

С учетом $A = P \cdot t_0$ зависимость (14) изменится:

$$Z = N \cdot A \cdot \left(\frac{S_1 \cdot k}{P} + S_{\text{элект}} \right) = V_{\Sigma} \cdot a \cdot \left(\frac{S_1 \cdot k}{P} + S_{\text{элект}} \right). \quad (15)$$

Как видно, затраты на обработку Z однозначно определяются работой резания A или удельной работой (энергии) процесса a . Чем меньше эти параметры, тем меньше затраты на обработку Z . Поэтому параметры A и a можно самостоятельно использовать для оценки эффективности механической обработки резанием, не прибегая к экономическим методам оценки. Это позволит производить выбор оптимальных параметров обработки, а также сравнение и выбор технологических способов обработки, выполняя по сути структурно параметрический анализ и синтез технологических процессов, обеспечивая направленный выбор оптимальных вариантов технологических маршрутов и параметров технологических операций.

Зависимость (15) можно представить в следующем виде:

$$Z = N \cdot A \cdot t_0 \cdot \left(\frac{S_1 \cdot k}{A} + \frac{S_{\text{элект}}}{t_0} \right). \quad (16)$$

Произведение параметров $A \cdot t_0$ определяет энергетический критерий «действие технологической системы» $D = A \cdot t_0$ [10], который предложено использовать в качестве основного параметра для выбора метода обработки поверхностей. Однако, наряду с этим параметром, в знаменатели двух слагаемых зависимости (16) входят самостоятельно параметры A и t_0 . Поэтому критерий D не может однозначно определять затраты на обработку Z и следовательно не может быть использован в качестве основного параметра для выбора метода обработки поверхностей. Основными параметрами необходимо рассматривать A и a , которые вполне однозначно определяют затраты на обработку Z и которые можно также, как и параметр Z самостоятельно использовать для оценки экономической эффективности различных способов обработки.

Выводы.

Приведены аналитические зависимости для определения удельной работы (энергоёмкости обработки) процессов механической обработки резанием и установлены условия ее уменьшения. Показано, что уменьшение энергоёмкости обработки согласуется с условиями уменьшения затрат на обработку, связанных с заработной платой рабочего-станочника, расходом режущих инструментов и электроэнергии. Этим доказана возможность оценки эффективности применения процессов механической обработки резанием

на основе анализа энергоёмкости обработки, не прибегая к экономическим методам оценки. Это позволяет производить выбор рациональных процессов механической обработки резанием с использованием технических параметров, таких как энергоёмкость обработки и работа резания.

Список литературы

1. Маталин А.А. Технология машиностроения: учебник / А.А. Маталин. – Л.: Машиностроение, 1985. – 496 с.
2. Гусарев В. С. Технологическая энергоэкономика / В. С. Гусарев // Вісник Інженерної Академії України. – Київ, 2001. – Вип. 3 (частина 1). – С. 174–176.
3. Гусарев В. С. Энергетическая эффективность технологических процессов / В. С. Гусарев // Авиационно-космическая техника и технология: Труды Государственного аэрокосмического университета им. Н. Е. Жуковского «ХАИ». – Харьков: ГАУ им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», 2000. – Вып. 14. – С. 41–44.
4. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения / Под общ. ред. Ф.В. Новикова и А.В. Якимова. В десяти томах. – Одесса: ОНПУ, 2002. – Т. 1. «Механика резания материалов». – 580 с.
5. Бобров В.Ф. Основы теории резания металлов / В.Ф. Бобров. – М.: Машиностроение, 1975. – 343 с.
6. Новіков Ф. В. Високопродуктивне алмазне шліфування: монографія / Ф. В. Новіков. – Х.: Вид. ХНЕУ, 2014. – 412 с.
7. Кремнев Г. П. Системы технологий: учебное пособие / Г. П. Кремнев, Ф. В. Новиков, В. М. Колесник. – Днепропетровск: ЛИРА, 2015. – 140 с.
8. Технология обработки типовых деталей: учебное пособие / Г.П. Кремнев, В.М. Колесник, Ф.В. Новиков и др. – Харьков: Изд-во «С.А.М.», 2014. – 156 с.
9. Жовтобрюх В.А. Повышение эффективности механической обработки деталей гидравлических систем путем выбора рациональных параметров операций по критерию себестоимости: автореф. дисс. ... канд. техн. наук: спец. 05.02.08 «Технология машиностроения» / В.А. Жовтобрюх. – Мариуполь, 2012. – 21 с.
10. Яровой Ю. В. Применение принципа наименьшего действия для выбора варианта технологического процесса / Ю. В. Яровой // Физические и компьютерные технологии : Труды 14-й Междунар. научн.-техн. конф. (Харьков, 24–25 сентября 2008 г.). – Х.: ХНПК «ФЭД», 2008. – С. 181–182.

References (transliterated)

1. Matalin A. A. *Tekhnologiya mashinostroeniya: uchebnik* [Manufacturing engineering: a textbook] Leningrad, Mashinostroenie, 1985, 496 p.
2. Gysarev V. S. *Tekhnologicheskaya tsergoekonomika* [Technology Energy Economics] *Visnyk Inzhenerney Akademiy Ukrainy*. Kyiv, 2001. Issue. 3 (path 1). pp. 174–176.
3. Gysarev V.S. *Energeticheskaya effektivnost tekhnologicheskikh protsessov* [The energy efficiency of technological processes] *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya: Trudy Gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta im. N. E. Zhukovskogo «KHAИ»*. Kharkov, 2000, Issue. 14, pp. 41–44.
4. Novikova F.V., Yakimova A.V. *Fiziko-matematicheskaya teoriya protsessov obrabotki materialov i tekhnologii mashinostroeniya* [Physical and mathematical theory of processing materials and manufacturing engineering] Odessa: ONPU, 2002. Vol. 1. "Mekhanika rezaniya materialov". 580 p
5. Bobrov V. F. *Osnovy teorii rezaniya metallov* [Fundamentals of metal cutting theory] Moscow, Mashinostroenie, 1975, 343 p.
6. Novikov F. V. *Vysokoproduktivnye almaznye shlifuyannya: monografiya* [High-performance diamond polishing: monograph]. Kharkov, Vyd. KhNEU, 2014, 412 p.
7. Kremnev G. P., Novikov F. V., Kolesnik V. M. *Sistemy tekhnologii: uchebnoye posobie* [technology systems: a tutorial] Dnepropetrovsk, LIRA, 2015, 140 p.
8. Kremnev G. P., Kolesnik V. M., Novikov F. V. i dr. *Tekhnologiya obrabotki tipovykh detaley: uchebnoye posobie* [Technology processing standard parts: a tutorial] Kharkov, Izd-vo "S.A.M.", 2014, 156 p.

9. Zhovtobriurh V. A. Povyshenie tseffektivnosti mekhanicheskoy obrabotki detaley gidravlicheskiykh sistem putem vybora ratsionalnykh parametrov operatsiy po kriteriyu sebestoimosti: avtoref. diss. ... kand. tekhn. nauk: spets. 05.02.08 "Tekhnologiya mashinostroeniya" [Improving the efficiency of the mechanical machining of a workpiece-lei hydraulic systems by selecting rational parameters of operations on the criterion of cost. Abstract of a thesis dr. eng. sci. diss. 05.02.08 "Mechanical Engineering"] Mariupol, 2012. 21 p.
10. Yarovoy Yu. V. Primenenie printsipa naimenshego deystviya dlya vybora varianta tekhnologicheskogo protsessa [Application of the principle of least action to select the option process] *Fizicheskie i kompiuternye tekhnologii: Trudy 14-oy Mezhdunar. nauchn.-tekhn. konf.* (Kharkov, 24–25 sentyabrya 2008). Kharkov: KhNPK "FED", 2008, pp. 181–182.

Поступила (received) 20.05.2016

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic description

Умови зменшення питомої роботи процесу механічної обробки різанням / Ф. В. Новіков, В. І. Полянський // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. – Х.: НТУ «ХПІ», 2016. – № 5 (1177). – С. 75–80. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-0023.

Условия уменьшения удельной работы процесса механической обработки резанием / Ф. В. Новиков, В. И. Полянский // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – № 5 (1177). – С. 75-80. – Библиогр.: 10 назв. – ISSN 2079-0023.

Terms reduce specific work machining process cutting / F. V. Novikov, V. I. Polyanskiy // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technologies in mechanical engineering. – Kharkov : NTU "KhPI", 2016. – No. 5 (1177). – P. 75-80. – Bibliogr.: 10. – ISSN 2079-0023.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Новіков Федір Васильович – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри «Природничі науки та технології» Харківського національного економічного університету імені Семена Кузнеця, м. Харків; тел.: (0572) 69-55-62; e-mail: fokusnic1@rambler.ru .

Новиков Федор Васильевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Естественные науки и технологии» Харьковского национального экономического университета имени Семена Кузнеця, г. Харьков; тел.: (0572) 69-55-62; e-mail: fokusnic1@rambler.ru .

Novikov Fedor Vasiliviyth – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Head of Department of "Science and Technology" Kharkiv National Economic University named after Semen Kuznets, Kharkiv; tel.: (0572) 69-55-62; e-mail: fokusnic1@rambler.ru .

Полянський Володимир Іванович – кандидат технічних наук, Генеральний директор, ТОВ «Імперія металів», м. Харків; тел.: +38-067-57-80-906; e-mail: tools@imperija.com .

Полянский Владимир Иванович – кандидат технических наук, Генеральный директор, ООО «Империя металлов», г. Харьков; тел.: +38-067-57-80-906; e-mail: tools@imperija.com .

Polyansky Vladimir Ivanovich - Candidate of Technical Sciences, General Director of LLC "Empire Metals", Kharkov; tel .: +38-067-57-80-906; e-mail: tools@imperija.com .

УДК 621.923

Ф.В. НОВИКОВ, О. С. КЛЕНОВ**ОПРЕДЕЛЕНИЕ СИЛ РЕЗАНИЯ, ДЕЙСТВУЮЩИХ НА ПЕРЕДНЕЙ И ЗАДНЕЙ ПОВЕРХНОСТЯХ РЕЗЦА**

Запропоновано новий теоретичний підхід до визначення сил різання, що діють на задній і передній поверхнях різця, з позиції окремого урахування процесів різання і тертя. Це дозволило виконати їх розрахунок на основі експериментально встановлених значень тангенціальної та радіальної складових сили різання і науково обґрунтовано підійти до визначення умов зменшення частки енергії тертя в загальному енергетичному балансі процесу різання. Наведено приклад розрахунку сил різання, що діють на задній і передній поверхнях різця при точінні, і показано, що частка енергії тертя в загальному енергетичному балансі процесу різання на задній поверхні різця при передньому куті різця $\gamma = 20^\circ$ порівнянна, а при $\gamma = -10^\circ$ значно більше частки енергії тертя в загальному енергетичному балансі процесу різання на передній поверхні різця. Отримані результати підтверджують достовірність запропонованого теоретичного підходу до визначення сил різання, що діють на задній і передній поверхнях різця.

Ключові слова: сила різання, різець, точіння, знос різця, задня поверхня різця, передній кут різця, тертя, енергетичний баланс.

Предложен новый теоретический подход к определению сил резания, действующих на задней и передней поверхностях резца, с позиции раздельного учета процессов резания и трения. Это позволило произвести их расчет на основе экспериментально установленных значений тангенциальной и радиальной составляющих силы резания и научно обоснованно подойти к определению условий уменьшения доли энергии трения в общем энергетическом балансе процесса резания. Приведен пример расчета сил резания, действующих на задней и передней поверхностях резца при точении, и показано, что доля энергии трения в общем энергетическом балансе процесса резания на задней поверхности резца при переднем угле резца $\gamma = 20^\circ$ сопоставима, а при $\gamma = -10^\circ$ значительно больше доли энергии трения в общем энергетическом балансе процесса резания на передней поверхности резца. Полученные результаты подтверждают достоверность предложенного теоретического подхода к определению сил резания, действующих на задней и передней поверхностях резца.

Ключевые слова: сила резания, резец, точение, износ резца, задняя поверхность резца, передний угол резца, трение, энергетический баланс.

A new theoretical approach to the determination of the cutting forces acting on the front and rear surfaces of the cutter, with the cutting position of the separate accounting processes and friction. This allowed them to settle on the basis of experimentally determined values of the tangential and radial components of the cutting forces and scientifically approach to determining the conditions of friction reduction of the share of energy in the overall energy balance of the cutting process. An example of calculating the cutting forces acting on the front and rear surfaces of the tool during turning, and it is shown that the proportion of the friction energy in the total energy balance of the process of cutting the rear surface of the cutter rake angle in cutter comparable $\gamma = 20^\circ$ and $\gamma = -10^\circ$ significantly greater proportion of energy friction in the overall energy balance cutting process on the front surface of the tool. These results confirm the accuracy of the proposed theoretical approach to the determination of the cutting forces acting on the front and rear surfaces of the cutter.

Keywords: cutting force, tool, turning, tool wear, the back surface of the tool, the tool rake angle, the friction energy balance.

Постановка проблеми. Процес точення являється одним з основних методів формоутворення поверхностей деталей машин різанням завдяки відносно низькій енергоємності обробки. Це дозволяє виробляти високопродуктивну обробку в широких діапазонах змін параметрів режиму різання, включаючи високоскоростне різання. Використання сучасних збірних твердосплавних різців з износостійкими покриттями відкрило нові можливості інтенсифікації процесу обробки і досягнення високих показателів якості оброблюваних поверхностей. Одним з обмежуючих факторів при цьому являється збільшення силової і теплової напруженості процесу різання в зв'язі з износом інструмента і утворенням на ньому площадок износу. Тому важливо кількісно оцінити сили різання, що виникають на передній і задній поверхнях різця при різанні, в залежності від ступеня його износу і обґрунтувати умови їх зменшення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідженню сил різання, що виникають в процесі точення, в науково-технічній літературі приділено надзвичайно велику увагу [1–3]. Експериментально встановлено взаємозв'язки складових сил різання з основними технологічними параметрами обробки для різних оброблюваних і інструментальних матеріалів з урахуванням геометриче-

ських параметрів різця. На їх основі отримані емпіричні залежності. Однак, в науково-технічній літературі відсутні аналітичні залежності, окремо описують сили різання, що виникають на передній і задній поверхнях різця, з урахуванням величини площадок износу, що утворюються на задній поверхності різця. Відсутність цих залежностей не дозволяє в повній мірі оцінити роль площинки износу в формуванні силової і теплової напруженості процесу різання і визначити умови, при яких можливий процес різання без погіршення якості оброблюваних поверхностей. Тому важливо встановити ці залежності.

Ціль роботи – розробка теоретичного підходу до визначення сил різання, що виникають на передній і задній поверхнях різця, з урахуванням величини площадок износу, що утворюються на задній поверхності різця.

Изложение основного материала. Тангенциальная P_z и радиальная P_y составляющие силы резания при точении, обусловленные процессами резания и точения, в общем виде могут быть описаны следующими зависимостями [4–6]:

$$P_z = P_{z_{рез}} + P_{z_{тр}}; \quad (1)$$

© Ф. В. Новиков, О. С. Кленов, 2016

$$P_y = P_{y_{рез}} + P_{y_{мп}}, \quad (2)$$

где $P_{z_{рез}}$; $P_{y_{рез}}$ – тангенциальная и радиальная составляющие силы резания, возникающие на передней поверхности резца, Н;

$P_{z_{мп}}$; $P_{y_{мп}}$ – тангенциальная и радиальная составляющие силы резания, возникающие на задней поверхности резца, вследствие трения обрабатываемого материала с площадкой износа, образующейся на задней поверхности резца, Н.

Как установлено в работе [6], отношение $P_{z_{рез}} / P_{y_{рез}} = \operatorname{ctg}(\psi - \gamma)$, где ψ – условный угол трения обрабатываемого материала с передней поверхностью резца ($\operatorname{tg}\psi = f$ – коэффициент трения); γ – положительный передний угол резца.

При условии $\gamma = 0$ отношение $P_{z_{рез}} / P_{y_{рез}} = \operatorname{ctg}\psi = 1/f$. С определенным приближением можно принять, что $P_{z_{мп}} / P_{y_{мп}} = f$. Тогда зависимости (1) и (2) выразятся:

$$P_z = P_{z_{рез}} \cdot \left(1 + \frac{P_{z_{мп}}}{P_{z_{рез}}} \right); \quad (3)$$

$$P_y = f \cdot P_{z_{рез}} + \frac{P_{z_{мп}}}{f} = P_{z_{рез}} \cdot \left(f + \frac{1}{f} \cdot \frac{P_{z_{мп}}}{P_{z_{рез}}} \right). \quad (4)$$

В результате удалось выразить составляющие силы резания P_z и P_y через отношение $P_{z_{мп}} / P_{z_{рез}}$. С его увеличением составляющие силы резания увеличиваются, что согласуется с практикой резания.

Поскольку коэффициент трения $f < 1$, и соответственно отношение $1/f$, стоящее во втором слагаемом зависимости (4), всегда больше коэффициента трения f , стоящего в первом слагаемом, то по мере увеличения отношения $P_{z_{мп}} / P_{z_{рез}}$ второе слагаемое будет существенно увеличиваться до значения первого слагаемого и более. Этим показано, что наличие отношения $1/f$, стоящего во втором слагаемом зависимости (4), предопределяет значительный рост радиальной составляющей силы резания P_y и, соответственно, повышение силовой и тепловой напряженности процесса резания, снижение качества и точности

обрабатываемых поверхностей с течением времени обработки, т.е. по мере износа резца по задней поверхности.

Очевидно, тангенциальная составляющая силы резания P_z , описываемая зависимостью (3), в значительно меньшей степени зависит от увеличения отношения $P_{z_{мп}} / P_{z_{рез}}$, чем радиальная составляющая силы резания P_y , описываемая зависимостью (4). Для оценки интенсивности изменения отношения P_z / P_y необходимо проанализировать зависимость:

$$\frac{P_z}{P_y} = \frac{\left(1 + \frac{P_{z_{мп}}}{P_{z_{рез}}} \right)}{\left(f + \frac{1}{f} \cdot \frac{P_{z_{мп}}}{P_{z_{рез}}} \right)}. \quad (5)$$

В табл. 1 приведены расчетные значения отношения P_z / P_y в зависимости от отношения $P_{z_{мп}} / P_{z_{рез}}$ для различных значений коэффициента трения f . Как видно, с увеличением отношения $P_{z_{мп}} / P_{z_{рез}}$ отношение P_z / P_y непрерывно уменьшается от значения $1/f$ (при $P_{z_{мп}} / P_{z_{рез}} = 0$) до значений, меньших единицы. Следовательно, в начальный момент обработки, когда $P_{z_{мп}} / P_{z_{рез}} = 0$, отношение $P_z / P_y = 1/f$ принимает значения, большие единицы, т.е. $P_z > P_y$. При значении $P_{z_{мп}} / P_{z_{рез}} = 0,5$ отношение P_z / P_y меньше единицы, т.е. $P_z < P_y$, а с уменьшением коэффициента трения f до значения 0,1 отношение P_z / P_y становится меньше единицы даже при меньшем значении $P_{z_{мп}} / P_{z_{рез}}$.

Чтобы определить значение отношения $P_{z_{мп}} / P_{z_{рез}}$, при котором отношение P_z / P_y становится равным единице, необходимо решить уравнение, полученное на основе зависимости (5):

$$\frac{\left(1 + \frac{P_{z_{мп}}}{P_{z_{рез}}} \right)}{\left(f + \frac{1}{f} \cdot \frac{P_{z_{мп}}}{P_{z_{рез}}} \right)} = 1. \quad (6)$$

Таблица 1 – Расчетные значения отношения P_z / P_y

$P_{z_{мп}} / P_{z_{рез}}$	0	0,125	0,25	0,5	0,75	1	2	10
P_z / P_y для $f = 0,3$	3,33	1,57	1,1	0,763	0,625	0,55	0,43	0,32
P_z / P_y для $f = 0,1$	10	0,83	0,48	0,294	0,23	0,198	0,1	0,099

В результате решения уравнения получено:

$$\frac{P_{zmp}}{P_{zрез}} = f. \quad (7)$$

Следовательно, отношение P_z/P_y принимает значение, равное единице при условии $P_{zmp}/P_{zрез} = f$, т.е. чем больше коэффициент трения f , тем больше значение $P_{zmp}/P_{zрез}$. Этим объясняются результаты расчетов, приведенные в табл. 1. Так, с увеличением коэффициента трения f (с 0,1 до 0,3) отношение $P_{zmp}/P_{zрез}$, при котором выполняется условие $P_z/P_y = 1$, увеличивается, а отношение P_z/P_y также принимает большие значения.

Полученное решение справедливо для нулевого переднего угла резца. В случае положительного переднего угла резца γ имеем [6]:

$$\frac{P_{zрез}}{P_{yрез}} = ctg(\psi - \gamma) = \frac{(1 + f \cdot tg\gamma)}{(f - tg\gamma)}. \quad (8)$$

Тогда зависимость (2) примет вид:

$$P_y = P_{zрез} \cdot \left(\frac{f - tg\gamma}{1 + f \cdot tg\gamma} + \frac{1}{f} \cdot \frac{P_{zmp}}{P_{zрез}} \right). \quad (9)$$

С увеличением переднего угла резца γ первое слагаемое в зависимости (9) уменьшается, что усиливает второе слагаемое в случае образования на задней поверхности резца площадки износа.

Отношение P_z/P_y с учетом зависимостей (1) и (9) опишется:

$$\frac{P_z}{P_y} = \frac{\left(1 + \frac{P_{zmp}}{P_{zрез}} \right)}{\left(\frac{f - tg\gamma}{1 + f \cdot tg\gamma} + \frac{1}{f} \cdot \frac{P_{zmp}}{P_{zрез}} \right)}. \quad (10)$$

Используя экспериментальные значения отношения P_z/P_y , можно рассчитать значения отношения $P_{zmp}/P_{zрез}$. Это открывает новые возможности анализа закономерностей изменения составляющих силы резания, обусловленных процессами резания и трения.

При условии $P_z/P_y = 1$ зависимость (10) принимает вид уравнения относительно неизвестной величины $P_{zmp}/P_{zрез}$:

$$\frac{\left(1 + \frac{P_{zmp}}{P_{zрез}} \right)}{\left(\frac{f - tg\gamma}{1 + f \cdot tg\gamma} + \frac{1}{f} \cdot \frac{P_{zmp}}{P_{zрез}} \right)} = 1. \quad (11)$$

Его решение:

$$\frac{P_{zmp}}{P_{zрез}} = \frac{\left(1 - \frac{f \cdot tg\gamma}{1 + f \cdot tg\gamma} \right) \cdot f}{(1 - f)}. \quad (12)$$

В табл. 2 приведены расчетные значения отношения $P_{zmp}/P_{zрез}$ в зависимости от переднего угла резца γ для $f = 0,3$. Как видно, с увеличением γ отношение $P_{zmp}/P_{zрез}$ увеличивается. Это указывает на то, что условие $P_z/P_y = 1$ выполняется при большем значении P_{zmp} по отношению к значению $P_{zрез}$. Следовательно, в этом случае величина площадки износа, образующаяся на задней поверхности резца, меньше влияет на отношение P_z/P_y , т.е. в большем диапазоне изменения $P_{zmp}/P_{zрез}$ справедливо условие $P_z > P_y$ и с меньшей силовой напряженностью осуществляется процесс резания.

