

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

MINISTRY OF EDUCATION
AND SCIENCE OF UKRAINE
National Technical University
«Kharkiv Polytechnic Institute»

**Вісник Національного
технічного університету
«ХПІ». Серія: Технології в
машинобудуванні**

№ 34 (1310) 2018

Збірник наукових праць

Видання засноване у 1961 р.

**Bulletin of the National
Technical University
«KhPI». Series: Techniques in
a machine industry**

No. 34 (1310) 2018

Collection of Scientific papers

The edition was founded in 1961

Харків
НТУ «ХПІ», 2018

Kharkiv
NTU "KhPI", 2018

Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні = Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Techniques in a machine industry: зб. наук. пр. / Нац. техн. ун-т «Харків. політехн. ін-т». — Харків : НТУ «ХПІ», 2018. — № 34 (1310) 2018. — 86 с. — ISSN 2079-004X.

Видання присвячене освітленню досягнень в галузі машинобудування. Мета видання полягає у публікації оригінальних досліджень, які теоретично досліджують та вдосконалюють технологічні процеси виготовлення деталей машин і складання виробів, технологічного обладнання та оснащення, із приділенням особливої уваги: методам механічної обробки, їх стабільності і надійності; формуванню точності й якості поверхонь деталей машин; моделюванню, проектуванню й оптимізації технологічних процесів; організаційно-технологічним проблемам гнучкого виробництва; автоматизації операцій механоскладального виробництва; створенню, управлінню та діагностиці технологічних і мехатронних систем; інтегрованим та комп'ютерним технологіям в машинобудуванні; проблемам створення систем підтримки життєвого циклу виробу машинобудування; фізико-механічним та нанотехнологіям в машинобудуванні.

Для науковців та фахівців в галузі технологій машинобудування, викладачів вищої школи, аспірантів і студентів.

This issue is devoted to clarify achievements in the mechanical engineering. The purpose of the edition is publishing original researches which explore theoretically and improve the engineering processes of machines parts manufacturing and products assembly, equipment, jigs and fixtures with paying special attention to stability and reliability of machining methods; assurance of accuracy and quality of surfaces; modeling, design and optimization of machining processes; organizational and technical problems of flexible production; automation of operations of mechanical assembly production; creation, management and diagnostics of technological and mechatronic systems; integrated and computer technologies in engineering; design problems of systems for supporting the life cycle of a machine-building product; physical-mechanical technologies and nanotechnologies in mechanical engineering.

he edition is intended for scientists and specialists of mechanical engineering, lecturers, post-graduate students and students.

Державне видання.

Свідцтво Держкомітету з інформаційної політики України

КВ № 5256 від 2 липня 2001 року

Мова статей – українська, російська, англійська.

Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні 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»

Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні включений до зовнішніх інформаційних систем, у тому числі в наукометричну базу даних Index Copernicus (Польща) і Google Scholar; зареєстрований у світовому каталозі періодичних видань бази даних Ulrich's Periodicals Directory (New Jersey, USA).

Офіційний сайт видання: <http://web.kpi.kharkov.ua/tmms/ru/vestnik-ntu-hpi/>

Засновник

Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»

Founder

National Technical University
"Kharkiv Polytechnic Institute"

Головний редактор

Сокол Є. І., д-р техн. наук, чл.-кор. НАН України, НТУ «ХПІ», Україна

Заст. головного редактора

Марченко А. П., д-р техн. наук, проф., НТУ «ХПІ», Україна

Секретар

Горбунов К. О., доц., НТУ «ХПІ», Україна

Редакційна колегія серії

Відповідальний редактор:

Пермяков О.А., д-р техн. наук, проф., НТУ «ХПІ», Україна

Заступник відповідального редактора:

Клочко О.О., д-р техн. наук, проф., НТУ «ХПІ», Україна

Відповідальний секретар:

Басова Є.В., к-т техн. наук, НТУ «ХПІ», Україна

Члени редколегії:

Антонюк В.С., д-р техн. наук, проф., НТУ «ХПІ», Україна

Добротворський С.С., д-р техн. наук, проф., НТУ «ХПІ», Україна

Кальченко В.В., д-р техн. наук, проф., ЧНТУ, Україна

Кане М.М., д-р техн. наук, проф., Білоруський НТУ, Білорусь

Ковальов В.Д., д-р техн. наук, проф., ДДМА, Україна

Мироненко Є.В., д-р техн. наук, проф., ДДМА, Україна

Пасічник В.А., д-р техн. наук, проф., НТУ «ХПІ», Україна

Сизий Ю.А., д-р техн. наук, проф., НТУ «ХПІ», Україна

Сталінський Д.В., д-р техн. наук, проф., ДП УкрНТЦ «ЕНЕРГОСТАЛЬ», Україна

Степанов М.С., д-р техн. наук, проф., НТУ «ХПІ», Україна

Фадєєв В.А., д-р техн. наук, проф., ПАТ «ФЕД», Україна

Хавін Г.Л., д-р техн. наук, проф., НТУ «ХПІ», Україна

Шелковий О.М., д-р техн. наук, проф., НТУ «ХПІ», Україна

Editor