Таблица 2 – Расчетные значения отношения $P_{zmp}/P_{zрез}$

γ , градус	0	10	20	30
$P_{zmp}/P_{zрез}$	0,3	0,378	0,453	0,53

Для оценки достоверности полученного теоретического решения произведен анализ изменения отношения $P_{zmp}/P_{zрез}$ на основе экспериментальных значений составляющих силы резания при точении (рис. 1 [2]). В данном случае имеет место несвободное резание, поэтому в качестве величины P_y следует рассматривать величину $\sqrt{P_y^2 + P_x^2}$.

Приведенные в табл. 3 экспериментально установленные значения отношения P_z/P_y показывают, что с уменьшением переднего угла резца γ (т.е. с переходом от положительных к отрицательным значениям γ) они уменьшаются. Следовательно, чем больше положительный передний угол резца γ , тем больше отношение P_z/P_y и выше эффективность процесса резания, т.к. меньше интенсивность трения резца с обрабатываемым материалом.

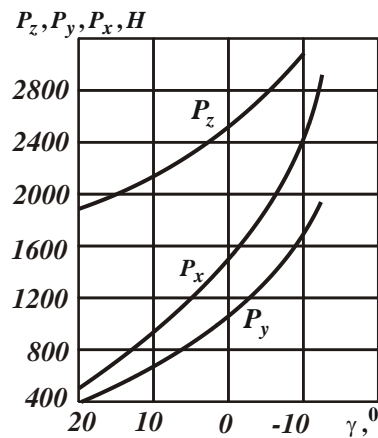


Рис. 1 – Влияние переднего угла на силы P_z, P_y, P_x при точении: сталь 40; $\varphi = 60^\circ$; $t = 4$ мм; $S = 0,285$ мм/об.; $V = 40$ м/мин [2]

Таблица 3 – Экспериментальные значения P_z, P_y и P_z/P_y

γ , градус	20	10	0	-10
P_z , Н	1850	2150	2550	3100
P_y , Н	600	1060	1740	2970
P_z/P_y	3,083	2,028	1,465	1,043

Как следует из табл. 3, при переднем угле резца $\gamma = -10^\circ$ отношение P_z/P_y практически равно единице. В общем случае установить зависимость между отношениями $P_{zmp}/P_{zрез}$ и P_z/P_y можно на основе уравнения (10), представляя его в виде:

$$\frac{P_{zmp}}{P_{zрез}} = \frac{\left[\frac{f - tg\gamma}{1 + f \cdot tg\gamma} - \frac{P_y}{P_z} \right]}{\left(\frac{P_y}{P_z} - \frac{1}{f} \right)}. \quad (13)$$

В табл. 4 приведены рассчитанные на основе зависимости (13) значения отношения $P_{zmp}/P_{zрез}$ для $f = 0,4$ с учетом экспериментальных значений P_z/P_y , полученных по данным табл. 3. Как видно, с уменьшением переднего угла резца γ они увеличиваются.

Таблица 4 – Расчетные значения $P_{zmp}/P_{zрез}$

γ , градус	20	10	0	-10
P_z/P_y	3,083	2,028	1,465	1,043
$P_{zmp}/P_{zрез}$	0,1346	0,1415	0,155	0,22

Сравнивая полученное значение $P_{zmp}/P_{zрез} = 0,155$ (для $\gamma = 0$) с аналогичными значениями, приведенными в табл. 1, видно, что оно получено при относительно небольшом износе резца по задней поверхности, т.к. в противном случае оно принимало бы весьма большие значения ($P_{zmp}/P_{zрез} = 0,5 \dots 10$). Это указывает на то, что производились непродолжительные экспериментальные исследования, в результате чего резец изнашивался незначительно и поэтому отношение $P_{zmp}/P_{zрез}$ принимает небольшое значение.

Для определения значений составляющих силы резания $P_{zрез}$ и P_{zmp} необходимо воспользоваться зависимостью (3), представляя ее в виде:

$$P_{zрез} = \frac{P_z}{\left(1 + \frac{P_{zmp}}{P_{zрез}} \right)}. \quad (14)$$

Используя значения P_{zmp} , приведенные в табл. 4, в табл. 5 приведены рассчитанные на основе зависимостей (14) и $P_{zmp} = P_z - P_{zрез}$ значения $P_{zрез}$ и P_{zmp} .

Таблица 5 – Расчетные значения $P_{zрез}, P_{zmp}$ и

$$P_{zmp}/P_z$$

γ , градус	20	10	0	-10
$P_{zрез}$, Н	1630,5	1883,5	2207,8	2541
P_{zmp} , Н	219,5	266,5	342,2	559
P_{zmp}/P_z	0,119	0,124	0,134	0,18

Как следует из табл. 5, с уменьшением переднего угла резца γ значения $P_{zрез}$ и P_{zmp} увеличиваются. Это связано с увеличением интенсивности трения в зоне резания. Однако $P_{zрез} > P_{zmp}$, т.к. производились непродолжительные экспериментальные исследования, резец изнашивался незначительно, и отношение $P_{zmp}/P_{zрез}$ принимало небольшие значения.

Отношение $P_{zmp}/(P_{zрез} + P_{zmp}) = P_{zmp}/P_z$, по физической сути определяет долю энергии трения в общем энергетическом балансе процесса резания на передней поверхности резца. Исходя из табл. 5, оно изменяется в небольших пределах 0,119...0,18, т.е. доля энергии трения составляет 11,9...18%. Очевидно, уменьшить долю энергии трения можно увеличением переднего угла резца γ .

Составляющие силы резания $P_{yрез}$ и P_{ymp} , исходя из зависимости (9), определяются:

$$P_{y_{рез}} = \left(\frac{f - tg\gamma}{1 + f \cdot tg\gamma} \right) \cdot P_{z_{рез}}; \quad (15)$$

$$P_{y_{тр}} = \frac{1}{f} \cdot P_{z_{тр}}. \quad (16)$$

В табл. 6 приведены расчетные значения $P_{y_{рез}}$ и $P_{y_{тр}}$ с учетом значений $P_{z_{рез}}$ и $P_{z_{тр}}$ из табл. 5.

Таблица 6 – Расчетные значения $P_{y_{рез}}$, $P_{y_{тр}}$,

$P_{y_{тр}} / P_{y_{рез}}$ и $P_{y_{рез}} / P_y$

γ , градус	20	10	0	-10
$P_{y_{рез}}$, Н	51,2	393,8	884,5	1572,5
$P_{y_{тр}}$, Н	548,8	663,3	855,5	1397,5
P_y , Н	600	1057,1	1740	2970
$P_{y_{тр}} / P_{y_{рез}}$	10,72	1,69	0,97	0,89
$P_{y_{рез}} / P_y$	0,085	0,373	0,508	0,53

Как следует из табл. 6, с уменьшением переднего угла реза γ значения $P_{y_{рез}}$ и $P_{y_{тр}}$ увеличиваются. При этом в диапазоне $\gamma = 20 \dots 0^\circ$ выполняется условие $P_{y_{тр}} > P_{y_{рез}}$, а при условии $\gamma < -10^\circ$, наоборот, $P_{y_{тр}} < P_{y_{рез}}$, что связано с ухудшением условий стружкообразования при резании.

Отношение $P_{y_{тр}} / P_{y_{рез}}$ с уменьшением переднего угла реза γ уменьшается, особенно интенсивно в диапазоне $\gamma = 20 \dots 0^\circ$.

С целью проверки правильности выполненных расчетов в табл. 6 приведены расчетные значения радиальной составляющей силы резания $P_y = P_{y_{рез}} + P_{y_{тр}}$. Как видно, они фактически совпадают с экспериментально установленными значениями (табл. 3). Это свидетельствует о достоверности выполненных расчетов и предложенного теоретического подхода к определению сил резания, возникающих на передней и задней поверхностях реза при точении, с учетом величины площади износа, образующейся на задней поверхности реза.

Отношение $P_{y_{рез}} / (P_{y_{рез}} + P_{y_{тр}}) = P_{y_{рез}} / P_y$, по физической сути определяет долю энергии трения в общем энергетическом балансе процесса резания на задней поверхности реза. Исходя из табл. 6, оно изменяется в широких пределах (0,085...0,53), т.е. доля энергии трения составляет 8,5...53 %. Уменьшить долю энергии трения можно увеличением переднего угла реза γ . Как видно, доля энергии трения в общем энергетическом балансе процесса резания на задней поверхности реза при переднем угле реза

$\gamma = 20^\circ$ сопоставима, а при $\gamma = -10^\circ$ значительно больше доли энергии трения в энергетическом балансе процесса резания на передней поверхности реза.

Выводы. В работе получены аналитические зависимости для определения сил резания, действующих на задней и передней поверхностях реза, с позиции раздельного учета процессов резания и трения. Это позволило произвести их расчет на основе экспериментально установленных значений тангенциальной и радиальной составляющих силы резания и научно обоснованно подойти к определению условий уменьшения доли энергии трения в общем энергетическом балансе процесса резания. Приведен пример расчета сил резания, действующих на задней и передней поверхностях реза при точении, и показано, что доля энергии трения в общем энергетическом балансе процесса резания на задней поверхности реза при переднем угле реза $\gamma = 20^\circ$ сопоставима, а при $\gamma = -10^\circ$ значительно больше доли энергии трения в общем энергетическом балансе процесса резания на передней поверхности реза. Полученные результаты подтверждают достоверность предложенного теоретического подхода к определению сил резания, действующих на задней и передней поверхностях реза.

Список литературы:

1. Грановский Г.И. Резание металлов: учебник / Г.И. Грановский, В.Г. Грановский – М.: Высшая школа, 1985. – 304 с.
2. Бобров В.Ф. Основы теории резания металлов / В.Ф. Бобров. – М.: Машиностроение, 1975. – 343 с.
3. Резание металлов / С.Н. Филоненко. – К.: Вища школа, 1969. – 260 с.
4. Алмазная обработка: учеб. пособие / А.В. Якимов, Ф.В. Новиков, Г.В. Новиков, А.А. Якимов. – К.: ИЗМН, 1996. – 168 с.
5. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения / Под общ. ред. Ф.В. Новикова и А.В. Якимова. – В десяти томах. – Одесса: ОНПУ, 2002. – Т. 1. "Механика резания материалов". – 580 с.
6. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения / Под общ. ред. Ф.В. Новикова и А.В. Якимова. – В десяти томах. – Одесса: ОНПУ, 2002. – Т. 4. "Теория абразивной и алмазно-абразивной обработки материалов". – 802 с.

References (transliterated)

1. Granovskiy G.I., Granovskiy V.G. *Rezanie metallov: uthebnik* [Metal Cutting: a textbook] Moscow, Vyschaya shkola, 1985, 304 p.
2. Bobrov V.F. *Osnovy teorii rezaniya metallov* [Fundamentals of metal cutting theory] Moscow, Mashinostroenie, 1975. 343p.
3. Filonenko S.N. *Rezanie metallov* [Cutting metals] Kiev, Vysha shkola, 1969. 260 p.
4. Yakimov A.V., Novikov F.V., Novikov G.V., Yakimov A.A. *Almaznaya obrabotka: utheb. Posobie* [Diamond Processing: Proc. benefit] Kiev, IZMN, 1996. 168 p.
5. Novikova F.V., Yakimova A.V. *Fiziko-matematicheskaya teoriya protsessov obrabotki materialov i tekhnologii mashinostroeniya* [Physical and mathematical theory of processing materials and manufacturing engineering] Odessa: ONPU, 2002. Vol. 1. "Mekhanika rezaniya materialov". 580 p
6. Novikova F.V., Yakimova A.V. *Fiziko-matematicheskaya teoriya protsessov obrabotki materialov i tekhnologii mashinostroeniya* [Physical and mathematical theory of processing materials and manufacturing engineering] Odessa: ONPU, 2002. Vol. 4. "The theory of abrasive and diamond-abrasive processing of materials". 802 p

Поступила (received) 21.05.2016

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic description

Визначення сил різання, що діють на передній та задній поверхнях різця / Ф. В. Новіков, О. С. Кленов // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. – Х.: НТУ «ХПІ», 2016. – № 5 (1177). – С. 81–86. – Бібліогр.: 6 назв. – ISSN 2079-0023.

Определение сил резания, действующих на передней и задней поверхностях резца / Ф. В. Новиков, О. С. Кленов // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – № 5 (1177). – С. 81-86. – Библиогр.: 6 назв. – ISSN 2079-0023.

Determination of cutting forces acting on the front and rear surfaces of the cutter / F. V. Novikov, O. S. Klenov // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technologies in mechanical engineering. – Kharkov: NTU "KhPI", 2016. – No. 5 (1177). – P. 81-86. – Bibliogr.: 6. – ISSN 2079-0023.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Новіков Федір Васильович – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри «Природничі науки та технології» Харківського національного економічного університету імені Семена Кузнеця, м. Харків; тел.: (0572) 69-55-62; e-mail: fokusnic1@rambler.ru.

Новиков Федор Васильевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Естественные науки и технологии» Харьковского национального экономического университета имени Семена Кузнеця, г. Харьков; тел.: (0572) 69-55-62; e-mail: fokusnic1@rambler.ru.

Novikov Fedor Vasiliviyth – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Head of Department of "Science and Technology" Kharkiv National Economic University named after Semen Kuznets, Kharkiv; tel.: (0572) 69-55-62; e-mail: fokusnic1@rambler.ru.

Кленов Олег Станіславович – кандидат технічних наук, директор, Фірма «ДіМерус Інженерінг» ТОВ, м. Харків; тел.: +38-050-34-30-822; e-mail: dimerus@dimerus.com.

Кленов Олег Станиславович – кандидат технических наук, директор, Фирма «ДиМерус Инженеринг» ООО, г. Харьков; тел.: +38-050-34-30-822; e-mail: dimerus@dimerus.com.

Klenov Oleg Stanislavovith – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), director of the firm "DiMerus Engineering" Ltd, Kharkiv; tel.: +38-050-34-30-822; e-mail: dimerus@dimerus.com.

УДК 621.923

В. Г. ШКУРУПІЙ**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПОЛИРОВАНИЯ СВОБОДНЫМ АБРАЗИВОМ**

В статті розглядається абразивний інструмент і його взаємодія з оброблюваною поверхнею в процесі полірування. Абразивний полірування являє собою механохімічний процес згладжування поверхневого шару шляхом пластичного деформування мікронерівностей, знімання окислів з оброблюваної поверхні

Ключові слова: полірування, інструмент, вільний абразив, гранула, шорсткість.

В статье рассматривается механизм взаимодействия абразивного инструмента с обрабатываемой поверхностью при полировании. Абразивное полирование представляет собой механохимический процесс сглаживания поверхностного слоя путем пластического деформирования микронеровностей, съема окислов с обрабатываемой поверхности.

Ключевые слова: полирование, инструмент, свободный абразив, гранула, шероховатость.

The article discusses the mechanism of interaction of abrasive tools with the treated surface during polishing. The abrasive polishing is a mechano-chemical process of smoothing the surface layer by plastic deformation of the microscopic irregularities, removal of oxides from the treated surface

Keywords: polished, the tool, free abrasive, grain, roughness.

Введение. На финишных операциях обработки окончательно формируется поверхностный слой деталей машин. Производительность и качество абразивной обработки зависит от абразивной составляющей технологической среды [1].

Анализ публикаций по описанию механизма полирования поверхностных слоев деталей. Наиболее полный анализ существующих подходов к проблеме формообразования поверхностей при абразивном изнашивании провел Л. С. Цеснек [2], который предложил условно разделить процесс формообразования поверхностей на механический (макрофизический) и микрофизический. В твердом теле при механической обработке в зависимости от условий воздействия абразива возникает упругое и пластическое деформирование или происходит пластическое, или хрупкое разрушение. Характер разрушения зависит от скорости деформации твердого тела.

Цель работы: изучить механику и статику контактных взаимодействий, что необходимо для построения моделей обработки и формирования качества поверхностного слоя. Экспериментальный и теоретический методы моделирования процесса полирования свободным абразивом позволяет сочетать достаточно точные экспериментальные описания конкретных операций обработки с лучшим пониманием процессов при высокой степени абстракции (теоретическое моделирование).

Содержание работы. При разработке моделей необходимо учитывать противоречивость в достижении поставленных целей. Например, повышение производительности требует ужесточения режимов обработки, а повышение качества – смягчения.

При моделировании процесса полирования необходимо учесть скорость и траекторию движения частиц, их размеры и зернистость, механические свойства материала детали. Модель абразивного инструмента при полировании может быть представлена в виде схемы рис.1. Абразивное полирование в зависимости от характера применяемых абразивных рабочих сред и технологических жидкостей представляет собой механохимический процесс сглаживания поверхностного слоя путем пластического деформирования микронеровностей, съема окислов с обрабатываемой поверхности.

Процесс полирования сопровождается последовательным нанесением на поверхность обрабатываемых деталей большого числа царапин и следов пластического деформирования при их взаимном наложении и пересечении. Технологическая жидкость обеспечивает удаление продуктов износа (частиц металла и абразивных частиц) с поверхности обрабатываемой детали, способствует охлаждению поверхностного слоя обрабатываемой детали.

Интенсивность обработки зависит от динамических параметров, определяемых режимами полирования, продолжительностью полирования, характеристиками и размерами частиц абразива, характеристиками механических свойств материала детали.

Режущий инструмент формируется непосредственно в процессе обработки как абразивная среда с особыми свойствами и определенными внутренними связями. Сложная геометрическая форма зерен и их режущей части является одной из важнейших характеристик абразивного инструмента.

Параметры режущего профиля абразивной гранулы (скопления абразивных зерен) определяется величиной и расположением абразивных зерен. При единичном взаимодействии абразивной гранулы с поверхностью детали через сечение неровностей обрабатываемой поверхности, перпендикулярное направлению относительного движения гранулы, пройдет несколько слоев определенной толщины. Элементарные режущие профили будут случайным образом накладываться друг на друга, а на поверхности детали будет копироваться их огибающая, представляющая собой эффективный режущий профиль гранулы. Профиль шероховатости поверхности детали в поперечном сечении абразивных царапин копирует эффективный режущий профиль гранулы, будет зависеть от глубины внедрения зерен h_{max} , от исходной шероховатости поверхности детали и от параметров распределения вершин абразивных зерен по высоте.

Абразивный инструмент в первую очередь будет контактировать с выступами исходной шероховатости поверхности, при этом будет происходить постепенное скругление выступов. В процессе полирования высотные параметры профиля исходной шероховатости по-

© Г.В. Шурупий, 2016

верхности будут уменьшаться, а шаговые параметры будут изменяться незначительно.

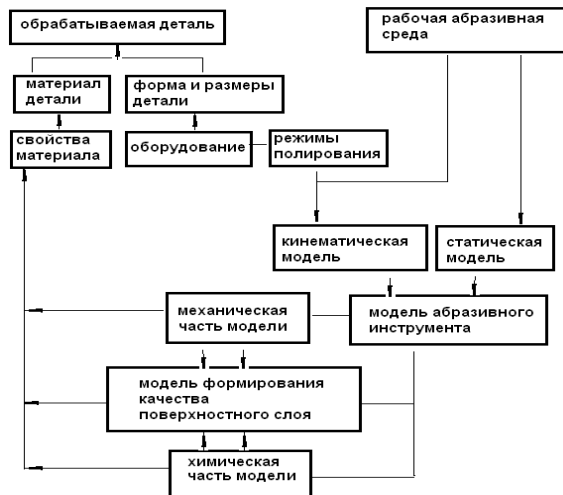


Рис. 1 – Формирование физико-химического состояния поверхностного слоя при обработке свободным абразивом

Если прекратить процесс полирования через 30 с от начала полирования, то при исходной шероховатости после шлифования сохранится часть исходного микрорельефа, при этом шероховатость поверхности детали будет состоять из сглаженных выступов. Опорная поверхность обработанной детали на уровнях 10, 20, 30, 40 % будет значительно увеличена по сравнению с исходной, а впадины микрорельефа останутся без изменений. Продолжение процесса полирования приведет к полному удалению выступов исходной шероховатости. Отношение высотных параметров R_a/R_{max} при этом уменьшится. Это свидетельствует о возникновении большого количества царапин на полированной поверхности, связанных с наличием укрупненной фракции в поставляемых промышленностью абразивных порошках. В дальнейшем процесс полирования стабилизируется. Характерный для процесса полирования рельеф будет постоянно воспроизводиться, его параметры не будут изменяться с течением времени, а будут определяться режимами обработки и зернистостью применяемого абразива.

Профиль установившейся шероховатости поверхности не зависит от исходной шероховатости шлифованной поверхности, а будет определяться только технологическими параметрами процесса. Дальнейшее улучшение шероховатости поверхности детали можно получить либо изменением режимов обработки, или заменой абразивной среды на более мелкозернистую. Замене абразива предшествует тщательная очистка обработанного поверхностного слоя от остатков предшествующей рабочей среды.

Проведенные нами ранее исследования позволили рекомендовать технологические среды на основе ультрадисперсных абразивов оксида алюминия, которые получают газодисперсным синтезом.

Абразивный порошок характеризуют:

- минимальная величина фракции (около 0,01 мкм).
- равномерность фракции (от 0,07 до 1,04 мкм).
- сферическая форма абразива.

– наличие окиси алюминия (Al_2O_3) до 99,9%.

В экспериментах при полировании использовали неабразивную составляющую в виде дистиллированной воды (на одну часть абразива четыре части дистиллированной воды).

Для достижения сверх гладких поверхностей, на наш взгляд, необходимо обеспечить:

метрологическое обеспечение контроля качества обработки (проблемы возникают при оценке наноразмерных неровностей на обработанной поверхности);

выбор соответствующей технологической среды; разработка системы управления процессом формирования поверхностного слоя детали.

Процесс полирования зависит от фактической площади контакта абразивных частиц с поверхностью детали. Фактическая площадь касания абразивных частиц гранулы и поверхности обрабатываемой детали будет зависеть от распределения неровностей по высоте, механических характеристик контактирующих тел, величины сил, действующих на эти тела и напряженного состояния в зоне контакта. Площадь фактического контакта определяется физико-механическими свойствами более мягкого тела и геометрией поверхности более твердого материала (абразива). Влияние шероховатости поверхности на площадь фактического контакта будет сказываться слабо, в основном, в начальный период обработки.

Геометрическую форму профиля режущей части зерен описывают и треугольником, и треугольником с радиусом округления при вершине, и трапецией, и параболой [1, 3, 4, 5]. Абразивные зерна не имеют постоянных радиусов округления вершин [3]. Форма профиля зерна представляется также в виде эллипсоида, и в виде окружности, и в виде набора нескольких окружностей. При изучении под микроскопом на выступах зерен можно выделять микрорельеф и субмикрорельеф, обусловленные кристаллическим строением зерен абразива.

В работе [6] установлено, что форму абразивной царапины, оставленной одним зерном, можно аппроксимировать функцией вида:

$$b_i = n \cdot a_i^m,$$

где b – ширина царапины;

a – глубина царапины.

Отношение ширины абразивных царапин к глубине слабо зависит от размеров зерен: $b_i = 3,8 \cdot a_i$.

Это отношение будет стабильным для данного процесса обработки.

Для поверхности абразивных гранул статическую модель можно описать следующим образом: рабочий слой гранулы – это слой, расположенный между наружной поверхностью гранулы и условной поверхностью связки. Распределение зерен в абразивной грануле определяется законом нормального распределения. В процессе полирования происходит износ абразивных зерен в виде частичного скалывания и их разрушения. В условиях многократного ударного взаимодействия абразивной гранулы с другими гра-

нулами и поверхностью детали разрушившиеся зерна удаляются из места условной связки и одновременно обнажаются новые зерна, имитируя явление «самозатачивания», характерное для жесткой связки. Это необходимо учитывать при построении кинематической модели инструмента.

Изменяя режимы обработки можно в значительной мере влиять на результаты обработки.

Определив количественные параметры единичного взаимодействия можно оценить количество таких взаимодействий в единицу времени на единице площади обрабатываемой поверхности.

В работе [7] сделан вывод, что при сглаживании поверхностного слоя детали время цикла последующего процесса полирования будет уменьшаться интенсивнее, чем снижение высотных параметров исходной шероховатости до обработки; для каждой зернистости абразивного материала существует предел по стабилизации значений высотного параметра шероховатости поверхности, а это очень важно при назначении последовательности использования рабочих сред при сглаживании поверхностного слоя деталей. Этот предел будет зависеть от исходного состояния поверхности детали до обработки. Учитывая, что зависимости высотных параметров шероховатости поверхности при полировании от времени обработки стабилизируется к первой минуте обработки [7] сглаживание поверхностного слоя следует проводить поэтапно, снижая зернистость абразива. После шлифования необходимо выполнить абразивное полирование алмазной пастой АСМ 5/3 в течение 1 мин. После тщательной очистки поверхности от остатков рабочей среды следует применить обработку алмазной пастой АСМ 2/1 в течение 1 мин. и на третьем этапе обработку производить суспензией с нано порошком Al_2O_3 .

Выводы.

1. Отношение высотных параметров шероховатости поверхности R_a / R_{max} может быть использовано для контроля дефектов поверхности после применения финишных методов обработки.

2. Сглаживание поверхностного слоя следует проводить поэтапно, снижая зернистость абразива.

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic description

Дослідження процесу полірування вільним абразивом / В. Г. Шкурупій // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. – Х.: НТУ «ХПІ», 2016. – № 5 (1177). – С. 87–89. – Бібліогр.: 7 назв. – ISSN 2079-0023.

Исследование процесса полирования свободным абразивом / В. Г. Шкурупий // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні.–Харків:НТУ«ХПІ»,2016.–№ 5 (1177).–С. 87-89.– Библиогр.:7 назв. – ISSN 2079-0023.

Investigation process of polishing a free abrasive / V. G. Shkurupiy // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technologies in mechanical engineering. – Kharkov: NTU "KhPI", 2016. – No. 5 (1177). – P. 87-89. – Bibliogr.: 7. – ISSN 2079-0023.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Шкурупій Валентин Григорович – кандидат технічних наук, доцент кафедри «Природничі науки та технології» Харківського національного економічного університету імені Семена Кузнеця, м. Харків; тел.: +38-0632237660; e-mail: kافتtech@hneu.edu.ua .

Шкурупий Валентин Григорьевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Естественные науки и технологии» Харьковского национального экономического университета имени Семена Кузнеця, г. Харьков; тел.: +38-0632237660; e-mail: kافتtech@hneu.edu.ua .

Shkurupiy Valentin Grigorevith - PhD, associate professor of "Science and Technology" Kharkiv National Economic University named after Semen Kuznets Kharkiv; tel. +38-0632237660; e-mail: kافتtech@hneu.edu.ua.

Список литературы

1. Абразивная и алмазная обработка материалов: Справочник / Под ред. А. Н. Резникова. – М.: Машиностроение, 1977. – 391 с.
2. Цеснек Л. С. Механика и микрофизика истирания поверхностей / Л. С. Цеснек. – М.: Машиностроение, 1979. – 264 с.
3. Королев А. В. Теоретико-вероятностные основы абразивной обработки / А. В. Королев, Ю. К. Новоселов. – Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1989. – 320 с.
4. Мартынов А. Н. Основы метода обработки деталей свободным абразивом, уплотненным инерционными силами / А. Н. Мартынов. – Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1981. – 212 с.
5. Маслов Е. Н. Теоретические основы процессов царапания металлов / Е. Н. Маслов // Склерометрия. – М.: Наука, 1968. – С. 24–44.
6. Королев А. В. Исследование процессов образования поверхностей инструмента и детали при абразивной обработке / А. В. Королев. – Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1975. – 191 с.
7. Шкурупий В. Г. Сглаживание поверхностного слоя деталей из меди и алюминия при их абразивном полировании / В. Г. Шкурупий, Ю. Ф. Назаров // Защита металлургических машин от поломок. – Мариуполь: ПДТУ, 2010. – Вып. 12. – С. 281–285.

References (transliterated)

1. Reznikov A. N. *Abrazivnaya i almaznaya obrabotka materialov: Spravochnik* [Abrasive and diamond processing of materials: Manual] Moscow, Mashinostroenie, 1977. 391 p.
2. Tsesnek L. S. *Mekhanika i mikrofizika istiraniya poverkhnostey* [Mechanics and microphysics wear surfaces]. Moscow, Mashinostroenie, 1979. 264 p.
3. Korolev A. V., Novoselov Yu. K. *Teoretiko-veroyatnostnye osnovy abrazivnoy obrabotki* [Theoretical and probabilistic basis abrasion]. Saratov, Izd-vo Saratov. un-ta, 1989. 320 p.
4. Martynov A. N. *Osnovy metoda obrabotki detaley svobodnym abrazivom, uplotnennym inertsiionnymi silami* [Basics of processing method parts loose abrasive, packed inertial forces]. Saratov, Izd-vo Saratov. un-ta, 1981. 212 p.
5. Maslov E. N. *Teoreticheskie osnovy protsessov tsarapaniya metallov* [Theoretical basis of processes scratching metals] *Sklerometriya*. Moscow, Nauka, 1968. pp. 24–44.
6. Korolev A. V. *Issledovanie protsessov obrazovaniya poverkhnostey instrumenta i detalei pri abrazivnoy obrabotke* [Study of education tool surfaces and components with abrasion]. Saratov, Izd-vo Saratov. un-ta, 1975. 191 p.
7. Shkurupiy V. G., Nazarov Yu. F. *Sglazhivanie poverkhnostnogo sloya detaley iz medi i alyuminiya pri ih abrazivnom polirovanii* [Smoothing the surface layer parts of copper and aluminum in their abrasive polishing] *Zashita metallurgicheskikh mashin ot polomok*. Mariupol, PDTU, 2010, Issue. 12, pp. 281–285.

Поступила (received) 23.05.2016

УДК 621.923

Ф. В. НОВИКОВ, И. А. РЯБЕНКОВ**ЗАКОНОМЕРНОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ РЕЗАНИЯ ПРИ ОБЫЧНОМ И ПЕРЕРЫВИСТОМ ШЛИФОВАНИИ**

Наведено аналітичні залежності для визначення температури різання при звичайному і переривчастому шліфуванні, отримані на основі роздільного урахування енергії різання та енергії тертя зв'язки круга з оброблюваним матеріалом в загальному енергетичному балансі процесу шліфування. Це дозволило визначити оптимальні умови обробки, що забезпечують найменшу температуру різання при звичайному і переривчастому шліфуванні. Теоретично показано, що температура різання істотно залежить від тертя зв'язки круга з оброблюваним матеріалом в процесі шліфування. Доведено ефективність застосування глибинного переривчастого шліфування, що дозволяє багаторазово зменшити температуру різання в порівнянні з глибинним шліфуванням звичайним суцільним кругом.

Ключові слова: температура різання, переривчасте шліфування, енергія різання, тертя зв'язки круга з матеріалом, енергетичний баланс процесу шліфування, умовне напруження різання, глибинне переривчасте шліфування.

Приведены аналитические зависимости для определения температуры резания при обычном и прерывистом шлифовании, полученные на основе раздельного учета энергии резания и энергии трения связки круга с обрабатываемым материалом в общем энергетическом балансе процесса шлифования. Это позволило определить оптимальные условия обработки, обеспечивающие наименьшую температуру резания при обычном и прерывистом шлифовании. Теоретически показано, что температура резания существенно зависит от трения связки круга с обрабатываемым материалом в процессе шлифования. Доказана эффективность применения глубинного прерывистого шлифования, позволяющего многократно уменьшить температуру резания по сравнению с глубинным шлифованием обычным сплошным кругом.

Ключевые слова: температура резания, прерывистое шлифование, энергия резания, трение связки круга с материалом, энергетический баланс процесса шлифования, условное напряжение резания, глубинное прерывистое шлифование.

Analytical dependence for determining the temperature of the cutting at normal and intermittent grinding, obtained on the basis of separate accounting of cutting energy and energy range of bundles of friction with the material being processed in the overall energy balance of the grinding process. It is possible to determine the optimum processing conditions to ensure the lowest temperature during normal cutting and intermittent grinding. Theoretically, it is shown that the cutting temperature depends essentially on the friction circle ligaments work material during grinding. The efficiency of the use of deep discontinuous grinding has vastly reduce the cutting temperature compared to conventional deep grinding solid circle.

Keywords: cutting temperature, intermittent grinding, cutting energy, friction circle bundles with the material, the energy balance of the grinding process, conventional stress cutting, deep intermittent grinding.

Постановка проблеми. Как известно, температурный фактор является основным ограничивающим фактором при резании материалов, определяющим стойкость режущего инструмента, качество и производительность обработки. В особой мере температурный фактор проявляется при шлифовании материалов, резко снижая качество обработки в связи с образованием на обрабатываемых поверхностях прижогов, микротрещин и других температурных дефектов. Исходя из этого, по-прежнему актуальна проблема уменьшения температуры резания при шлифовании, несмотря на то, что в настоящее время на практике используется большой арсенал различных технологических средств и приемов, направленных на снижение температуры резания при шлифовании. Также актуальна проблема повышения производительности обработки при шлифовании в связи с ограничениями по качеству обработки, которые определяются температурным фактором. Поэтому в работе решается задача теоретического обоснования закономерностей изменения и условий уменьшения температуры резания при шлифовании и повышения качества и производительности обработки.

Анализ последних исследований и публикаций. В научно-технической литературе имеется большое количество работ, посвященных исследованию температуры резания при шлифовании [1–3]. Среди них следует особо выделить работы профессора Якимова А. В. [4, 5], в которых в обобщенном виде представлены решения дифференциальных уравнений, описывающих тепловые поля, возникающие при

шлифовании, для различных случаев обработки. На основе этих решений сформулированы и обоснованы основные направления уменьшения температуры резания и показано, что при шлифовании труднообрабатываемых материалов целесообразно использовать круги с прерывистой рабочей поверхностью, которые получили широкое применение на практике. Используя полученные профессором Якимовым А. В. теоретические решения, появляется возможность дальнейшего анализа влияния различных неучтенных факторов на температуру резания при шлифовании. К ним следует отнести необходимость раздельного учета энергии резания и энергии трения связки круга с обрабатываемым материалом в общем энергетическом балансе процесса шлифования, поскольку при шлифовании имеют место значительные потери энергии на трение связки круга с обрабатываемым материалом, что приводит к резкому снижению качества обработки из-за образования на обрабатываемых поверхностях различных температурных дефектов. Поэтому необходимо установить влияние энергии резания и энергии трения связки круга с обрабатываемым материалом на температуру резания при обычном и прерывистом шлифовании.

Цель работы – определение закономерностей изменения и условий уменьшения температуры резания при обычном и прерывистом шлифовании на основе раздельного учета энергии резания и энергии трения связки круга с обрабатываемым материалом в общем энергетическом балансе процесса шлифования.

© Ф. В. Новиков, А.И. Рябенков, 2016

Изложение основного материала. Для определения температуры резания при шлифовании θ воспользуемся аналитической зависимостью [6]:

$$\theta = \frac{q \cdot l_2}{\lambda}, \quad (1)$$

где $q = N / F$ – плотность теплового потока, Вт/м²;

N – мощность шлифования, Вт;

P_z – тангенциальная составляющая силы резания, Н;

$V_{кр}$ – скорость круга, м/с;

F – площадь контакта круга с обрабатываемой деталью, м²;

$l_2 = \sqrt{2\lambda \cdot \tau / (c \cdot \rho)}$ – глубина проникновения тепла в поверхностный слой обрабатываемой детали, м;

τ – время контакта фиксированной точки, расположенной на поверхности обрабатываемой детали, с кругом, с;

c – удельная теплоемкость обрабатываемого материала, Дж/(кг·К);

λ – коэффициент теплопроводности обрабатываемого материала, Вт/м·К;

ρ – плотность обрабатываемого материала, кг/м³.

В общем случае $P_z = P_{z_{рез}} + P_{z_{мп}}$ [7], где

$P_{z_{рез}}$, $P_{z_{мп}}$ – составляющие силы резания, обусловленные “чистым резанием” абразивными зёрнами круга и трением связки круга с обрабатываемым материалом, Н; $P_{z_{рез}} = \sigma \cdot S_{сум}$; σ – условное напряжение резания, Н/м²; $S_{сум} = Q / V_{кр}$ – мгновенная суммарная площадь поперечного сечения среза всеми одновременно работающими зёрнами круга, м²; Q – производительность обработки, м³/с.

При плоском шлифовании периферией круга производительность обработки Q определяется зависимостью $Q = B \cdot V_{дем} \cdot t$, где B – ширина шлифования, м; $V_{дем}$ – скорость перемещения детали, м/с; t – глубина шлифования, м. Соответственно, $F = B \cdot L$, где $L = \sqrt{t \cdot D_{кр}}$ – длина дуги контакта круга с обрабатываемой деталью, м; $D_{кр}$ – диаметр круга, м.

После преобразований (1) принимает вид:

$$\theta = \left(\sigma \cdot V_{дем} \cdot \sqrt{\frac{t}{D_{кр}}} + \frac{P_{z_{мп}} \cdot V_{кр}}{B \cdot \sqrt{t \cdot D_{кр}}} \right) \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \tau}{c \cdot \rho \cdot \lambda}}. \quad (2)$$

Как видно, основным условием уменьшения температуры резания при шлифовании θ несомненно является исключение из зависимости (1) второго слагаемого, обусловленного трением связки круга с обрабатываемым материалом. Это достигается при условии $P_{z_{мп}} = 0$. Однако на практике реализовать это условие фактически невозможно, так как в процессе шлифования всегда имеет место трение связки круга с обрабатываемым материалом. Поэтому увеличение

скорости круга $V_{кр}$, которая входит во второе слагаемое зависимости (1), приводит к увеличению температуры резания при шлифовании θ . Именно этим фактом можно объяснить увеличение температуры резания при шлифовании с увеличением скорости круга $V_{кр}$, которое имеет место на практике [8], хотя в ряде работ, посвященных алмазному шлифованию, показано, что с увеличением скорости круга $V_{кр}$ температура резания может оставаться фактически постоянной или уменьшаться. Это связано со спецификой работы алмазного круга, который характеризуется высокой остротой режущих зёрен, способных полностью удалить металл, подводимый в зону резания, не доходя до уровня связки круга. В результате обрабатываемый металл фактически не контактирует со связкой круга, что резко снижает трение в зоне резания и тепловую напряженность процесса шлифования.

Если учесть, что $\tau = L / V_{дем} = \sqrt{t \cdot D_{кр}} / V_{дем}$, то зависимость (2) принимает вид:

$$\theta = \left(\sigma \cdot V_{дем} \cdot \sqrt{\frac{t}{D_{кр}}} + \frac{P_{z_{мп}} \cdot V_{кр}}{B \cdot \sqrt{t \cdot D_{кр}}} \right) \times \sqrt{\frac{2}{c \cdot \rho \cdot \lambda} \cdot \frac{\sqrt{t \cdot D_{кр}}}{V_{дем}}}. \quad (3)$$

Как видно, параметры режима шлифования $V_{дем}$ и t неоднозначно влияют на температуру резания при шлифовании θ .

При $P_{z_{мп}} = 0$ зависимость (3) принимает вид:

$$\theta = \sigma \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot Q_{уд}}{c \cdot \rho \cdot \lambda}} \cdot \sqrt{\frac{t}{D_{кр}}}, \quad (4)$$

где $Q_{уд} = V_{дем} \cdot t$ – удельная производительность обработки, м²/с.

В данном случае температура резания при шлифовании θ (при заданном значении $Q_{уд}$) с уменьшением глубины шлифования t однозначно уменьшается. Следовательно, эффективно применять многопроходное шлифование, характеризующееся увеличенными значениями скорости перемещения детали $V_{дем}$ и небольшими значениями глубины шлифования t .

При условии одинаковой удельной производительности обработки $Q_{уд}$ зависимость (3) опишется:

$$\theta = \sqrt{\frac{2}{c \cdot \rho \cdot \lambda}} \cdot \sqrt{\frac{t}{D_{кр}}} \times \left(\sigma \cdot \sqrt{Q_{уд}} + \frac{P_{z_{мп}} \cdot V_{кр}}{B} \cdot \frac{1}{\sqrt{Q_{уд}}} \right). \quad (5)$$

Как видно, с уменьшением глубины шлифования t (при заданном значении $Q_{y\delta}$) температура резания при шлифовании θ однозначно уменьшается, т.е. целесообразно применять многопроходное шлифование. Особенно эффективно его применять при шлифовании, когда имеет место интенсивное трение связки круга с обрабатываемым материалом и в зависимости (5) преобладает второе слагаемое. Этим можно объяснить эффективность применения многопроходного шлифования для различных условий обработки, включая шлифование затупившимся кругом.

Как следует из зависимости (5), с увеличением удельной производительности обработки $Q_{y\delta}$ температура резания при шлифовании θ изменяется неоднозначно. Поэтому для определения экстремального значения $Q_{y\delta}$ функцию θ следует подчинить необходимому условию экстремума $\theta'_{Q_{y\delta}} = 0$. В результате получено:

$$Q_{y\delta} = \frac{P_{zmp} \cdot V_{кр}}{B \cdot \sigma}. \quad (6)$$

Расчетами установлено, что вторая производная функции θ от $Q_{y\delta}$ в точке экстремума положительна. Следовательно, в точке экстремума имеет место минимум функции θ .

Подставляя зависимость (6) в (5), определено минимальное значение температуры резания при шлифовании

$$\theta_{min} = 2 \cdot \sqrt{\frac{2}{c \cdot \rho \cdot \lambda} \cdot \frac{P_{zmp} \cdot \sigma \cdot V_{кр}}{B}} \cdot \sqrt{\frac{t}{D_{кр}}}. \quad (7)$$

Согласно зависимости (7), уменьшить θ_{min} можно уменьшением параметров P_{zmp} , σ , t , $V_{кр}$ и увеличением B .

При условии $P_{zmp} = 0$ справедливо $\theta_{min} = 0$. В этом случае характер изменения температуры резания при шлифовании подчиняется зависимости (4).

Используя зависимость (2), можно оценить возможность уменьшения температуры резания при шлифовании θ кругом с прерывистой рабочей поверхностью. В работе [4] установлено, что в момент контакта рабочего выступа круга с обрабатываемым материалом фактическая производительность шлифования обычным сплошным кругом увеличивается в $(1 + l_0/l_1)$ раз, где l_0 , l_1 – соответственно длины впадины и рабочего выступа прерывистого круга, м. Время контакта шлифовального круга с фиксированной точкой на обрабатываемой поверхности, наоборот, уменьшается и определяется зависимостью $\tau = l_1/V_{кр}$.

Подставляя в зависимость (2) эти изменения, получено:

$$\theta = \left(\sigma \cdot V_{\delta em} \cdot \sqrt{\frac{t}{D_{кр}}} \cdot \left(1 + \frac{l_0}{l_1} \right) + \frac{P_{zmp} \cdot V_{кр}}{B \cdot \sqrt{t \cdot D_{кр}}} \right) \times \sqrt{\frac{2}{c \cdot \rho \cdot \lambda} \cdot \frac{l_1}{V_{кр}}}. \quad (8)$$

Как видно, параметр l_1 неоднозначно влияет на температуру резания при шлифовании, т.е. имеет место экстремальная зависимость $\theta - l_1$. Для определения экстремального значения l_1 следует подчинить функцию θ необходимому условию экстремума $\theta'_{l_1} = 0$. В результате после преобразований получено:

$$l_1 = \frac{l_0}{\left(1 + \frac{P_{zmp} \cdot V_{кр}}{\sigma \cdot B \cdot V_{\delta em} \cdot t} \right)} = \frac{l_0}{\left(1 + \frac{P_{zmp}}{P_{zpez}} \right)}. \quad (9)$$

Из зависимости (9) вытекает, что длина рабочего выступа прерывистого круга l_1 меньше длины впадины круга l_0 . Причем, чем больше отношение P_{zmp}/P_{zpez} , тем меньше должна быть длина рабочего выступа круга по сравнению с длиной впадины круга.

При $P_{zmp} = 0$ справедливо соотношение:

$$l_1 = l_0. \quad (10)$$

В этом случае минимум температуры резания при прерывистом шлифовании реализуется при условии равенства длин рабочего выступа и впадины прерывистого круга.

Подставляя зависимость (9) в зависимость (8), определено минимальное значение температуры резания при шлифовании

$$\theta_{min} = 2 \cdot \left(\sigma \cdot V_{\delta em} \cdot \sqrt{\frac{t}{D_{кр}}} + \frac{P_{zmp} \cdot V_{кр}}{B \cdot \sqrt{t \cdot D_{кр}}} \right) \times \sqrt{\frac{2}{c \cdot \rho \cdot \lambda} \cdot \frac{l_1}{V_{кр}}}. \quad (11)$$

Из зависимости (11) следует, что уменьшить минимальную температуру резания θ_{min} при прерывистом шлифовании можно уменьшением длины рабочего выступа прерывистого круга l_1 и параметров σ , P_{zmp}/B .

Глубина шлифования t неоднозначно влияет на функцию θ_{min} . Для определения экстремального значения глубины шлифования t следует подчинить функцию θ_{min} необходимому условию экстремума $\theta'_t = 0$. В результате получено:

$$t_{эксп} = \frac{P_{zmp} \cdot V_{кр}}{B \cdot \sigma \cdot V_{\delta em}}. \quad (12)$$

Как видно, экстремальное значение глубины шлифования $t_{экстр}$ тем больше, чем больше сила трения связки круга с обрабатываемым материалом $P_{z_{mp}}$, скорость круга $V_{кр}$ и меньше параметры B , σ , $V_{дем}$.

С физической точки зрения зависимость (12) соответствует условию $P_{z_{рез}} = P_{z_{mp}}$, рассматривая $P_{z_{рез}} = B \cdot \sigma \cdot V_{дем} \cdot t_{экстр} / V_{кр}$. Следовательно, в точке экстремума функции θ_{min} реализуется условие равенства силы трения связки круга с обрабатываемым материалом $P_{z_{мп}}$ и силы “чистого резания” зернами круга $P_{z_{рез}}$.

Очевидно, при условии $P_{z_{мп}} = 0$ экстремум функции θ_{min} в зависимости от глубины шлифования t , исходя из зависимости (12), будет отсутствовать. Поэтому функция θ_{min} с увеличением глубины шлифования t будет непрерывно увеличиваться. Из этого можно сделать вывод о том, что экстремум функции θ_{min} , определяемый зависимостью (11), обусловлен наличием в ней второго слагаемого, связанного с трением связки круга с обрабатываемым материалом.

Для определения характера экстремума функции θ_{min} в зависимости от глубины шлифования t необходимо подставить в зависимость (11) преобразованное выражение (12):

$$t = \alpha \cdot \frac{P_{z_{мп}} \cdot V_{кр}}{B \cdot \sigma \cdot V_{дем}}, \quad (13)$$

где α - безразмерный коэффициент, принимающий значения $0 \dots 1 \dots \infty$.

В результате получено:

$$\theta_{min} = 4 \cdot \sqrt{\frac{2}{c \cdot \rho \cdot \lambda} \cdot \frac{P_{z_{мп}} \cdot \sigma \cdot V_{дем} \cdot l_1}{B \cdot D_{кр}}} \times \left(\sqrt{\alpha} + \frac{1}{\sqrt{\alpha}} \right). \quad (14)$$

В табл. 1 показан характер изменения функции $\left(\sqrt{\alpha} + \frac{1}{\sqrt{\alpha}} \right)$, входящей в зависимость (14), от безразмерного коэффициента α .

Как видно, с увеличением безразмерного коэффициента α функция $\left(\sqrt{\alpha} + \frac{1}{\sqrt{\alpha}} \right)$ первоначально уменьшается, а затем увеличивается, проходя точку минимума при $\alpha = 1$. Это указывает на существование минимума в точке экстремума функции θ_{min} . Тогда минимальное значение функции θ_{min} при $\alpha = 1$ описывается зависимостью:

$$(\theta_{min})_{min} = 8 \cdot \sqrt{\frac{2}{c \cdot \rho \cdot \lambda} \cdot \frac{P_{z_{мп}} \cdot \sigma \cdot V_{дем} \cdot l_1}{B \cdot D_{кр}}}. \quad (15)$$

Как видно, уменьшить функцию $(\theta_{min})_{min}$ можно уменьшением параметров $P_{z_{мп}} / B$, σ , $V_{дем}$, l_1 и увеличением $D_{кр}$.

При условии $P_{z_{мп}} = 0$ функция $(\theta_{min})_{min} = 0$. В этом случае характер изменения функции θ_{min} будет подчиняться зависимости (11) при условии $P_{z_{мп}} = 0$:

$$\theta_{min} = 2 \cdot \sigma \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot Q_{уд} \cdot V_{дем} \cdot l_1}{c \cdot \rho \cdot \lambda \cdot V_{кр} \cdot D_{кр}}}. \quad (16)$$

Таким образом установлено, что при прерывистом шлифовании добиться уменьшения температуры резания θ_{min} (при заданном значении удельной производительности обработки $Q_{уд}$) можно уменьшением скорости перемещения детали $V_{дем}$ и соответственно пропорциональном увеличении глубины шлифования t , т.е. применением глубинного шлифования [9], а также за счет увеличения скорости круга $V_{кр}$, т.е. в конечном итоге за счет применения высокоскоростного глубинного шлифования.

Исходя из аналогичной зависимости (4), справедливой для шлифования обычным сплошным кругом, уменьшить температуру резания можно, наоборот, применением многопроходного шлифования, т.е. увеличением скорости перемещения детали $V_{дем}$ при пропорциональном уменьшении глубины шлифования t . В этом принципиальное отличие процессов шлифования прерывистым и обычным сплошным кругом.

Таблица 1 – Расчетные значения функции $\left(\sqrt{\alpha} + \frac{1}{\sqrt{\alpha}} \right)$

α	0,1	0,2	0,8	1	1,5	2	4
$\left(\sqrt{\alpha} + \frac{1}{\sqrt{\alpha}} \right)$	3,48	2,68	2,012	2	2,04	2,121	2,5

Обозначая в зависимости (16) температуру шлифования прерывистым кругом $\theta_{\text{прерыв}} = \theta_{\text{min}}$, а в зависимости (4) температуру шлифования сплошным кругом $\theta_{\text{сплошн}} = \theta$, определим их отношение:

$$\frac{\theta_{\text{прерыв}}}{\theta_{\text{сплошн}}} = 2 \cdot \sqrt{\frac{V_{\text{дет}}}{V_{\text{кр}}} \cdot \frac{l_1}{\sqrt{t \cdot D_{\text{кр}}}}} \quad (17)$$

Произведем расчет отношения $\theta_{\text{прерыв}}/\theta_{\text{сплошн}}$ для условий плоского многопроходного шлифования: $V_{\text{дет}}/V_{\text{кр}} = 1/60$; $l_1 = 20$ мм; $t = 0,02$ мм; $D_{\text{кр}} = 300$ мм. В результате расчетов установлено: $\theta_{\text{прерыв}}/\theta_{\text{сплошн}} = 0,74$. Следовательно, применение прерывистого многопроходного шлифования взамен обычного многопроходного шлифования сплошным кругом позволяет уменьшить температуру резания в 0,74 раза или на 26 %.

Сохраняя то же значение удельной производительности обработки $Q_{\text{уд}}$, расчетами установлено, что при плоском глубинном шлифовании прерывистым кругом ($V_{\text{дет}}/V_{\text{кр}} = 1/600$; $l_1 = 20$ мм; $t = 0,2$ мм; $D_{\text{кр}} = 300$ мм) отношение $\theta_{\text{прерыв}}/\theta_{\text{сплошн}} = 0,13$. Следовательно, в условиях плоского глубинного шлифования прерывистым кругом можно добиться более значительного уменьшения температуры резания, чем при использовании обычного сплошного круга [10]. Это согласуется с практикой применения прерывистых алмазных кругов, например, при разрезании заготовок на части, при вышлифовывании глубоких пазов и канавок, глубинном шлифовании труднообрабатываемых материалов и т.д. Экспериментально установлено, что в этих условиях обработки обеспечивается высокое качество обрабатываемых поверхностей (отсутствуют прижоги, микротрещины и другие температурные дефекты) при одновременном увеличении производительности обработки по сравнению с шлифованием обычными сплошными алмазными или абразивными кругами.

Выводы. В работе теоретически обоснованы новые технологические возможности прерывистого шлифования с точки зрения уменьшения температуры резания. Доказана эффективность применения глубинного прерывистого шлифования, позволяющего многократно уменьшить температуру резания по сравнению с глубинным шлифованием обычным сплошным кругом. Эффект достигается за счет уменьшения времени τ контакта фиксированной точки, расположенной на поверхности обрабатываемой детали, с кругом. Так, при прерывистом шлифовании $\tau = l_1/V_{\text{кр}}$, а при шлифовании обычным сплошным кругом $\tau = \sqrt{t \cdot D_{\text{кр}}}/V_{\text{дет}}$, т.е. их отношение меньше единицы. Это решение является новым, т.к. традиционно считается, что эффект прерывистого шлифования состоит в возможности охлаждения обрабатываемой детали в момент прерывания процесса шлифования. В действительности, как показано в ра-

боте, при прерывистом шлифовании уменьшается время контакта фиксированной точки, расположенной на поверхности обрабатываемой детали, с кругом, что приводит к дополнительному снижению температуры резания. Исходя из зависимости (16), добиться существенного уменьшения температуры резания можно также за счет уменьшения длины рабочего выступа прерывистого алмазного или абразивного круга l_1 .

Список литературы

1. Резников А.Н. Теплофизика процессов механической обработки материалов / А.Н. Резников. – М.: Машиностроение, 1981. – 279 с.
2. Ящерицын П.И. Тепловые явления при шлифовании и свойства обработанных поверхностей / П.И. Ящерицын, А.К. Цокур, М.Л. Еременко. – Минск: Наука и техника, 1973. – 184 с.
3. Евсеев Д.Г. Формирование свойств поверхностных слоев при абразивной обработке / Д.Г. Евсеев. – Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1975. – 127 с.
4. Якимов А.В. Оптимизация процесса шлифования / А.В. Якимов. – М.: Машиностроение, 1975. – 175 с.
5. Якимов А.В. Абразивно-алмазная обработка фасонных поверхностей / А.В. Якимов. – М.: Машиностроение, 1984. – 212 с.
6. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения / Под общ. ред. Ф.В. Новикова и А.В. Якимова. В десяти томах. – Т. 2." Теплофизика резания материалов" – Одесса: ОНПУ, 2003. – 625 с.
7. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения / Под общ. ред. Ф.В. Новикова и А.В. Якимова. В десяти томах. – Т. 4." Теория абразивной и алмазно-абразивной обработки материалов" – Одесса: ОНПУ, 2002. – 802 с.
8. Захаренко И.П. Основы алмазной обработки твердосплавного инструмента / И.П. Захаренко. – К.: Наук. думка, 1981. – 300 с.
9. Глубинное шлифование деталей из труднообрабатываемых материалов/ С.С. Силин, В.А. Хрульков, А.В. Лобанов, Н.С. Рыкунов. – М.: Машиностроение, 1984. – 62 с.
10. Рябенков И.А. Определение минимально возможной температуры резания при прерывистом шлифовании / И.А. Рябенков // Физические и компьютерные технологии: труды 21-й междунар. научн.-практ. конф. – Днепропетровск: ЛИРА, 2016. – С. 100–106.

References (transliterated)

1. Reznikov A. N. *Teplofizika protsessov mekhanicheskoy obrabotki materialov* [Thermal physics processes of mechanical processing of materials]. Moscow, Mashinostroenie, 1981. 279 p.
2. Yasherytsyn P. I., Tsokur A. K., Eremenko M. L. *Teplovye yavleniya pri shlifovanii i svoystva obrabotannykh poverkhnostey* [Thermal phenomena in grinding and properties of the treated surfaces]. Minsk, Nauka i tekhnika, 1973. 184 p.
3. Evseev D. G. *Formirovaniye svoystv poverkhnostnykh sloev pri abrazivnoy obrabotke* [Formation properties of the surface layers with abrasion]. Saratov, Izd-vo Sarat. un-ta, 1975. 127 p.
4. Yakimov A. V. *Optimizatsiya protsessa shlifovaniya* [Optimization of the grinding process]. Mjscow, Mashinostroenie, 1975. 175 p.
5. Yakimov A. V. *Abrazivno-almaznaya obrabotka fasonnykh poverkhnostey* [Abrasive diamond processing shaped surfaces]. Moscow, Mashinostroenie, 1984. 212 p.
6. Novikova F. V., Yakimova A. V. *Fiziko-matematicheskaya teoriya protsessov obrabotki materialov i tekhnologii mashinostroeniya* [Physical and mathematical theory of processing materials and manufacturing engineering] Odessa: ONPU, 2003. Vol. 2." Thermophysics cutting materials ". 625 p
7. Novikova F. V., Yakimova A. V. *Fiziko-matematicheskaya teoriya protsessov obrabotki materialov i tekhnologii mashinostroeniya* [Physical and mathematical theory of processing materials and manufacturing engineering] Odessa: ONPU, 2002. Vol. 4." The theory of abrasive and diamond-abrasive processing of materials ". 802 p
8. Zakharenko I. P. *Osnovy almaznoy obrabotki tverdosplavnogo instrumenta* [Fundamentals of diamond machining of carbide tools]. Kiev, Naukova dumka, 1981. 300 p.

9. Silin S. S., Khrulkov V. A., Lobanov A. V., Rykunov N. S. *Glubinnoe shlifovanie detaley iz trudnoobrabatyvaemykh materialov* [Deep grinding parts from hard materials] Moscow, Mashinostroenie, 1984. 62 p. possible cutting temperature with intermittent grinding] *Fizicheskie i kompiuternye tekhnologii : trudy 21-i mezhdunarodnoy naučno.-praktičeskoj konferentsii*. – Dnepropetrovsk: LIRA, 2016. pp. 100–106.
10. Ryabenkov I. A. *Opreделение minimalno vozmozhnoy temperatury rezaniya pri preryvistom shlifovanii* [Determining the minimum

Поступила (received) 23.05.2016

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic description

Закономірності зміни температури різання при звичайному та переривчастому шліфуванні / Ф. В. Новіков, І. О. Рябенков // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. – Х.: НТУ «ХПІ», 2016. – № 5 (1177). – С. 90–95. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-0023.

Закономерности изменения температуры резания при обычном и прерывистом шлифовании / Ф. В. Новиков, И. А. Рябенков // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – № 5 (1177). – С. 90-95. – Библиогр.: 10 назв. – ISSN 2079-0023.

Laws of change of temperature conventional cutting and grinding intermittently / F. V. Novikov, I. A. Ryabenkov // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technologies in mechanical engineering. – Kharkov: NTU "KhPI", 2016. – No. 5 (1177). – P. 90-95. – Bibliogr.: 10. – ISSN 2079-0023.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Новіков Федір Васильович – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри «Природничі науки та технології» Харківського національного економічного університету імені Семена Кузнеця, м. Харків; тел.: (0572) 69-55-62; e-mail: fokusnic1@rambler.ru .

Новиков Федор Васильевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Естественные науки и технологии» Харьковского национального экономического университета имени Семена Кузнеця, г. Харьков; тел.: (0572) 69-55-62; e-mail: fokusnic1@rambler.ru .

Novikov Fedor Vasiliviyth – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Head of Department of "Science and Technology" Kharkiv National Economic University named after Semen Kuznets, Kharkiv; tel .: (0572) 69-55-62; e-mail: fokusnic1@rambler.ru .

Рябенков Ігор Олександрович – кандидат технічних наук, провідний інженер Державного підприємства Харківський машинобудівний завод «ФЕД», м. Харків; тел.: (057) 759-66-31; e-mail: rigor0212@gmail.com.

Рябенков Игорь Александрович – кандидат технических наук, ведущий инженер Государственного предприятия Харьковский машиностроительный завод «ФЭД», г. Харьков; тел.: (057) 759-66-31; e-mail: rigor0212@gmail.com.

Ryabenkov Igor Aleksandrovith – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Leading engineer of the State Enterprise Kharkov machine-building plant FED, Kharkiv; tel .: (057) 759-66-31; e-mail: rigor0212@gmail.com .

УДК 621.833:621.914.5

*А.Н. ШЕЛКОВОЙ, А.А. КЛОЧКО, Е.В. БАСОВА***ВПЕРВЫЕ В МИРОВОЙ ПРАКТИКЕ. ЗУБЧАТЫЕ ПЕРЕДАЧИ С ЭФФЕКТОМ НЕНЬЮТОНОВКОГО СОСТОЯНИЯ РАБОЧЕЙ ЖИДКОСТИ**

У статті розглянуті зубчасті циліндричні передачі з використанням ефекту неньютонівської стану робочої рідини шляхом виконання гідродинамічних кишень на евольвентним профілем провідного циліндричного зубчастого колеса. Замінюючи ділянки ковзання зубчастих коліс на тертя-кочення за рахунок створення зон неньютонівської стану робочої рідини, забезпечується багаторазове зниження коефіцієнта тертя, контакт здійснюється через мастильний шар рідини, що знаходиться на момент утворення контакту за рахунок наявності гідрокишеней при утворенні пружно-несжимаємої робочої мастильної рідини, зменшується шум, підвищується довговічність і зносостійкість зубчастої циліндричної передачі, зменшуються вимоги на точність виготовлення зубчастих коліс циліндричної передачі і забезпечується можливість роботи в форсіпованому режимі.

Ключові слова: зубчасте колесо, циліндрична передача, неньютонівської стан, робоча рідина, коефіцієнт тертя, довговічність, зносостійкість, форсіпований режим.

В статье рассмотрены зубчатые цилиндрические передачи с использованием эффекта неньютоневского состояния рабочей жидкости путем выполнения гидродинамических карманов на эвольвентном профиле ведущего цилиндрического зубчатого колеса. Замена участки скольжения зубчатых колес на трение-качения за счет создания зон неньютоневского состояния рабочей жидкости, обеспечивается многократно снижение коэффициента трения, контакт осуществляется через смазочный слой жидкости, находящейся на момент образования контакта за счет наличия гидрокарманов при образовании упруго-несжимаемой рабочей смазочной жидкости, уменьшается шум, повышается долговечность и износостойкость зубчатой цилиндрической передачи, уменьшаются требования на точность изготовления зубчатых колес и цилиндрической передачи и обеспечивается возможность работы в форсированном режиме.

Ключевые слова: зубчатое колесо, цилиндрическая передача, неньютоневское состояние, рабочая жидкость, коэффициент трения, долговечность, износостойкость, форсированный режим.

The article describes a cylindrical gear transmission with the effect of non-Newtonian condition of the working fluid by performing hydrodynamic pockets on the leading involute profile cylindrical gears. Replacing parts of the sliding gear wheels on the friction bearings by creating zones of non-Newtonian fluid condition, is provided by repeatedly reducing the coefficient of friction, the contact is made via the lubricating fluid layer, which is at the moment of contact due to the presence hydrocarbon in the formation of elastic-incompressible working fluid lubricant, reduces noise, increases durability and wear resistance of cylindrical gear transmission reduced demands on the manufacturing accuracy of gears cylindrical transmission and provides an opportunity to work in forsirovanno mode.

Keywords: gear, cylindrical gear, non-Newtonian state, the working fluid, the coefficient of friction, durability, wear resistance, parsipanny mode.

В зубчатых скоростных и высоконагруженных передачах турбокомпрессоров, турбогенераторов, авиационных, корабельных, самоходных машинах, шпиндельных бабок тяжелых токарных станков с ЧПУ, коробок подач станков зубчатые колеса контактируют с использованием смазывающих жидкостей с регламентированной толщиной смазочного слоя жидкости.

Недостатками зубчатых цилиндрических передач является выкрашивание активных поверхностей и отслаивание поверхностных слоев зубьев, абразивный износ зубьев, пластические деформации зубьев и заедание. Напряжение при изгибе, превышающей предел выносливости, вызывает появление микротрещин, которые возникают в зоне максимальной концентрации напряжений, обычно в местах зубьев перехода в обод колеса [1, 2, 3, 4].

С целью повышения надежности зубчатой цилиндрической передачи с использованием эффекта неньютоневского состояния рабочей жидкости путем выполнения гидродинамических карманов на эвольвентном профиле ведущего цилиндрического зубчатого колеса. За счет создания эффекта неньютоневского состояния рабочей жидкости в зоне контактирования зубьев обеспечивается значительное уменьшение коэффициента трения, контакт осуществляется через смазочный слой жидкости, находящейся на момент образования контакта при окружной скорости $V \geq 3,0$ м/с. Поставленная задача решается тем, что в

зоне контакта эвольвентных поверхностей цилиндрических колес 2, выполняют специальные гидродинамические карманы выполнены на расстоянии $0,3 t$ от точки (a) до точки к (b) и на расстоянии $0,3 t$ от точки (d) до точки (c), где происходит переход трения-качения в трение скольжения (проскальзывания). На этом участке как раз и формируется повышенный износ зубчатых колес и концентрация пиковых нагрузок в зоне контактирования на эвольвентном профиле (рис. 1).

Для цилиндрических колес наибольший интерес с точки зрения повышения нагрузочной способности передачи представляет расчет толщины смазочного слоя в пяти характерных точках активного участка линии зацепления: в точках входа и выхода из зацепления в точках контактирования их в полюсе (рис.1).

Контактно-гидродинамический расчет толщины смазочного слоя в высокоскоростных, тяжелонагруженных, передающих максимальные крутящие моменты зубчатых передачах главных приводов тяжелых токарных станков определяется в первую очередь зависимостью вязкости смазочных жидкостей от давления и температуры. Контактно-гидродинамический расчет зубчатых передач базируется на основных положениях вязкости применяемых масел при высоких давлениях и температурах.

Заменяя участки скольжения зубчатых колес на трение-качения за счет создания зон неньютоневского

состояния рабочей жидкости обеспечивается многократно снижение коэффициента трения, контакт осуществляется через смазочный слой жидкости, находящейся на момент образования контакта за счет наличия гидрокарманов при образовании упруго-несжимаемой рабочей смазочной жидкости, уменьшается шум, повышается долговечность и износостойкость зубчатой цилиндрической передачи, уменьшаются требования на точность изготовления зубчатых колес и цилиндрической передачи [3, 5, 6].

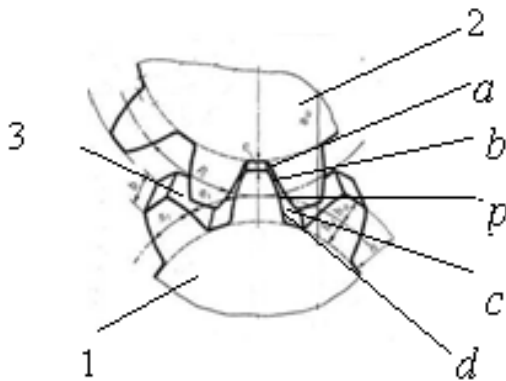


Рис. 1 – Схема зацеплений зубчатых колес

Наличие гидрокарманов на эвольвентной поверхности ведущей шестерни обеспечивают высокую несущую способность контактируемых эвольвентных поверхностей, в 7-10 раз снижение коэффициент трения в широком диапазоне частот вращения, демпфирования пульсационного нагружения зубчатых колес при входе и выходе и в зоне образование участка трения-скольжения и уменьшение влияния технологической наследственности образования погрешностей обработки сопряженных поверхностей зубчатых колес.

Смазочная жидкость, которая находится между контактирующими поверхностями зубьев при их вращении попадает в гидродинамические карманы расположены в один, два и более рядов и имеют специальное углубление.

Рассмотрим локализованный участок эвольвентной поверхности зуба шестерни как плоскую пластину, под углом зацепления θ к эвольвентной поверхности сопрягаемого зубчатого колеса в рабочей среде масляной жидкости.

Окружная скорость v направлена под углом β (рис. 2).

Сила, действующая на эвольвентную поверхность зубчатого колеса:

$$m \frac{d\vec{V}}{dt} = S_m \frac{1}{2} \rho v^2 C_t \vec{n} + S_m \frac{1}{2} \rho v^2 C_t \vec{t} \quad (1)$$

где S_m – площадь пластины на высоте 1/3 высоты зуба,

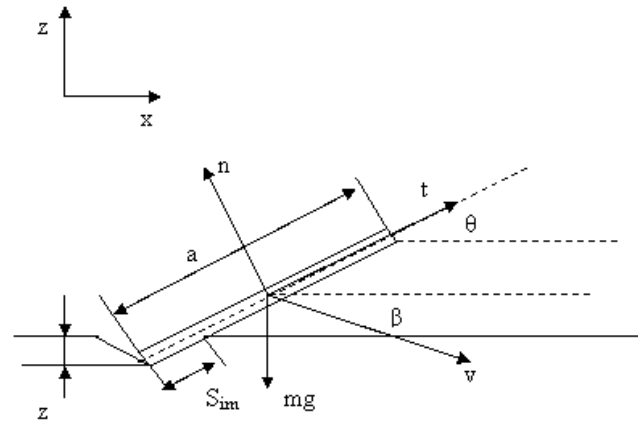


Рис. 2 – Локальная схема контактирования эвольвентных поверхностей сопрягаемых зубчатых колес для расчета гидродинамических карманов

m – масса давления на локальный участок зуба колеса,

V – окружная скорость,

C – коэффициент сопротивления со стороны рабочей жидкости (различный по направлению n и t).

Запишем уравнение в проекциях на оси x , y .

$$m \frac{dV_x}{dt} = -\frac{1}{2} \rho v^2 S_m (C_1 \sin \theta + C_t \cos \theta)$$

$$m \frac{dV_z}{dt} = -\frac{1}{2} \rho v^2 S_m (C_1 \sin \theta - C_t \cos \theta) - Mg \quad (2)$$

Далее будем считать, что за одно соприкосновение с рабочей жидкостью горизонтальная составляющая скорости не меняется, а квадрат скорости равен примерно квадрату горизонтальной составляющей, в процессе соприкосновения с поверхностью рабочей жидкости не изменяется угол наклона, коэффициент сопротивления C_t – пренебрежимо мал, угол θ – мал, так что $\cos \theta = 1$, а $\sin \theta = 0$. Тогда останется лишь второе уравнение из приведенных выше, которое можно переписать следующим образом:

$$\frac{d^2 z}{dt^2} + \omega_0^2 z + g = 0 \quad (3)$$

где

$$\omega_0^2 = \frac{\rho V^2 a C_1}{2m \sin \theta} \quad (4)$$

Линейное дифференциальное уравнение решается стандартными методами. Ллинейное уравнение получается из-за предположения о том, что сила сопротивления прямо пропорциональна толщине смазочного слоя, создаваемого гидрокарманом z , что и создает эффект неньютоновского состояния рабочей жидкости в зоне контактирования зубчатых колес. То есть движение, или перекачивание эвольвентных поверхностей описывается известным гармоническим уравнением. Если амплитуда колебания приблизит контактные поверхности зубьев, толщина масляного слоя будет равна 0, сохранив при этом угол θ – то контакт будет непосредственно между эвольвентными поверхностями. Если рабочая жидкость перейдет с ньютоновского состояния в неньютоновское – то совершив колебание к контактированию, зуб шестерни

вернется на расстояние, равное толщине масляного слоя, создаваемого гидрокарманом, то есть контакт рабочих поверхностей зубьев будет происходить через упруго-несжимаемую рабочую жидкость.

Минимальная окружная кинематическая скорость зубчатой передачи для обеспечения неньютоновского состояния рабочей жидкости определяется из соотношения [3, 6]:

$$V = \sqrt{\frac{4Mg}{C_1 \rho a^2}} \quad (5)$$

Для зубчатых передач главных приводов высоконагруженных тяжелых токарных станков с целью обеспечения неньютоновского состояния рабочей жидкости, окружная скорость должна быть более 3 м/с.

Рабочая (смазочная) жидкость в неньютоновском состоянии становится упруго-несжимаемая благодаря углубленной форме гидродинамических карманов под действием сил нагрузки и обеспечивает снижение коэффициента трения, уменьшение шума, повышение плавности, долговечности и износостойкости цилиндрических колес, уменьшаются требования к точности изготовления цилиндрических колес.

Контакт эвольвентных зубчатых поверхностей цилиндрических колес осуществляется в основном за счет упруго-несжимаемой смазочной жидкости, которая находится в неньютоновском состоянии. В результате использования зубчатой цилиндрической передачи с гидродинамическими карманами обеспе-

чивается снижение коэффициента трения, уменьшение шума, повышение долговечности и износостойкости цилиндрических колес зубчатой цилиндрической передачи, уменьшение требований к точности изготовления цилиндрических колес.

Зависимость вязкости масла от температуры и особенно от давления в значительной степени определяет работоспособность зубчатых передач. Выполнены работы по исследованию зависимости вязкости масла от давления и температуры в условиях влияния высокого давления (до 1500 МПа) на вязкость масел, т.е. когда рабочая жидкость в зоне контактирования зубчатых колес переходит из ньютоновского состояния в неньютоновское.

На данный момент такие исследования по изучению контактно-гидродинамической теории смазки зубчатых передач в условиях неньютоновского состояния рабочей жидкости не проводились.

До начала проведения испытаний реологических характеристик масел для получения возможности использовать контактно-гидродинамический расчет определялись вязкостные свойства масел при давлениях до 500 МПа, и до 1500 МПа, при температурах 50, 60, 80, 120, 140 и 150° С. Экспериментальные результаты показаны на рис. 3.

Вязкость при высоких давлениях определялась при двух, трех и четырех различных температурах с учетом вязкости масел в ряде промежуточных значений температур (табл. 1). Поэтому для интерполяции и для экстраполяции была использована известная формула К. С. Рамайя.

Таблица 1 – Зависимость вязкости масла μ_0 от температуры

Масла	$\mu_0, (10\text{нс}\cdot\text{с})/\text{м}^2, \text{ при температурах } T, \text{ }^\circ\text{C}$			
	50	60	80	100
Нефтяные				
МС-20	0,01140	0,00760	0,00340	0,00184
МС-40	0,00265	0,002065	0,00105	0,000645
Веретенное-2	0,00116	0,000859	0,000476	0,000309
МК-8	0,000743	0,00055	0,000300	0,000204
Синтетические				
МН-7,5	0,00310	0,00214	0,001138	0,000691
БЗВ	0,00232	0,00163	0,000833	0,000526
ЛНМЗ-36/1 к	0,00101	0,000746	0,000435	0,000290
Масла	$\mu_0, (10\text{нс}\cdot\text{с})/\text{м}^2, \text{ при температурах } T, \text{ }^\circ\text{C}$			
	120	140	150	
Нефтяные				
МС-20	0,001050	0,000700	0,000575	
МС-40	0,000408	0,000300	0,000265	
Веретенное-2	0,000220	0,000175	0,000156	
МК-8	0,000156	0,000130	0,000122	
Синтетические				
МН-7,5	0,000487	0,000366	0,000320	
БЗВ	0,000349	0,000256	0,000220	
ЛНМЗ-Э6/1К	0,000220	0,000170	0,000152	

$$\mu_0 = e \left[c_2 + \frac{D_2}{T} \right]^2 \quad (6)$$

Несмотря на то, что эта формула получена для определения зависимости вязкости масла от температуры при атмосферном давлении, она, как показала проверка, с достаточной степенью точности пригодна и для определения связи между вязкостью и температурой при высоких давлениях.

Следует отметить, что вязкость некоторых масел, весьма адекватно подчиняется закону Барруса, т. е. в полулогарифмической системе координат логарифм вязкости линейно зависит от давления даже до давлений порядка 1200 МПа и температур до 120°С.

Масло МС-20 (ГОСТ 21743-81) – масло селективной очистки. Применяют в поршневых двигателях самолетов; в составе масло-смесей с маслами МС-8, МС-8п (в различных соотношениях) в смазочных системах турбовинтовых двигателей; в осевых шарнирах втулок винтов вертолетов; для смазывания мотокомпрессоров газоперекачивающих агрегатов, а также в качестве базового компонента для некоторых моторных масел и смазок цилиндрических зубчатых передач.

Вязкость масла является параметром, влияющим на передачу тепла как при естественной циркуляции масла в небольших трансформаторах, так и при принудительной циркуляции с помощью насосов в больших трансформаторах.

Динамическая вязкость определяется сопротивлением жидкости в потоке и равна отношению удельного давления к удельному ускорению. Кинематическая вязкость, нормируемая для масла, есть отношение динамической вязкости жидкости к ее удельному весу.

Обычно вязкость увеличивается с увеличением размеров молекул и молекулярного веса. С ростом температуры вязкость уменьшается. Характер зависимости кинематической вязкости от температуры виден из рис. 3. За единицу кинематической вязкости принимают 1 м²/с.

В стандартах приведены значения кинематической вязкости при разных температурах. Это позволяет правильно рассчитывать циркуляцию масла в трансформаторе и разработать правила выбора места и размеров охлаждающих каналов, например, в обмотках, а также барьеров, радиаторов и насосов.

Температура застывания – температура при которой жидкость перестает перемещаться. Этот показатель является мерой текучести при низкой температуре при изменяющихся условиях. Геометрия сосуда, в котором производится охлаждение, и способ охлаждения для определения этого показателя, стандартизированы.

При испытаниях отклонения от стандартной методики может привести к ошибке до 15°С.

Температурные вспышки в закрытом тигле – температура при которой пары над поверхностью нагретой жидкости при наличии воздуха могут быть воспламенены. Температура вспышки зависит от давления наиболее летучих горючих составляющих смеси газов.

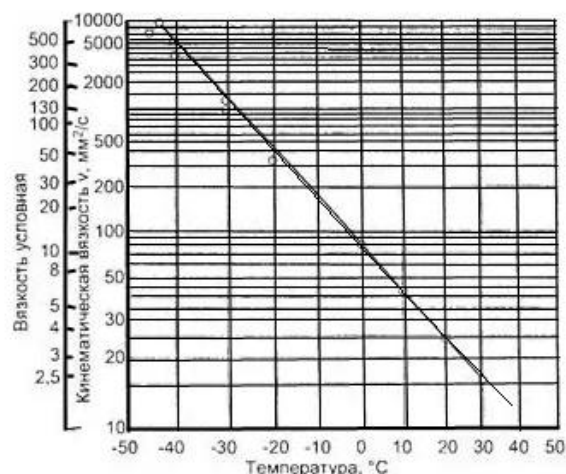


Рисунок 3 – Вязкость трансформаторного масла в зависимости от температуры

Геометрия сосуда (тигля) – объем пространства с газом, процесс нагревания и воспламенения регламентированы стандартами.

Температура вспышки для обычных товарных масел колеблется в пределах 130 – 170°С. Согласно ГОСТ 6356 – 75 она должна быть не ниже 125°С. Для арктического масла – в пределах от 90 до 115°С и зависит от фракционного состава, наличия относительно низкокипящих фракций и в меньшей степени от химического состава.

Минимальная температура вспышки масел регламентируется не столько по противопожарным соображениям, сколько с точки зрения возможности глубокой их дегазации.

В отношении пожарной безопасности большую роль играет температура самовоспламенения; это температура, при которой масло при наличии воздуха загорается самопроизвольно без подведения пламени. У трансформаторных масел эта температура около 350 – 400 °С.

Цвет свежего масла обычно свидетельствует о чистоте очистки. Для масла в эксплуатации высокий или увеличивающийся цветовой показатель свидетельствует о загрязнении или о старении масла, либо о том и другом.

Поверхностное натяжение – это сила в динах на сантиметр, требуемая, чтобы разорвать масляную пленку, существующую на границе раздела масла и воды. При загрязнении масла мылами, краской и продуктами окисления масла, прочность пленки уменьшается.

Уменьшение поверхностного натяжения масла в эксплуатации свидетельствует о загрязнении масла или об окислении масла и наличии в масле продуктов окисления.

Таким образом, пьезокоэффициент этого масла практически не зависит от давления.

У синтетических масел обнаруживается криволинейная зависимость логарифма вязкости от давления даже при давлениях 50000 нс/см². Следовательно, для этого масла пьезокоэффициент действительно является функцией давления (табл. 2).

Таблица 2 – Зависимость пьезокоэффициента вязкости ρ от температуры

Масла	$n \cdot 10^6$, м ² /кгс, при температурах T , °С						
	50	60	80	100	120	140	150
Нефтяные							
МС-20	0,225	0,207	0,178	0,145	0,113	0,063	0,066
75% МС-20 + 25% трансформаторного	0,206	0,192	0,165	0,137	0,109	0,062	0,068
50% МС-20 + 50% трансформаторного	0,192	0,160	0,1545	0,130	0,1066	0,081	0,0685
25% МС-20 + 75% трансформаторного	0,175	0,165	0,144	0,123	0,102	0,060	0,069
Веретенное-2 . .	0,128	0,1236	0,1139	0,105	0,0953	0,087	0,082
МК-8	0,159	0,150	0,132	0,114	0,0965	0,078	0,069
Трансформаторное	0,159	0,150	0,132	0,114	0,0965	0,078	0,069
Синтетические							
МН-7,5	0,126	0,1228	0,1114	0,101 .	0,090	0,079	0,074
ВНИИПП-7	0,1235	0,1200	0,1125	0,105	0,099	0,092	0,058
БЗВ	0,0837	0,0683	0,0830	0,0825	0,082	0,061	0,061
ЛНМЭ-36/1К	0,0925	0,0906	0,0840	0,0780	0,073	0,068	0,065
50-1-4Ф	0,0945	0,0910	0,0830	0,0770	0,071	0,0644	0,061

В табл. 1 и 2 приведены значения вязкости масел при атмосферном давлении и пьезокоэффициента вязкости n для ряда различных температур и сортов минеральных и синтетических масел.

Для расчета η_0 в этих точках по формуле (7) необходимо предварительно определить для каждой i -й точки приведенную кривизну $\lambda_{ai} \pm \lambda_{bi}$ в 1/м, расчетную погонную нагрузку K_0 в н/м, суммарную скорость качения $U_a + U_b$ в м/с, мгновенную температуру поверхностей зубьев T в °С, а также вязкости масла при атмосферном давлении μ_0 в н/м² и пьезокоэффициент вязкости n в м²/н при температуре T в °С. Приведенная кривизна для любой i -й точки подсчитывается по формулам

$$\lambda_{ai} \pm \lambda_{bi} = \frac{1000}{\rho_{пр i}}; \quad (7)$$

$$\frac{1}{\rho_{пр i}} = \frac{1}{\rho_{ai}} \pm \frac{1}{\rho_{bi}}, \quad (8)$$

где $\rho_{пр i}$ – приведенный радиус кривизны, мм; ρ_{ai} – радиус кривизны шестерни; ρ_{bi} – радиус кривизны зубчатого колеса; $\lambda_{ai} \pm \lambda_{bi}$ – приведенная кривизна, 1/м.

В точке входа в зацепление a радиус кривизны колеса

$$\rho_{bA_1} = \sqrt{R_{eb}^2 - r_{0b}^2} \quad (9)$$

Радиус кривизны шестерни

$$\rho_{aA_1} = A \sin \alpha - \sqrt{R_{eb}^2 - r_{0b}^2} \quad (10)$$

В точке выхода из зацепления d радиус кривизны шестерни

$$\rho_{aD} = \sqrt{R_{ea}^2 - r_{0a}^2}. \quad (10)$$

Радиус кривизны колеса

$$\rho_{bD} = A \sin \alpha - \sqrt{R_{ea}^2 - r_{0a}^2}. \quad (11)$$

В точке пересопряжения b радиус кривизны шестерни

$$\rho_{aB} = \sqrt{R_{ea}^2 - r_{0a}^2} - t_0. \quad (12)$$

Радиус кривизны колеса

$$\rho_{bB} = A \sin \alpha - (\sqrt{R_{ea}^2 - r_{0a}^2} - t_0). \quad (13)$$

В точке пересопряжения c радиус кривизны колеса

$$\rho_{bC} = \sqrt{R_{eb}^2 - r_{0b}^2} - t_0. \quad (14)$$

Радиус кривизны шестерни

$$\rho_{aC} = A \sin \alpha - (\sqrt{R_{eb}^2 - r_{0b}^2} - t_0). \quad (15)$$

В полюсе зацепления Π радиус кривизны колеса

$$\rho_{b\Pi} = r_b \sin \alpha. \quad (16)$$

Радиус кривизны шестерни

$$\rho_{a\Pi} = r_a \sin \alpha. \quad (17)$$

где R_{ea} , R_{eb} – радиусы окружностей выступов шестерни и колеса, мм;

r_{oa} , r_{ob} – соответственно радиусы основных окружностей шестерни и колеса, мм;

A – межцентровое расстояние, мм; α – угол зацепления;

r_a , r_b – радиусы начальных окружностей, мм; t_0 – основной шаг, мм;

$$t_0 = \pi m \cos \alpha;$$

m – модуль зацепления, мм;

α_0 – угол зацепления исходного контура.

Согласно работе [1] наиболее опасными точками зацепления в отношении заедания являются не точки a и d , а отстоящие от них на расстоянии $0,3m$ точки b и c . Поэтому необходимо рассчитывать толщину слоя смазки в этих точках. Соответствующие радиусы кривизны

$$\rho_{aa'} = \rho_{aa_1} + 0,3m; \rho_{ba'} = \rho_{ba_1} - 0,3m. \quad (18)$$

$$\rho_{ad'} = \rho_{ad} - 0,3m; \rho_{bd'} = \rho_{bd} + 0,3m. \quad (19)$$

Скорости качения в каждой точке линии зацепления определяются по формулам:

$$U_{ai} = \rho_{ai} \omega_a \cdot 10^{-3}; U_{bi} = \rho_{bi} \omega_b \cdot 10^{-3} \quad (20)$$

где ω_a , ω_b – соответственно угловые скорости шестерни и колеса, 1/с.

Расчетная погонная нагрузка K_0 определяется для зоны однопарного зацепления точек b , c , по формуле

$$K_{01} = k(K_{0п} + Q_d), \quad (21)$$

а в зоне двухпарного зацепления, точках a , b , c , d – по формуле

$$K_{011} = k[0,43(K_{0п} + Q_d)710\Delta_0], \quad (22)$$

где k – коэффициент расчетной нагрузки; K_{01} , K_{011} – погонная расчетная нагрузка в зонах одно- и двухпарного зацепления, н/м; $K_{0п}$ – полезная погонная нагрузка, н/м; Q_d – динамическая погонная нагрузка, н/м; Δ_0 – наиболее вероятная ошибка основного шага с учетом компенсирующей ошибки, мкм.

Гидрокарманы на эвольвентной поверхности ведущего зубчатого колеса обеспечивают высокую несущую способность конаткируемых эвольвентных поверхностей, малый коэффициент трения в широком диапазоне частот вращения, начиная со скорости 3м/с, высокое демпфирование пульсационного нагружения зубчатых колес зубчатой цилиндрической передачи при входе и выходе из зацепления и уменьшению технологической наследственности погрешностей обработки сопряженных поверхностей зубчатых колес цилиндрической передачи.



Рис. 4 – Ведущее зубчатое колесо с гидродинамическими карманами реверсивной зубчатой цилиндрической передачи

Мгновенную температуру масляного слоя в каждой точке линии зацепления T_i можно с некоторой погрешностью определить для стальных зубчатых колес как сумму объемной температуры зубчатого колеса T_0 и мгновенной температурной вспышки ΔT_i на поверхности зуба в зоне контакта по Блоку [13]:

$$T_i = T_0 + \Delta T_i \quad (23)$$

Естественно, что при значительном скольжении поверхностей температурная вспышка на сопряженных поверхностях будет различная. Результаты расчетов для характерных точек линии зацепления приведены в табл. 3.

Этим отличием можно пренебречь, так как для зубчатых передач в большинстве случаев оно приводит к незначительной погрешности в определении толщины смазочного слоя:

$$\Delta T_i = 0,185 f_{\text{Тр}i} \sqrt[4]{K_{oi}^2 (\lambda_{ai} \pm \lambda_{bi}) [\sqrt{U_{ai}} - \sqrt{U_{bi}}]} \quad (24)$$

Коэффициент трения $f_{\text{Тр}i}$ в каждой точке может быть определен по формуле [13].

$$f_{\text{Тр}i} = \frac{0,0316}{\sqrt[4]{\mu_0 (U_{ai}^2 - U_{bi}^2)}} \quad (25)$$

Здесь μ_0 определяется по температуре $T_0=75^\circ\text{C}$. Относительно гидродинамических карманов и выполняется расчет толщины слоя смазки, когда рабочая жидкость (смазка) переходит из ньютоновского состояния в неньютоновское.

Наличие гидродинамических карманов обеспечивает снижение коэффициента трения и полностью исключает трения скольжения, контакт осуществляется через смазочный слой жидкости, находящейся на момент образования контакта в неньютоновском состоянии с образованием упруго-несжимаемого смазочного слоя.

Таблица 3 - Расчет прямозубой цилиндрической зубчатой передачи

Расчетный параметр	Расчетные точки				
	a'	b	p	c	d'
ρ_{ai} , мм	8,72	11,51	15,02	17,26	20,05
ρ_{bi} , мм	23,37	20,58	17,07	14,83	12,04
$\lambda_{ai} + \lambda_{bi}$, 1/м	157,5	135,6	125,0	125,3	132,8
U_{ai} , м/с	5,60	7,65	9,98	11,48	13,33
U_{bi} , м/с	13,67	12,04	9,98	8,68	7,04
$U_{ai} + U_{bi}$, м/с	19,47	19,69	19,96	20,16	20,37
$U_{ai} - U_{bi}$, м/с	-7,87	-4,39	0	2,8	6,29
$i_{тр}$	0,041	0,047	-	0,053	0,043
ΔT_i , °C	25,1	21,0	0	14,5	19,5
T_i , °C	100,1	96,0	75	89,5	94,5
μ_o , кгс·с/м ²	0,00108	0,00120	0,00227	0,00142	0,00124
$n \cdot 10^6$, м ² /кгс	0,136	0,142	0,171	0,151	0,145
K_o , кгс/м	6515	10 010	10 010	10 010	6515
h , мкм	0,47	0,52	0,99	0,65	0,61

В результате образования неньютоновского состояния жидкости с помощью специальных гидродинамических карманов передача крутящего момента от шестерни к колесу осуществляется за счет перехода жидкости в зоне контактирования эвольвентных поверхностей в упруго несжимаемое состояние. Происходит адаптивное контактное сопряжение профилей эвольвенты за счет наличия упруго несжимаемой жидкости, т.е. упруго-несжимаемая жидкость выполняет роль демпфирующего амортизатора.

Такое саморегулирование демпферного слоя позволяет изготавливать зубчатые закаленные передачи без зубошлифования, но с обязательным выполнением стабилизирующих операций после закалки зубьев.

В результате уменьшается шум, повышается нагруженная способность, долговечность и износостойкость зубчатой цилиндрической передачи, уменьшаются требования по точности изготовления зубчатых колес.

Выводы.

1. Создание эффекта неньютоновского состояния рабочей жидкости в зоне контактирования зубьев обеспечивает значительное уменьшение коэффициента трения, контакт осуществляется через смазочный слой жидкости, находящейся на момент образования контакта при окружной скорости $V \geq 3,0$ м/с.

2. Поставленная задача решается тем, что в зоне контакта эвольвентных поверхностей цилиндрических колес выполняют специальные гидродинамические карманы на расстоянии $0,3 m$ от точки (a) до точки (b) и на расстоянии $0,3 m$ от точки (d) до точки (c), где происходит переход трения-качения в трение скольжения (проскальзывания).

3. Контакт эвольвентных зубчатых поверхностей цилиндрических колес осуществляется в основном за счет упруго-несжимаемой смазочной жидкости, которая находится в неньютоновском состоянии.

4. Зависимость вязкости масла от температуры и особенно от давления в значительной степени определяет работоспособность зубчатых передач.

5. Динамическая вязкость определяется сопротивлением жидкости в потоке и равна отношению удельного давления к удельному ускорению

6. Гидрокарманы на эвольвентной поверхности ведущего зубчатого колеса обеспечивают высокую несущую способность контактируемых эвольвентных поверхностей, малый коэффициент трения в широком диапазоне частот вращения, высокое демпфирование пульсационного нагружения зубчатых колес зубчатой цилиндрической передачи при входе и выходе из зацепления и уменьшению технологической наследственности погрешностей обработки сопряженных поверхностей зубчатых колес

7. Происходит адаптивное контактное сопряжение профилей эвольвенты за счет наличия упруго несжимаемой жидкости, т.е. упруго-несжимаемая жидкость выполняет роль демпфирующего амортизатора.

Список литературы

1. Специальные технологии зубообработки крупномодульных закаленных колес: монография / Ю. В. Тимофеев, В. Ф. Шаповалов, А. А. Клочко [и др.]. – Краматорск: ДГМА, 2011. – 128 с.
2. Клочко А. А. Области оптимального управления параметрами точности, качества и производительности зубообработки закаленных крупномодульных зубчатых колес / А. А. Клочко, Ю. В. Тимофеев, А. Н. Шелковой // Надежность инструмента и оптимизация технологических систем: сб. науч. тр. – Краматорск: ДГМА, 2012. – Вып. 32. – С. 332–343.
3. Исследование гидродинамических свойств высокоскоростных тяжело нагруженных зубчатых цилиндрических передач тяжелых токарных станков / В. Д. Ковалев, А. А. Клочко, Д. А. Кравченко, Е. Н. Киреев // Надежность инструмента и оптимизация технологических систем: сб. науч. тр. – Краматорск: ДГМА, 2012. – Вып. 31. – С. 79–93.
4. Шелковой А. Н. Усовершенствование конструкции зубчатых передач / А. Н. Шелковой, А. А. Клочко, Н. С. Равская, С. Воробьев, С. Ю. Палашек // Качество, стандартизация, контроль, теория и практика: Материалы 14-й Международной научно-практической конференции, 23–26 сентября 2014 г., г. Одесса. – Киев: АТМ Украины, 2014. – С. 137.
5. Клочко А. А. Технологические основы обеспечения процесса зубообработки закаленных крупномодульных зубчатых колес

[Текст] / А. А. Клочко, А. Н. Кравцов; Донбасская государственная машиностроительная академия; Закрытое акционерное об-во "ОНИКС" - Краматорск: ДГМА; Ирбит: ОНИКС, 2014 – 299 с.: ил., табл.; - (Серия: "Проектирование и применение режущего инструмента в машиностроении" / Общ. ред. Ю.М. Соломенцев).

6. Контактно-гидродинамическая проблема высокоскоростных цилиндрических зубчатых передач тяжелых токарных станков / В. Д. Ковалев, А. Н. Шелковой, А. А. Клочко, Д. А. Кравченко, А. Н. Кравцов // Збірник наукових праць. Прогресивні технології в машинобудуванні: Тези докладів III-ої Всеукраїнської науково-технічної конференції, 2-6 лютого 2015 р. – Національний університет «Львівська політехніка». – Львів, 2015. – С. 56.

Bibliography (transliterated)

1. Timofeev Ya.V., Shapovalov V.F., Klochko A.A. [et al.]. *Specialnye tehnologi zuboobrabotki krupnomodulnykh zakalennykh koles: monografiya* [Special tooth technology coarse-grained processing of hardened wheels: monograph]. Kramatorsk, DSEA, 2011, 128 p.
2. Klochko A.A., Timofeev Ya.V., Shelkovi A.N. Oblasti optimalnogo upravleniya parametrami tochnosti, kachestva i proizvoditelnosti zuboobrabotki zakalennykh krupnomodulnykh zubchatykh koles [Areas of optimal control parameters of accuracy, quality and performance of gear treatment gear tempered coarse-grained] *Nadezhnost instrumenta i optimizatsiya tehnologicheskikh sistem: sb. nauch. tr.* 2012, vol.32, pp. 332-343.
3. Kovalev V. D., Klochko A. A., Kravchenko D. A., Kyreev E. N. Issledovanie gidrodinamicheskikh svoystv vyisokoskorostnykh tyazhelonagruzhennykh zubchatykh tsilindricheskikh pere-dach tyazhelykh tokarnykh stankov [Investigation of hydrodynamic properties of high-speed heavy-duty gear-governmental cylindrical cottages heavy lathes]. *Nadezhnost instrumenta i optimizatsiya tehnologicheskikh sistem: sb. nauch. tr.* 2012, vol.31, pp. 79-93.
4. Shelkovi A.N., Klochko A.A., Ravskaya N. S., Vorobev S., Palashek S. Iu. Uovershenstvovanie konstruktivnykh zubchatykh peredach [Improving the design of gears]. *Kachestvo, standartizatsiya, kontrol, teoriya i praktika: Materialy 14-y Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii (23-26 sentyabrya 2014, Odessa. – Kiev)*. [Quality, standardization, control, Theory and Practice: Proceedings of the 14th International Scientific and Practical Conference (23-26 September 2014, Odessa-Kiev)], Kiev, ATM Ukraine, 2014, p.137.
5. Klochko A.A., Kravtsov A.N. *Tehnologicheskoe osnovy obespecheniya protsessa zuboobrabotki zakalennykh krupnomodulnykh zubchatykh koles* [Technological foundations for coarse-grained gear treatment process hardened gears]. Donbasskaya gosudarstvennaya mashinostroitelnaya akademiya; Zakrytoe aktsionerное ob-vo "ONIKS". Kramatorsk, DSEA , Irbit, ONIKS, 2014, 299 p.
6. Kovalev V. D., Shelkovi A. N., Klochko A. A., Kravchenko D. A., Kravtsov A. N. Kontaktно-gidrodinamicheskaya problema vyisokoskorostnykh tsilindricheskikh zubchatykh peredach tyazhelykh tokarnykh stankov [Contact-hydrodynamic problem of high-speed cylindrical gears heavy lathes]. *Zbirnik naukovykh prats. Progresivni tehnologiyi v mashi-nobuduvanni: Tezi dokladiv III-oYi VseukraYinskoYi naukovo-tehnichnoYi konferentsiyi, (2-6 lyutogo 2015, Lviv)*. [Collected Works. Advanced technologies in machine-nobuduvanni: Theses reports first III-Ukrainian scientific-technical conference (2-6 February 2015, Lviv)], Lviv, National University "Lviv Polytechnic", 2015, p. 56.

Поступила (received) 24.05.2016

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic description

Вперше у світовій практиці. Зубчасті передачі з ефектом неньютонівської стану робочої рідини / О.М. Шелковий, О.О. Клочко, Є.В. Басова // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. – Х.: НТУ «ХПІ», 2016. – № 5 (1177). – С. 96–103. – Бібліогр.: 6 назв. – ISSN 2079-0023.

Впервые в мировой практике. Зубчатые передачи с эффектом неньютоновского состояния рабочей жидкости / А.Н. Шелковой, А.А. Клочко, Е.В. Басова// Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – № 5 (1177). – С. 96-103. – Библиогр.: 6 назв. – ISSN 2079-0023.

For the first time in world practice. Gear effect minutesago state of the working fluid / A.N. Shelkovoy, A.A. Klochko, E.V. Basova // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technologies in mechanical engineering. – Kharkov: NTU "KhPI", 2016. – No. 5 (1177). – P. 96-103. – Bibliogr.: 6. – ISSN 2079-0023.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Шелковий Олександр Миколайович – докт. техн. наук, проф., НТУ «ХПІ»; тел.: (057)-720-66-25;

Шелковий Олександр Николаевич - докт. техн. наук, проф., НТУ «ХПІ»; тел.: (057) -720-66-25;

Shelkovyi Olexsandr Mykolaiovych – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», tel.: (057)-720-66-25;

Клочко Олександр Олександрович - докт. техн. наук, проф. НТУ «ХПІ»; тел.: (057) -720-66-25;

Клочко Александр Александрович – докт. техн. наук, проф. НТУ «ХПІ»; тел.: (057)-720-66-25;

Klochko Aleksandr Aleksandrovych – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», tel.: (057)-720-66-25;

Басова Євгенія Володимирівна - канд. техн. наук, доц. НТУ «ХПІ», тел.: (057) -720-66-25, e-mail: evgeniya.ivashchenko@mail.ru;

Басова Евгения Владимировна – канд. техн. наук, доц. НТУ «ХПІ», тел.: (057)-720-66-25, e-mail: evgeniya.ivashchenko@mail.ru;

Basova Evhenyia Vladymyrovna – Candidate of Technical Sciences, Docent of National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», tel.: (057)-720-66-25; e-mail: evgeniya.ivashchenko@mail.ru.

УДК 6219.2

*Е. В. МИРОНЕНКО, С. Л. МИРАНЦОВ, В. Л. АНОСОВ***ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССОВ ОБРАБОТКИ НА ТЯЖЕЛЫХ СТАНКАХ ФРЕЗЕРНО-РАСТОЧНОЙ ГРУППЫ**

Розглядається задача підвищення енергоефективності механічної обробки на важких верстатах фрезерно-розточувальної групи при обробці великогабаритних корпусних деталей за рахунок використання удосконалених конструкцій збірних торцевих фрез з поділом шару, що зрізається

Ключові слова: енергоефективність, важкі верстати, механічна обробка, динаміка, збірні торцеві фрези.

Рассматривается задача повышения энергоэффективности механической обработки на тяжелых и уникальных станках фрезерно-расточной группы при обработке крупногабаритных корпусных деталей за счет применения усовершенствованных конструкций сборных торцевых фрез с делением срезаемого слоя.

Ключевые слова: энергоэффективность, тяжелые станки, механическая обработка, динамика, сборные тоцовые фрезы.

We consider the problem of energy efficiency of mechanical processing of heavy and unique machines, milling-boring group when processing large body parts through the use of improved designs teams face mills with the division of the shear layer

Keywords: energy efficiency, heavy machinery, machining, dynamics, modular end mill.

Введение. Процессы механической обработки в тяжелом машиностроении, в определенной степени, следуют в своем развитии и совершенствовании теми же путями, что и развитие технологии обработки деталей в серийном производстве, с учетом особенностей данной отрасли машиностроения. Повышение эффективности технологических процессов происходит за счет интенсификации режимов резания, расширения использования высокопроизводительных методов механической обработки (фрезерование, протягивание, накатывание резьбы и др.), сокращения вспомогательного времени. Существенное значение имеет применение более совершенных станков, обеспечивающих не только возможность интенсификации процессов резания, но и уменьшение затрат времени на установку деталей, достижение заданной точности размеров и управление станком.

Однако современные экономические условия, в которых работают машиностроительные и станкостроительные предприятия, требуют в настоящее время не только непрерывного роста производительности механической обработки, но и сокращения потребления энергетических ресурсов. В связи с этим задачи повышения энергоэффективности процессов механической обработки на тяжелых и уникальных станках являются в настоящее время актуальными.

Рассматривая баланс потребления мощности при обработке, на примере обрабатывающего центра, установлено, что основным ее потребителем выступает приводная группа станка 43%, причем на шпиндельную группу приходится большая часть потребления активной 14% (процесс резания) и пассивной 13% (холостые ходы) мощности [1].

Таким образом, исходя из приведенного примера потребления мощности оборудованием, задача повышения энергоэффективности механической обработки может решаться двумя способами: за счет снижения энергопотребления процесса резания при сохранении заданного уровня производительности и точности обработки и за счет сокращения времени обработки,

то есть сокращения вспомогательного времени и времени холостых ходов оборудования.

При этом решение задачи повышения энергоэффективности процессов механической обработки первым способом предполагает, в первую очередь, разработку инструментальных систем, которые позволят при заданном уровне производительности и точности снизить уровень энергопотребления.

В данной работе рассматривается задача повышения энергоэффективности механической обработки применительно к тяжелым станкам фрезерно-расточной группы (6532, 6565, 6570, 1580, 6M610-16) с размерами стола $B \times L = (6300 \dots 12000)$ мм при обработке крупногабаритных корпусных деталей массой до $m = 10$ тонн за счет совершенствования конструкций сборных торцевых фрез с делением срезаемого слоя.

Основная часть. Среди параметров процесса резания и параметров технологической системы тяжелых и уникальных станков фрезерно-расточной группы основными, определяющими потребляемую процессом суммарную мощность, являются: скорость резания (V , м/мин), подача (S , мм/об), глубина резания (t , мм), размеры твердосплавных пластин (h , l , мм), а также динамические свойства технологической системы: жесткость и виброустойчивость. При этом характерной особенностью рассматриваемого оборудования является то, что на различных операциях существуют значительные отличия в жесткости и виброустойчивости элементов технологической системы.

Для исследований закономерностей протекания процессов фрезерования с делением срезаемого слоя, а также определения рациональной схемы деления срезаемого слоя и улучшения динамических параметров процесса резания использованы усовершенствованные авторами структурные и математические модели.

Структурная динамическая модель технологической системы (рис. 1) включает в себя: процесс резания и сопутствующие процессы ($W_{np}(s)$, $x_{ви}$), эквивалентную упругую систему станка ($W_{cm}(s)$), подсисте-

мы сборного инструмента ($W_{ин}(s)$) и процесс движения зуба фрезы по следу предыдущего зуба.

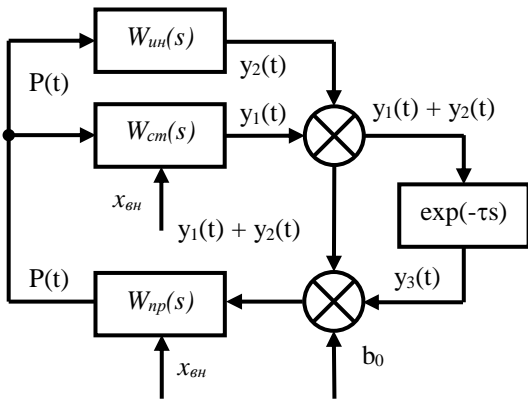


Рис. 1 – Структурная модель динамической системы станка

Структурная модель эквивалентной упругой системы станка $W_{см}(s)$ основана на конструкции и конструктивных особенностях продольно-фрезерного станка 6М610-16 (рис. 2).



Рис. 2 – Общий вид фрезерного станка мод. 6М610-16

Для построения модели эквивалентной упругой системы станка использовались методики [3, 4, 5] и допущения, предложенные авторами работ [2, 4, 5]. С учетом принятых допущений эквивалентная упругая система станка, представлена в виде одномассовой линейной системы с двумя степенями свободы: упругими перемещениями инструмента по направлению координатных осей X и Y.

С учетом принятых допущений технологическая система совершающая процесс резания, представлена в виде одномассовой линейной системы с двумя степенями свободы: упругими перемещениями инструмента по направлению координатных осей X и Y (рис. 3).

Для составления уравнений движения элементов системы воспользуемся уравнением Лагранжа второго рода.

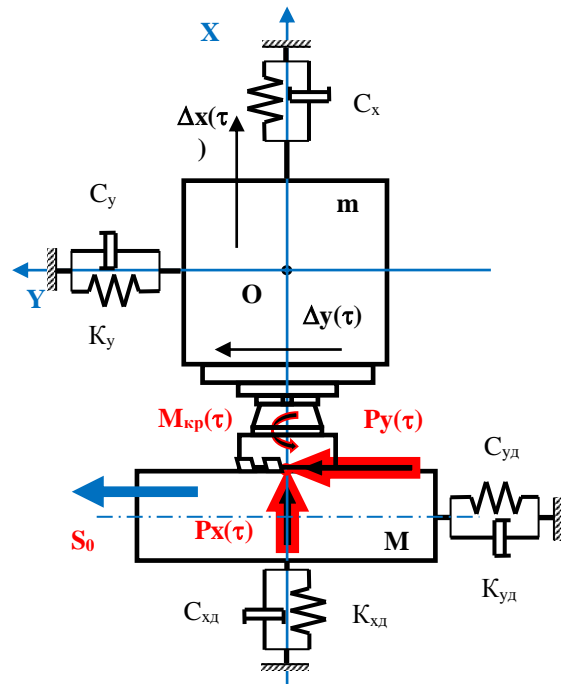


Рисунок 3 – Структурная модель технологической системы вертикально-фрезерного станка, включающая в себя инструмент

Уравнения движения элементов системы будут представлять собой систему дифференциальных уравнений второго порядка, относительно переменных $x(\tau)$ – упругого перемещения инструмента в направлении оси X и $y(\tau)$ – упругого перемещения инструмента в направлении оси Y:

$$\begin{cases} m\ddot{x}(\tau) + C_x\dot{x}(\tau) + K_x x(\tau) = P_x(\tau); \\ m\ddot{y}(\tau) + C_y\dot{y}(\tau) + K_y y(\tau) = P_y(\tau); \end{cases} \quad (1)$$

где m – приведенная масса системы;

C_x, C_y – приведенные коэффициенты демпфирования элементов системы, Н с/мм;

K_x, K_y – приведенные коэффициенты жесткости элементов системы, Н/мм;

$P_x(\tau), P_y(\tau)$ – переменные составляющие силы резания, Н.

В качестве модели процесса резания рассматривается функциональная зависимость силы резания от физико-механических свойств обрабатываемого материала, площади срезаемого слоя и геометрических параметров режущего инструмента [3, 4].

В этом случае выражение, описывающее силу резания, примет вид:

$$P(\tau) = K \cdot a(\tau) b(\tau). \quad (2)$$

где K – коэффициент, зависящий от физико-механических свойств обрабатываемого материала, геометрических параметров инструмента, Н/мм²;

$a(\tau), b(\tau)$ – соответственно толщина срезаемого слоя и ширина срезаемого слоя, определяемые заданной глубиной резания и подачей инструмента, мм.

При колебаниях в технологической системе, которые возникают при фрезеровании, в том числе из-за периодического врезания зубьев инструмента в обрабатываемую деталь с частотой $\omega = n z_{\phi}$ (n – частота вращения фрезы, z_{ϕ} – число зубьев), происходят упругие перемещения инструмента Δx и Δy относительно обрабатываемой детали. При этом, толщина $a(\tau)$ и ширина $b(\tau)$ среза являются переменными величинами и зависят от этих упругих перемещений.

Рассмотрим изменение площади срезаемого слоя при фрезеровании, вызванное упругие перемещения инструмента относительно обрабатываемой детали (рис. 4).

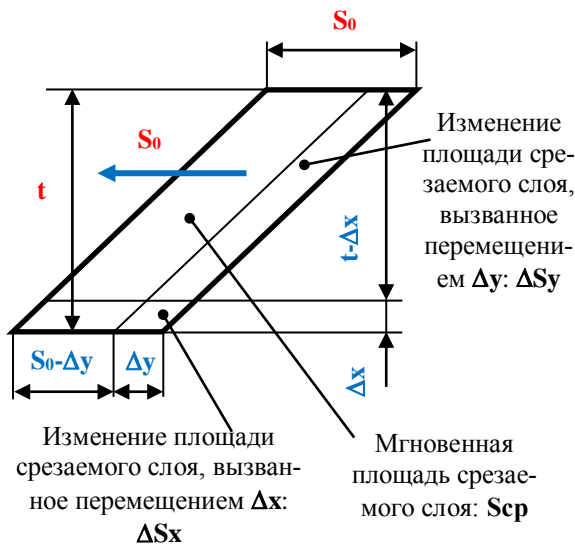


Рисунок 4 – Схема изменение площади среза при фрезеровании торцевой фрезой, вызванное колебаниями инструмента по осям X и Y

Изменение толщины и ширины срезаемого слоя вызывает, соответственно, изменение мгновенной площади срезаемого слоя каждым зубом инструмента $S_{cp}(\tau)$, что в свою очередь приводит к изменению и составляющих силы резания $P_x(\tau)$, $P_y(\tau)$.

При упругом перемещении инструмента в направлении оси X, площадь срезаемого слоя S_{cp} изменяется на величину $\Delta S_x(\tau) = S_0(t_0 - \Delta x(\tau))/\sin \varphi$, а при перемещении в направлении оси Y, площадь изменяется на величину $\Delta S_y(\tau) = t_0(S_0 - \Delta y(\tau))$.

Таким образом, мгновенная площадь срезаемого слоя в любой момент времени с учетом упругих перемещений инструмента вдоль выбранных направлений осей координат, будет определяться выражением:

$$S_{cp}(\tau) = (t_0 - \Delta x(\tau))(S_0 - \Delta y(\tau))/\sin \varphi. \quad (3)$$

где t_0 , S_0 – соответственно, глубина резания и подача на один зуб фрезы;

$\Delta x(\tau)$, $\Delta y(\tau)$ – упругие перемещения инструмента вдоль выбранных направлений осей координат.

С учетом выражений (2) и (3), получаем зависимости, определяющие изменение составляющих силы резания в процессе колебаний инструмента:

$$\begin{aligned} P_x(\tau) &= K_{px} K_{\varphi} (S_0 - y(\tau))(t_0 - x(\tau)) / \sin \varphi; \\ P_y(\tau) &= K_{py} K_{\varphi} (S_0 - y(\tau))(t_0 - x(\tau)) / \sin \varphi; \end{aligned} \quad (4)$$

где $K_{\varphi} = 1$ – коэффициент, зависящий от угла φ .

Коэффициент K_{φ} учитывает влияние главного угла в плане на величину S_{cp} , а именно, $K_{\varphi} = 1$, если все зубья фрезы имеют одинаковый угол в плане и срезают одинаковую площадь без учета колебаний инструмента относительно обрабатываемой детали.

Кроме того, учитывая влияние следа обработки предыдущим зубом фрезы, а также наличие технологических случайных и систематических погрешностей $X_{en}(\tau)$ и $Y_{en}(\tau)$, можно окончательно записать зависимости, определяющие изменение составляющих силы резания:

$$\begin{aligned} P_x(\tau) &= K_{px} K_{\varphi} (t_0 + X_{en}(\tau) - x(\tau) - x(T)) \times \\ &\times (S_0 - y(\tau) - y(T)) / \sin \varphi; \\ P_y(\tau) &= K_{py} K_{\varphi} (S_0 + Y_{en}(\tau) - y(\tau) - y(T)) \times \\ &\times (t_0 - x(\tau) - x(T)) / \sin \varphi; \end{aligned} \quad (5)$$

где T – время поворота фрезы на один зуб, с.

Выполняя подстановку полученных выражений для составляющих силы резания $P_x(\tau)$ и $P_y(\tau)$, система уравнений (1), описывающая колебания в рассматриваемой технологической системе, принимает вид:

$$\begin{cases} m\ddot{x}(\tau) + C_x \dot{x}(\tau) + K_x x(\tau) = \\ = K_{px} K_{\varphi} (t_0 + X_{en}(\tau) - x(\tau) - x(T))(S_0 - y(\tau) - y(T)) / \sin \varphi; \\ m\ddot{y}(\tau) + C_y \dot{y}(\tau) + K_y y(\tau) = \\ = K_{py} K_{\varphi} (S_0 + Y_{en}(\tau) - y(\tau) - y(T))(t_0 - x(\tau) - x(T)) / \sin \varphi; \end{cases} \quad (6)$$

Полученная система дифференциальных уравнений (6) представляет собой математическую модель технологической системы при фрезеровании торцевой фрезой.

Для моделирования процесса фрезерования выполнена программная реализация модели (6) в программной среде Simulink (рис. 5).

В приведенной на рис. 5 структурной модели Simulink, приняты следующие обозначения:

Constant 2, *Constant 3* – значение удельных составляющих силы резания P_x , P_y , Н/мм²;

Constant 1, *Constant 4* – время поворота фрезы на один зуб, с;

Transfer Fnc1 – блок передаточной функции $W_x(s)$ системы, определяющий зависимость упругого перемещения Δx от составляющей силы резания $P_x(\tau)$,

$$\begin{aligned} W_x(s) &= \frac{1}{ms^2 + C_x s + K_x} = \\ &= \frac{1/K_x}{(m/K_x)s^2 + (C_x/K_x)s + 1} = \frac{1/K_x}{T_{11}s^2 + T_{12}s + 1}; \end{aligned}$$

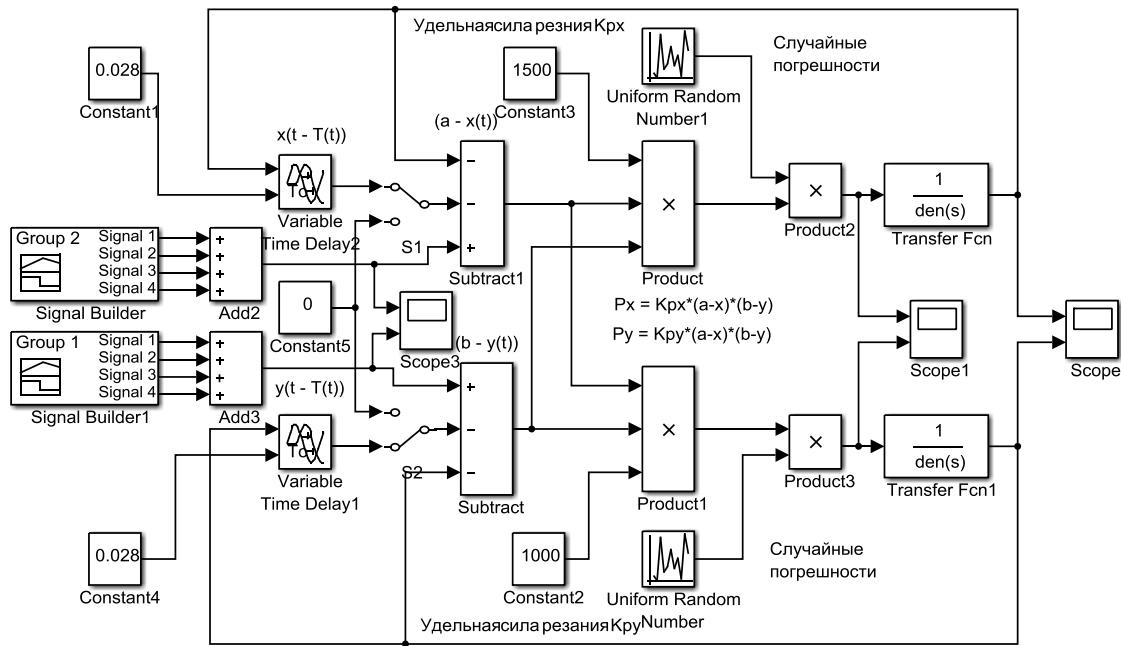


Рисунок 6 – Модель технологической системы, реализованная в среде Simulink

Transfer Fnc2 – блок передаточной функции $W_y(s)$ системы, определяющий зависимость упругого перемещения Δy от составляющей силы резания $P_y(\tau)$;

$$W_y(s) = \frac{1}{ms^2 + C_y s + K_y} = \frac{1/K_y}{(m/K_y)s^2 + (C_y/K_y)s + 1} = \frac{1/K_y}{T_{21}s^2 + T_{22}s + 1};$$

Variable Time Delay1, Variable Time Delay2 – блоки передаточных функций $W_{x\tau}(s)$, $W_{y\tau}(s)$ определяющие запаздывание, возникающее вследствие движения режущей кромки зуба фрезы по следу предыдущего прохода:

$$W_{x\tau}(s) = \exp(-\tau s), \quad W_{y\tau}(s) = \exp(-\tau s),$$

где τ – время поворота фрезы на один зуб;

Signal Builder1, Signal Builder2 – блоки, определяющие диаграммы изменения толщины и ширины срезаемого слоя при врезании и выходе из заготовки зубьев фрезы (рисунок 4.8).

Band-Limited White Noise 1, Band-Limited White Noise2 – Блоки передаточных функций, моделирующие наличие в технологической системе случайных факторов.

В качестве входного сигнала в предложенной структурной модели процесса фрезерования используются два блока *Signal Builder* и *Signal Builder1*, которые задают начальную толщину и ширину срезаемого слоя зубом фрезы. При этом формируемые значения имитируют процесс увеличения суммарной площади срезаемого слоя при врезании зубьев инструмента при его повороте.

В качестве примера на рисунке 7 приведена временная диаграмма расчетных упругих перемещения

инструмента по направлению осей X и Y ($t = 10$ мм, $S_z = 0,15$ мм/зуб, $n = 3$ с⁻¹, $z = 12$, число одновременно работающих зубьев – 4).

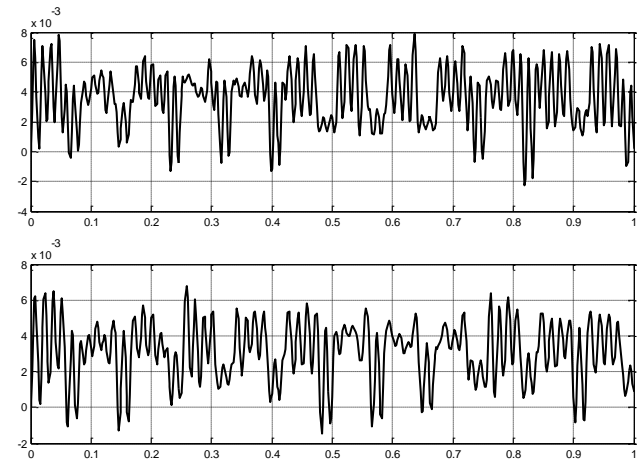


Рис. 7 – Расчетные упругие перемещения инструмента по направлению осей X и Y , $t = 10$ мм, $S_z = 0,15$ мм/зуб, $n = 3$ с⁻¹, $z = 12$

С использованием модели технологической системы были проведены исследования различных способов деления срезаемого слоя на части. Площадь срезаемого слоя делилась равномерно по толщине срезаемого слоя, равномерно по толщине срезаемого слоя и на третьем этапе исследовалось комбинированное деление среза по толщине и по ширине одновременно.

В результате проведенных серий аналитических экспериментов было установлено, что наибольший эффект наблюдается при комбинированном неравномерном делении срезаемого слоя.

Для конструктивной реализации комбинированной схемы деления срезаемого слоя использовался оптимизационный морфологический синтез сборного инструмента с использованием «прямого» алгоритма [6], что дало возможность предложить рациональную схему деления срезаемого слоя и предложить усовершенствованную конструкцию сборной торцевой фрезы с делением среза. Схема деления срезаемого слоя и конструкция фрезы приведены на рис. 8

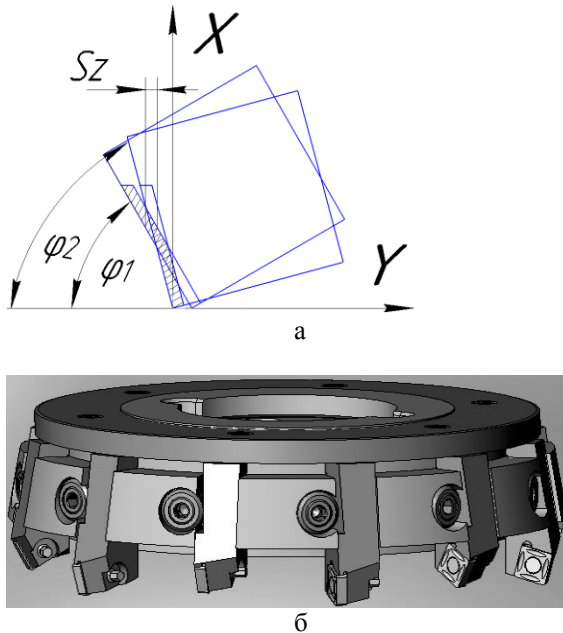


Рис. 8 – Схема деления площади срезаемого слоя и конструкция усовершенствованной сборной торцевой фрезы:
а – схема деления площади срезаемого слоя;
б – конструкция усовершенствованной сборной торцевой фрезы

Применение одной предложенной схемы деления срезаемого слоя на части позволит повысить энергоэффективность процесса фрезерования торцевыми фрезами за счет снижения крутящего момента на шпинделе станка и мощности резания без потери производительности при заданных режимах обработки.

Выводы. В результате проведенных аналитических исследований закономерностей процессов фрезерования торцевыми фрезами было установлено, что рациональным способом снижения мощности является комбинированное деление срезаемого слоя по толщине и ширине среза.

С использованием оптимизационного морфологического синтеза сборного инструмента предложена усовершенствованная конструкция сборной торцевой фрезы, обеспечивающей деление срезаемого слоя,

реализованного путем установки режущих пластин в корпусе фрезы с разными углами в плане.

Список литературы

1. Колесников А. А. Оценка энергетической и экономической эффективности металлорежущих станков / А. А. Колесников, Ханс-Иохим Кориат // 13-я международная специализированная выставка «Оборудование, приборы и инструменты для металлообрабатывающей промышленности». Сборник тезисов докладов – М.: ЗАО «Экспоцентр», 2012. – С.12 – 13.
2. Левин А. И. Математическое моделирование в исследованиях и проектировании станков. - М.: Машиностроение, 1978. - 184 с.
3. Жарков И. Г. Вибрации при обработке лезвийным инструментом. – Л., 1986. – 184 с.
4. Гузенко В. С. Общие вопросы методики исследования колебательных элементов станка / В. С. Гузенко, Г. Г. Коткин, С. Л. Миранцов // Надежность режущего инструмента и оптимизация технологических систем. Научно-технический сборник. – Краматорск: ДГМА, ЗАО «НКМЗ», 1999. - С.100-110.
5. Струтинский В. Б. Математичне моделювання металорізальних верстатів. – Житомир: ЖІТІ, 2002. – 544с.
6. Мироненко Е. В. Оптимизационный морфологический синтез для проектирования сборных торцевых фрез с заданными свойствами / Е. В. Мироненко, В. Л. Аносов // Проблемы проектирования и автоматизации машиностроительных производств : сб. науч. тр. – Волгоград : ВолгГТУ ; Тольятти : Ирбит : ОНИКС, 2013. – С.96 – 106.

References (transliterated)

1. Kolesnikov A.A. *Otsenka energeticheskoy i ekonomicheskoy effektivnosti metallorazhushchih stankov* [Evaluation of power and economical efficiency of machine tools] / A.A. Kolesnikov, Hans-Iohim Koriat // *Trinadsataya mezhndunarodnaya spetsializirovannaya vyistavka «Oborudovanie, pribory i instrumentyi dlya metalloobrabatyvayushey promyshlennosti»*. *Sbornik tezisev dokladov [13th International Specialized Exhibition "Equipment, instruments and tools for the metalworking industry". Collection of abstracts]* – Moscow: JSC "Expocentre", 2012, pp. 12 – 13.
2. Levin A.I. *Matematicheskoe modelirovanie v issledovaniyah i proektirovani stankov* [Mathematical modeling in the research and design of machines] – Moscow: Mashinostroenie [Mechanical engineering], 1978, 184 p.
3. Zharkov I.G. *Vibratsii pri obrabotke lezviynim instrumentom* [Vibrations during blade tool processing]. – Leningrad, 1986, 184 p.
4. Guzenko V.S. *Obschie voprosyi metodiki issledovaniya kolebaniy elementov stanka* [General methods of research of fluctuations of machine tool elements] / V.S. Guzenko, G.G. Kotkin, S.L. Mirantsov // *Nadezhnost rezhushchego instrumenta i optimizatsiya tehnologicheskikh sistem. Nauchno-tehnicheskii sbornik* [Reliability of cutting tools and optimization of technological systems. Scientific and technical collection]. – Kramatorsk: DSEA, JSC “NKMZ”, 1999, pp.100-110.
5. Strutynskiy V.B. *Matematychnе modelivannia metalorizalnykh verstativ* [Mathematical modeling of machine tools] – Zhytomyr: ZhITI, 2002, 544 p.
6. Mironenko E. V. *Optimizatsionnyy morfologicheskyy sintez dlya proektirovaniya sbornnykh tortsovykh frez s zadannyimi svoystvami* [Optimizational morphological synthesis for the design of modular face mills with desired properties] / E. V. Mironenko, V. L. Anosov // *Problemy proektirovaniya i avtomatizatsii mashinostroitelnykh proizvodstv : sbornik nauchnykh trudov* [Challenges of design and automation of machine-building production: collection of scientific papers] – Volgograd : VolgGTU ; Tolyatti : Irbit : ONIKS, 2013, pp. 96 – 106.

Поступила (received) 24.05.2016

Підвищення енергоефективності процесів фрезерування на важких верстатах фрезерно-розточувальної групи / Є. В. Мироненко, С. Л. Міранцов, В. Л. Аносов // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. – Х.: НТУ «ХПІ», 2016. – № 5 (1177). – С. 104–109. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-0023.

Повышение энергоэффективности процессов обработки на тяжелых станках фрезерно-расточной группы / Е. В. Мироненко, С. Л. Миранцов, В. Л. Аносов // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – № 5 (1177). – С. 104-109. – Библиогр.: 6 назв. – ISSN 2079-0023.

Improving energy efficiency in the processing on heavy milling-borings machines / E. V. Mironenko, S. L. Mirantsov, V. L. Anosov // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technologies in mechanical engineering. – Kharkov: NTU "KhPI", 2016. – No. 5 (1177). – P. 104-109. – Bibliogr.: 6. – ISSN 2079-0023.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Мироненко Євгеній Васильович – доктор технічних наук, професор, Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ, професор кафедри комп'ютеризованих мехатронних систем, інструментів і технологій; тел.: (0626) 41-67-85; e-mail: evgeny.mironenko@dgma.donetsk.ua.

Мироненко Евгений Васильевич – доктор технических наук, профессор, Донбасская государственная машиностроительная академия, г. Краматорск; тел.: (0626) 41-67-85; e-mail: evgeny.mironenko@dgma.donetsk.ua.

Mironenko Evgeny Vasilevich – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Donbass state engineering academy, Kramatorsk, Professor at the Department of Computerized Mechatronic Systems, Tools and Technologies; tel.: (0626) 41-67-85; e-mail: evgeny.mironenko@dgma.donetsk.ua.

Міранцов Сергій Леонідович – кандидат технічних наук, доцент, Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ, доцент кафедри технології машинобудування; тел.: (0626) 41-47-70; e-mail: sergey.mirantsov@dgma.donetsk.ua.

Міранцов Сергей Леонидович – кандидат технических наук, доцент, Донбасская государственная машиностроительная академия, доцент кафедры технологии машиностроения; тел.: (0626) 41-47-70; e-mail: sergey.mirantsov@dgma.donetsk.ua.

Mirantsov Sergey Leonidovich – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, Donbass state engineering academy, Kramatorsk, Associate Professor at the Department of Mechanical Engineering; tel.: (0626) 41-47-70; e-mail: sergey.mirantsov@dgma.donetsk.ua.

Аносов Валерій Леонідович – Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ, старший викладач кафедри технології машинобудування; тел.: (0626) 41-47-70; e-mail: hage32@mail.ru.

Аносов Валерий Леонидович – Донбасская государственная машиностроительная академия, старший преподаватель кафедры технологии машиностроения; тел.: (0626) 41-47-70; e-mail: hage32@mail.ru.

Anosov Valeriy Leonidovich – Donbass state engineering academy, Kramatorsk, Senior Lecturer at the Department of Mechanical Engineering; tel.: (0626) 41-47-70; e-mail: hage32@mail.ru

УДК 621.791:621.762

В.М. ЛИТВИНОВ, А.А. КЛОЧКО, А. Н. ЛИШЕНКО**УНИКАЛЬНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ РУЧНОЙ КИСЛОРОДНОЙ РЕЗКИ ЗАГОТОВОК ИЗ УГЛЕРОДИСТЫХ, ВЫСОКОЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ И ЧУГУНА ТОЛЩИНОЙ ДО 1000 ММ В УСЛОВИЯХ ПРЕДПРИЯТИЙ ТЯЖЕЛОГО МАШИНОСТРОЕНИЯ**

Пропонується технологічний процес видалення прибутків великогабаритних литих корпусів, станин, плит, ступиці, фланців виготовлених з вуглецевих сталей і спеціальних високоміцних чавунів газу - кисневої різкою замість механічного видалення прибутків без застосування залізного порошку та інших присадних матеріалів, виключається утворення глибоких тріщин. Видалення прибутків за допомогою ручного газокисневого різачка РЗ-ФЛЦ-ВС забезпечує абсолютно безпечний, з точки зору, зворотних ударів полум'я, оскільки горючий газ і кисень змішуються за межами різачка. Ручне кисневе різання заготовок з нержавіючих сталей і чавуну не має аналогів, проста, безпечна у виконанні, і в кілька разів економічніше, ніж видалення прибутків механічною обробкою.

Ключові слова: газу - кисневе різання, видалення прибутків, високолеговані сталі, спеціальні високоміцні чавуни, механічна обробка, зворотні удари полум'я.

Предлагается технологический процесс удаления прибылей крупногабаритных литых корпусов, станин, плит, ступиц, фланцев изготовленных из высоколегированных сталей и специальных высокопрочных чугунов газу - кислородной резкой взамен механического удаления прибылей без применения железного порошка и других присадочных материалов, исключается образование глубоких трещин. Удаление прибылей с помощью ручного газокислородного резачка РЗ-ФЛЦ-ВС обеспечивает абсолютно безопасный, с точки зрения, обратных ударов пламени, поскольку горючий газ и кислород смешиваются за пределами резачка. Ручная кислородная резка заготовок из нержавеющей сталей и чугуна не имеет аналогов, проста, безопасна в исполнении, и в несколько раз экономичней, чем удаление прибылей механической обработкой.

Ключевые слова: газу - кислородная резка, удаления прибылей, высоколегированные стали, специальные высокопрочные чугуны, механическая обработка, обратные удары пламени.

It is proposed to process the removal of profits of large cast housings, machine beds, plates, hubs, flanges made of high-alloy steels and special high-strength cast iron gas - oxygen cutting instead of mechanical removal of profits without the use of iron powder and other filler materials, avoids the formation of deep cracks. Removal of profits with a manual gas-oxygen torch РЗ-ФЛЦ-ВС provides a completely safe from the point of view, the flashback as a combustible gas and oxygen are mixed outside of the cutter. Manual flame cutting blanks of stainless steel and cast iron is unique, simple, safe to implement, and several times more economical than mechanical removal profits obrabtkoy.

Keywords: gas - flame cutting, removal of profits, high alloy steels, special high-strength cast iron, machining, flashback.

Введение. Обеспечение параметров поверхностного слоя ответственных крупногабаритных литых корпусов, станин, плит, ступиц, фланцев, изготовленных из высоколегированных сталей и специальных высокопрочных чугунов путем анализа литейных дефектов при удалении прибылей, является актуальной задачей. Удаление прибылей для ответственных деталей выполняется механической обработкой с целью уменьшения вероятности окончательного несоответствия деталей. При механическом способе удаления прибылей возникают значительные затраты по технологической трудоемкости, что вызывает удорожание и удлиняет технологический цикл обработки деталей [1, 3]. механообработке деталей [1, 3, 5].

Основная часть. Одним из недостатков кислородно – флюсовой резки является: абразивный износ деталей на пути флюсонесущего газа и постоянное прокаливание железного порошка, который должен быть сухим и сыпучим [4, 6].

На рис.1 показаны схемы расположения прибылей отливок.

При удалении прибылей кислородно – флюсовой резкой (КФР) возникают глубокие дефектные трещины, что требует увеличения технологического припуска при последующей механообработке деталей [1, 3, 5].

Одним из недостатков кислородно – флюсовой резки является: абразивный износ деталей на пути флюсонесущего газа и постоянное прокаливание же-

лезного порошка, который должен быть сухим и сыпучим [4, 6].

На рис.1 показаны схемы расположения прибылей отливок.

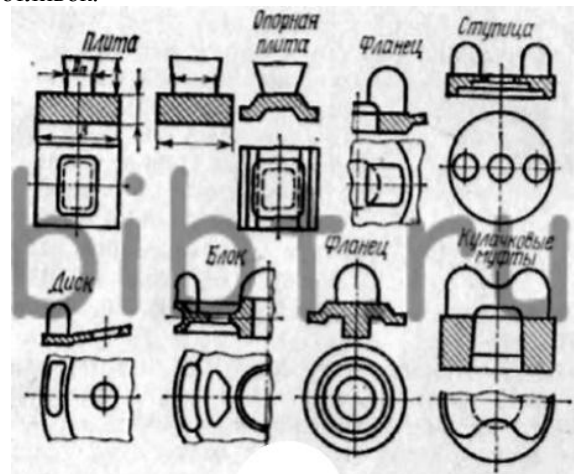


Рис. 1 – Расположение прибылей различных отливок

На предприятиях тяжелого машиностроения освоена технология кислородной резки заготовок из чугуна и высоколегированных сталей на базе резачка внешнего смещения РЗ-ФЛЦ-ВС, осуществляющего способ кислородной резки металлов больших толщин [2]. Данный способ позволяет производить кислородную резку высоколегированных сталей и чугуна без применения железного порошка и других присадоч-

ных материалов ручного газокислородного резака внешнего смешения газов подогревающего пламени РЗ-ФЛЦ-ВС не требует принудительного водяного охлаждения и прост по конструкции. Способ кислородной резки заготовок из чугуна и высоколегированных сталей резаком внешнего смешения РЗ-ФЛЦ-ВС абсолютно безопасен, с точки зрения, обратных ударов пламени, поскольку горючий газ и кислород смешиваются за пределами резака и самое, и самое главное сокращает появление дефектов в виде трещин.

Разработка и внедрение ручного газокислородного резака внешнего смешения газов подогревающего пламени РЗ-ФЛЦ-ВС для резки заготовок из углеродистых, низколегированных и высоколегированных сталей и высокопрочного чугуна толщиной до 1000 мм, позволяет производить удаление прибылей крупного литья за пределами участка машинной кислородной резки и позволяет отказаться от затратного способа КФР заготовок.

Ручной резак РЗ-ФЛЦ-ВС прошел опытно – промышленные испытания на ПАО «НКМЗ» и ПАО «Энергомашспецсталь» и было принято решение о внедрении резака на этих предприятиях.

На рис. 2 показан резак РЗ-ФЛЦ-ВС, общий вид, на рис. 3 – головка в сборе, и на рис. 4 – ствол резака.



Рис. 2 – Общий вид ручного газокислородного резака внешнего смешения РЗ-ФЛЦ-ВС

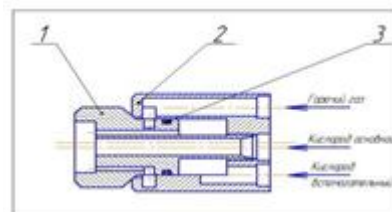
Резак имеет три независимых подвода газов – энергоносителей: кислород основной, (режущий), через резиноканевый рукав D_{y12} , кислород вспомогательный, (подогревающий), через рукав D_{y9} , и горючий газ через рукав D_{y12} . Такое исполнение резака позволяет исключить падение давления в каналах вспомогательного кислорода при включении основного кислорода и характеристики факела остаются неизменными. Это способствует стабильности процесса резки. Количество кислорода и горючего газа, пропускаемое через эти рукава, (при давлениях в цеховых магистралях 1,0 МПа и 0,1 МПа соответственно), достаточно для резки заготовки толщиной до 1000 мм. Дальнейшее увеличение количества рабочих газов, с целью увеличения толщины разрезаемой заготовки, требует увеличения условного прохода подводящих рукавов. Чем больше условный проход резиноканевых рукавов, тем они тяжелее и менее гибкие, что неудобно в работе при ручной резке. Реакция струй основного и дополнительного кислорода при их пуске отбрасывает резак в противоположную сторону. Резиноканевые рукава для подвода рабочих газов крепятся к резаку с помощью нипельно-муфтовых

соединений на штуцерах: по линии кислорода основного – $M16 \times 1,5$, по линии кислорода дополнительного – $M16 \times 1,5$ и по линии горючего газа – $M16 \times 1,5$ LH.

Резак РЗ-ФЛЦ-ВС состоит из двух узлов, головки в сборе и ствола в сборе, которые соединены между собой тремя латунными трубками с помощью паяных соединений. Одна трубка $\phi 12 \times 1$ подводит к головке основной кислород, одна трубка $\phi 12 \times 1$ – горючий газ и одна трубка $\phi 10 \times 1$ – дополнительный кислород.

Головка резака РЗ-ФЛЦ-ВС в сборе (рис. 3) состоит из медного мундштука 1 и латунной головки 2 с моноблочным исполнением и охлаждаются рабочими газами. Канал для подвода основного кислорода, и кольцевая камера для дополнительного кислорода связаны друг с другом через витки резьбового соединения и не имеют узла герметизации, т.к. перетекание небольшого количества кислорода из зоны с большим давлением в зону с меньшим давлением не опасно и не влияет на процесс резки. Герметизация кольцевой камеры для горючего газа от окружающего пространства осуществляется с помощью жесткой посадки конической части мундштука на седло головки. Уплотнение между кольцевыми камерами для дополнительного кислорода и горючего газа осуществляется с помощью резинового кольца круглого сечения по ГОСТу 9833-73.

Охлаждение головки резака и мундштука, которые подвергаются нагреву отраженным пламенем, достаточно эффективно осуществляется рабочими газами, что также подтверждается опытом эксплуатации машинных резаков РГКМ-5, мощность пламени которого гораздо выше.



а



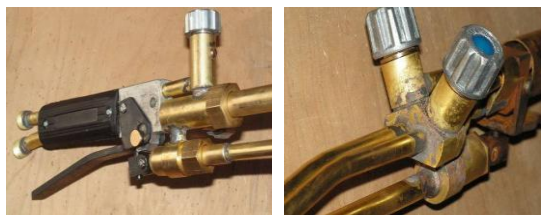
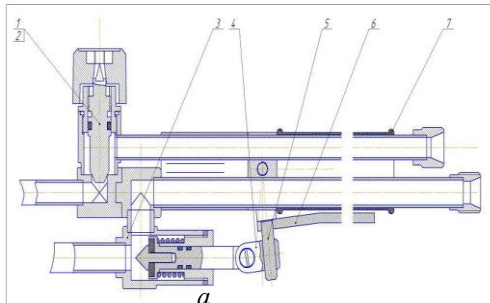
б

Рис. 3 – Головка резака РЗ-ФЛЦ-ВС в сборе:
а – конструкция головки резака; б – внешний вид

Уплотнение между мундштуком и головкой по принципу «конус в седло», уплотнение между кольцевыми камерами для кислорода и для горючего газа с помощью резинового кольца и отсутствие уплотнения между каналами для основного кислорода и дополнительного кислорода по резьбовому соединению

позволило уменьшить габариты головки с мундштуком до значений, достаточных для ручных резаков.

Ствол резака РЗ-ФЛЦ-ВС (рис. 4), включает в себя вентиль для дополнительного кислорода 1, вентиль для горючего газа 2, клапан для основного кислорода 3 с кулисой 4 и ползуном 5, рычаг 6 и рукоятку 7.



б

в

Рис. 4 – Ствол резака РЗ-ФЛЦ-ВС:

а – чертеж ствола; б – вариант ствола, в котором клапан основного кислорода имеет кнопочную фиксацию рычага; в – ствол резака без фиксации рычага клапана.

Шток клапана со стороны запорного тела снабжен конической насадкой, которая обеспечивает плавное нарастание скорости основной струи кислорода, что важно при врезании этой струи в заготовку и воспламенении металла.

Пружина клапана расположена в кольцевом зазоре между корпусом и направляющей втулкой в застойной зоне в стороне от потока основного кислорода и меньше подвергается коррозии. Такое расположение обеспечивает также минимальное сопротивление

кислородному потоку, т.к. на пути кислорода при открытом клапане ничего не находится. При закрытом клапане кислород оказывает давление на запорное тело в одном направлении с усилием пружины, увеличивая надежность уплотнения. Расположение пружины в клапане концентрично с резиновыми уплотнительными кольцами штока уменьшает габариты клапана и облегчает резак.

Шток клапана со стороны рычага снабжен кулисой 4 и ползуном 5. Эта пара размыкает силовой контур и устраняет изгибающие моменты, которые отклоняют шток в сторону и которые способствуют неравномерному износу штока и направляющей. Запорное тело равномерно прижимается к седлу клапана. Кулиса с ползуном в кинематической цепочке клапана уменьшает износ деталей и повышает надежность закрытия клапана без утечек.

По желанию заказчиков резаки РЗ-ФЛЦ-ВС были изготовлены в двух исполнениях: рычаг клапана основного кислорода без фиксации его положения, рис. 4,б, и рычаг с кнопочным фиксатором его положения, рис. 4,в. В первом случае удобно работать при частом и кратковременном включении основного кислорода, во втором – основной кислород должен быть включенным длительное время.

Техническая характеристика газокислородного резака РЗ-ФЛЦ-ВС приведена в табл. 1.

Испытания резака РЗ-ФЛЦ-ВС на горение и резку в процессе корректировки его конструкции и адаптации к заводским условиям производились в лаборатории газопламенной обработки ПАО «НКМЗ».

Результаты испытаний приведены на рис.5 и рис.6. На рис. 5,а – факел пламени резака. Основной кислород выключен. Давление кислорода в сети 0,7 МПа. Давление природного газа в сети 0,06 МПа.

Моноблочный мундштук №4. Длина видимой части факела составил 950 мм, что соответствует разрезаемой нормальной. На рис.5,б – факел пламени резака с включенным основным кислородом.

Длина видимой части факела уменьшилась незначительно. Шум ровный, насыщенный, без треска. Резак работает стабильно.

Таблица 1 – Техническая характеристика газокислородного резака РЗ-ФЛЦ-ВС

Толщина разрезаемого металла, мм		400	550	700	1000
Мундштук, №		1	2	3	4
Давление на входе в резак, МПа	кислорода	0,5	0,5	0,6	0,65
	природного газа	0,06			
Расход, м ³ /час	кислорода	50	70	90	130
	природного газа	3,5	5,8	9,5	17
Присоединительная резьба на штуцерах	для кислорода	М16х1,5			
	для природного газа	М16х1,5LN			
Рекомендуемые рукава для подвода газов	Кислорода основного	Рукав 111–12– 2 ГОСТ 9356-75			
	кислорода дополнительного	Рукав 111–09– 2 ГОСТ 9356-75			
	природного газа	Рукав 1–12– 0,63 ГОСТ 9356-75			
Масса резака, кг не более		2,2			
Длина резака, мм не более		1300			

На рис. 5 показан процесс резки образца из высоколегированной стали 40X9C2Л толщиной 350 мм мундштуком №4. Технические характеристики приведены в таблице 1. Целью испытаний являлась проверка характера горения металла заготовки, температура плавления которого ниже температуры его воспламенения, что делает невозможным процесс кислородной резки обычным способом, (металл заготовки в месте нагрева переходит в жидкую фазу и, не успев воспламениться в кислородной струе, уносится за пределы зоны влияния факела резака).



а



б

Рис. 5 – Факела пламени газокислородного резака внешнего смешения РЗ-ФЛЦ-ВС:
а – основной кислород выключен; б – основной кислород включен

На рис. 6 видно, что металл заготовки горит в полости реза по всей ее длине. Процесс горения металла в кислородной струе имеет незатухающий характер. Свечение полости реза и шлаковой дорожки ярко красное, почти белое, что говорит о высокой температуре шлака по всей длине полости реза. Кислородная резка заготовки из высоколегированной стали ручным резаком РЗ-ФЛЦ-ВС протекает стабильно без применения присадочных материалов, (железный порошок, стальной пруток или проволока).

По результатам этих испытаний были отобраны наиболее характерные примеры кислородной резки заготовок, которые приведены ниже.

На рис. 7 показана кислородная резка образца из стали 08X18H9Т толщиной 400 мм. В центральной части образца имеется отверстие диаметром 80 мм. На резаке РЗ-ФЛЦ-ВС установлен мундштук №3. Технические характеристики процесса кислородной резки соответствуют данным табл.1.

По характеру выбросов шлака можно судить о том, что наличие отверстия в центре образца не влияет на процесс резки. Мундштук №3 резака имеет значительный запас мощности.



Рис. 6 – Процесс кислородной резки образца толщиной 350 мм из высоколегированной стали 40X9C2Л резаком РЗ-ФЛЦ-ВС.



Рис. 7 – Кислородная резка образца толщиной 400 мм из стали 08X18H9Т резаком РЗ-ФЛЦ-ВС, мундштук №3

На рис.8 показана кислородная резка поковки из стали 38X1МФА толщиной по линии реза 850 мм. На поверхности поковки имеется закованная окалина толщиной до 7 мм. На рис. 8,а показан непосредственно процесс резки, на рис. 8,б - обратная сторона поковки с полостью реза на выходе основной струи кислорода из поковки, на рис. 8,в - отрезанный кусок поковки, транспортируемый от места резки. Резак РЗ-ФЛЦ-ВС, мундштук №4, технические данные указаны в табл. 1.

На рис. 9 представлена кислородная резка прибыли ф900 мм литой заготовки из стали 20Л. Пригар по линии реза незначительный. Мундштук резака №4. Технические данные указаны в табл. 1.

На рис.10. показан процесс разделки крупной скрапины на габаритные куски с помощью резака РЗ-ФЛЦ-ВС, мундштук №4.



а



б

в

Рис. 8 – Кислородная резка поковки из стали 38Х1МФА толщиной по линии реза 850 мм



Рис. 9 – Кислородная резка прибыли ф900 мм литья из стали 20Л

Технические данные процесса резки указаны в табл. 1. Скрапина взята с участка ЭСПЦ, где производилась разливка высоколегированных сталей [6, 7].

Газокислородная резка литья, поковок из углеродистых и низколегированных сталей толщиной до 500 мм успешно применяется и может быть рекомендована для внедрения на заводах тяжелого машиностроения с разработанными конструкциями резакор РЗ-ФЛЦ-ВС. Резак РЗ-ФЛЦ-ВС абсолютно не восприимчив к обратным ударам и проскокам пламени внутрь резака и его применение оправдано, (с точки зрения безопасности работ), при работе в экстремальных условиях, например, при ремонте тяжелого

прессового оборудования, когда работать приходится на высоте в окружении промасленных узлов и деталей.



Рис. 10 – Разделка крупной скрапины на габаритные куски газокислородным резакор РЗ-ФЛЦ-ВС.

Выводы.

Внедрение технологического процесса удаления прибылей крупногабаритных литых корпусов, станин, плит, ступиц, фланцев, изготовленных из высоколегированных сталей и специальных высокопрочных чугунов газо - кислородной резкой позволяет производить кислородную резку высоколегированных сталей и чугуна без применения железного порошка и других присадочных материалов, исключается образование глубоких трещин.

Удаление прибылей с помощью ручного газокислородного резака РЗ-ФЛЦ-ВС обеспечивает абсолютно безопасный, с точки зрения, обратных ударов пламени, поскольку горючий газ и кислород смешиваются за пределами резака.

Ручная кислородная резка заготовок из нержавеющей сталей и чугуна не имеет аналогов, проста и безопасна в исполнении, и в несколько раз экономичней, чем удаление прибылей механообработкой.

Поступила (received) 24.06.2016

Список литературы

1. Базров Б. М. Основы технологии машиностроения / Б. М. Базров // – М.: Машиностроение, 2005. – 736 с.
2. Пат. 92865 UA, МПК F23C 7/00. Спосіб кисневого різання металів великих товщин / В.М. Литвинов, О.І. Волошин, К.П. Шаповалов, В.А. Бєлінський, С.Л. Василенко, О.І. Коровченко. - № u2014 02889; заявл. 21.03.14; опубл. 10.09.14, Бюл. №17. – 3 с.
3. Банов М.Д. Сварка и резка материалов / М.Д. Банов, Ю.В. Казаков // – М.: Академия, 2001. С. - 313
4. Литвинов В.М. Кислородная резка металлов больших толщин на ЗАО «НКМЗ» / В.М. Литвинов, Ю.Н. Лысенко, С.А. Чумак, С.Г. Красильников, С.Л. Василенко, А.И. Коровченко, Ю.И. Костюченко, Л.Н. Наумова // Вестник донецкой машиностроительной академии, 2010, №2, С. - 164 – 167.
5. Литвинов В.М. Газопламенная обработка металлов. Новые тенденции в создании горелочных устройств / В.М. Литвинов, Ю.Н. Лысенко, С.А. Чумак // Штрипс. 2008, №4, С. - 30 - 32.
6. Маталин А. А. Технология машиностроения / А. А. Маталин // – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1985. – 496 с.
7. Литвинов В.М. Установки для нагрева крупногабаритных деталей и сварных металлоконструкций / В.М. Литвинов, Ю.Н. Лысенко, С.А. Чумак, С.П. Зеленский, В.А. Белинский, С.Л.

Василенко, А.И. Коровченко, Т.Б. Золотопупова // Сварщик, 2013, №1, С. - 22 – 25.

References (transliterated)

1. Bazrov BM Fundamentals of Mechanical Engineering. Moscow, Mechanical engineering, 2005. - 736 p.
2. V. Litvinov, Voloshin OI, Shapovalov KP Belinsky VA, Vasilenko SL, Korovchenko OI Pat. 92 865 UA, IPC F23C 7/00. Sposib kisneвого rizannya metaliv great tovschin / - № u2014 02,889; appl. 21/03/14; publ. 09.10.14, Bul. №17. - 3.
3. Banov, MD, Y. Kazakov Welding and cutting of materials. - Moscow.: Academy, 2001. 313 St.-
4. V. Litvinov Lysenko Yu, Chumak SA And others. Oxygen cutting of very thick metal at JSC "NKMZ" Herald of Donbass Engineering Academy, 2010, No2, pp - 164 - 167.
5. V. Litvinov, JN Lysenko, Chumak SA Flame treatment of metals. New trends in the creation of burners. Strips. 2008, No4, pp - 30 - 32.
6. Matalin AA Engineering Technology - AL: Mechanical Engineering, Leningrad. Dep-tion, 1985. - 496 p.
7. V. Litvinov Lysenko Yu, Chumak SA and others. The settings for the heating of large parts and welded metal. Welder 2013, No1, pp - 22 - 25.

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic description

Унікальна технологія ручного кисневого різання заготовок з вуглецевих, високолегованих сталей і чавуну товщиною до 1000 мм в умовах підприємств важкого машинобудування з урахуванням конструктивних особливостей ручного різачка. / В.М. Литвинов, О.О. Клочко, О.М. Лішенко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. – Х.: НТУ «ХПІ», 2016. – № 5 (1177). – С. 110–115. – Бібліогр.: 7 назв. – ISSN 2079-0023.

Уникальная технология ручной кислородной резки заготовок из углеродистых, высоколегированных сталей и чугуна толщиной до 1000 мм в условиях предприятий тяжелого машиностроения с учетом конструктивных особенностей ручного резачка / В.М. Литвинов, А.А. Клочко, А. Н. Лишенко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – № 5 (1177). – С. 110-115. – Библиогр.: 7 назв. – ISSN 2079-0023.

The unique technology of manual oxygen cutting pieces of carbon, high-alloy steels and cast iron up to 1000 mm in a heavy engineering enterprises, taking into account the structural features of the hand torch. / V.M. Litvinov A.A. Klochko, A.N. Lishenko // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technologies in mechanical engineering. – Kharkov: NTU "KhPI", 2016. – No. 5 (1177). – P. 110-115. – Bibliogr.: 7. – ISSN 2079-0023.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Литвинов Віталій Михайлович - ст. науковий співр., головний зварювальник ТОВ «НДПТмаш - Дослідний завод», м. Краматорськ.

Литвинов Виталий Михайлович – ст. научный сотр., главный сварщик ООО «НИИПТмаш – Опытный завод», г. Краматорськ.

Litvinov Vitaliy - Art. Scientific Researcher, Chief Welding LLC. "NIIPTmash - Pilot Plant", Kramatorsk.

Клочко Олександр Олександрович - докт. техн. наук, проф. НТУ «ХПІ»; тел. : (057) -720-66-25;

Клочко Александр Александрович – док. техн. наук, проф. НТУ «ХПІ»; тел.: (057)-720-66-25;

Klochko Aleksandr Aleksandrovyuch – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», tel.: (057)-720-66-25;

Лішенко Олександра Миколаївна - аспірант Донбаської державної машинобудівної академії, м. Краматорськ;

Лишенко Александра Николаевна – аспірант Донбасской государственной машиностроительной академии, г. Краматорск;

Lishenko Alexandra Nikolaevna - post-graduate student of Donbass State Engineering Academy, Kramatorsk.

ЗМІСТ

<i>Костюк Г.И., Бруяка О.О., Мелкозерова О.М.</i> Перспективы получения наноструктур на твердом сплаве ВК4 за счет использования фемто- и пикосекундных лазеров	4
<i>Федотов В.О., Віштак І.В.</i> Розрахунок характеристик газового підвісу зі змінним зовнішнім дроселем при складній неспіввідповідності	21
<i>Яким Р. С. Сліпчук А.М.</i> Конструкторсько-технологічні підходи у визначенні оптимального розміщення зубків на вінцях шарошок тришарошкових бурових доліт	25
<i>Кондратюк О.Л., Скоркін А.О.</i> Дослідження технологічної ефективності пристроїв для подачі мастильно-охолоджувальної рідини через клинові напіввідкриті насадки до торця круга при круглому наружному шліфуванні	34
<i>Єнікєєв О.Ф., Євсюкова Ф.М., Зиков І.С.</i> Тривимірна інформаційно-вимірювальна система задавання параметрів алмазного шліфування в умовах неповної інформації	41
<i>Горбань М.Н.</i> Конструкция инерционного виброгрохота с двухчастотным приводом	48
<i>Ромашко А.С., Юрчишин О.Я., Богиня К.О.</i> Кодування об'єкта господарської діяльності протягом його життєвого циклу	51
<i>Струтинський Б.В., Юрчишин О.Я., Чуприна В.М.</i> Побудова динамічної тензорно-геометричної моделі просторової жорсткості металорізального верстату за основними підсистемами	55
<i>Клименко С. А., Манохин А. С.</i> Повышение эффективности процесса «бреющего» точения	61
<i>Приходько О.Ю., Ушаков А.Н., Слипченко С.Е.</i> Вопросы алгоритмизации работы технологических систем с использованием SWITCH-технологии	66
<i>Добротворский С.С., Саленко Д.Д., Алексенко Б.А.</i> Обзор оборудования и расходных материалов, необходимых для осушения сжатого воздуха либо газов.....	71
<i>Новиков Ф. В., Полянский В. И.</i> Условия уменьшения удельной работы процесса механической обработки резанием	75
<i>Новиков Ф. В., Кленов О. С.</i> Определение сил резания, действующих на передней и задней поверхностях резца.....	81
<i>Шкурупий В. Г.</i> Исследование процесса полирования свободным абразивом.....	87
<i>Новиков Ф. В., Рябенков И. А.</i> Закономерности изменения температуры резания при обычном и прерывистом шлифовании.....	90
<i>Шелковой А.Н., Клочко А.А., Басова Е.В</i> Впервые в мировой практике. Зубчатые передачи с эффектом неньютоновского состояния рабочей жидкости	96
<i>Мироненко Е. В., Миранцов С. Л., Аносов В. Л.</i> Повышение энергоэффективности процессов обработки на тяжелых станках фрезерно-расточной группы	104
<i>Литвинов В.М., Клочко А.А., Лищенко А. Н.</i> Уникальная технология ручной кислородной резки заготовок из углеродистых, высоколегированных сталей и чугуна толщиной до 1000 мм в условиях предприятий тяжелого машиностроения с учетом конструктивных особенностей ручного резака	110

CONTENTS

Kostyuk G.I., Bruyaka O.O., Melkozerova O.M. Prospects for fabricating nanostructures carbide VK4 by uses of femtosecond and picosecond lasers	4
Fedotov V.O., Vishtak I.V. Calculation of the characteristics of the gas suspension with variable external inductor in a complex misalignment	21
Jakym R.S., Slipchuk A.M. Design and technological approaches in determining the optimal placement of teeth on the crown cutters drill bit	25
Kondratiuk O.L., Skorkyn A.O. Research of technological efficiency of devices for supplying through a half open nozzle cooling lubricants to the edge the circle with a circular external grinding	34
Ienikieiev A., Evsukova F.M., Zykov I.S. The three-stage information-measuring system of setting parameters of diamond grinding of incomplete information	41
Horban M.N. Construction of inertia vibrating screen with two-frequency drive	48
Chamomile A.S., Yurchushun O.J., Goddess K.O. Object coding of economic activities during its life cycle	51
Strutynsky B.V., Yurchushun O.J., Forelock V.M. Building a dynamic tensor-geometrical model of spatial rigidity of machine tools for the main subsystems	55
Klimenko S. A. , Manokhin A. S. Increasing the efficiency of «shaving» turning	61
Prihodko O.Y., Ushakov O.M., Slipchenko S.E. Questions algorithmization of technological systems using the SWITCH-technology	66
Dobrotvorsky S.S., Salenko D.D., Aleksenko B.A. Review of equipment and supplies required for dry air or gas.....	71
Novikov F. V., Polyanskiy V. I. Terms reduce specific work machining process cutting	75
Novikov F. V., Klenov O. S. Determination of cutting forces acting on the front and rear surfaces of the cutter	81
Shkurupiy V. G. Investigation process of polishing a free abrasive	87
Novikov F. V. , Ryabekov I. A. Laws of change of temperature conventional cutting and grinding intermittently	90
Shelkovoy A.N., Klochko A. A., Basova E.V. For the first time in world practice. Gear effect minutesago state of the working fluid	96
Mironenko E. V. , Mirantsov S. L. , Anosov V. L. Improving energy efficiency in the processing on heavy milling-borings machines.....	104
Litvinov V.M., Klochko A.A., Lishenko A.N. The unique technology of manual oxygen cutting pieces of carbon, high-alloy steels and cast iron up to 1000 mm in a heavy engineering enterprises, taking into account the structural features of the hand torch.....	110

ДЛЯ НОТАТКІВ

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

**ВІСНИК
НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
«ХП»**

Збірник наукових праць

Серія:
Технології в машинобудуванні

№ 5 (1177) 2016

Наукові редактори д-р техн. наук, проф. Ю.В. Тимофієв,
д-р техн. наук, проф. О.О. Ключко
Технічний редактор канд. техн. наук, доц. Є.В. Басова

Відповідальний за випуск канд. техн. наук І.Б. Обухова

АДРЕСА РЕДКОЛЕГІЇ: 61002, Харків, вул. Багалія, 21, НТУ «ХП».
Кафедра технології машинобудування та металорізальних верстатів.
Тел.: (057) 707-66-25; e-mail: vestms@lenta.ru.

Обл.-вид № 17–16.

Підп. до друку 08.07.2016 р. Формат 60×84 1/8. Папір офсетний.
Друк офсетний. Гарнітура Таймс. Умов. друк. арк. 8,0. Облік. -вид. арк. 10.
Тираж 300 пр. Зам. № 3033. Ціна договірна.

Видавець і виготовлювач
Видавничий центр НТУ «ХП». Свідоцтво про державну реєстрацію суб'єкта видавничої справи
ДК № 3657 від 24.12.2009 р.
61002, Харків, вил Багалія, 21

Надруковано в друкарні ФО-П Дуюнова Т.В.
Свідоцтво про державну реєстрацію № 2475418720 від 19.11.2014 р.
61023, Харків, вул. Веснина, 12.
тел. +38 (057) 717-28-80, e-mail: promart_order@ukr.net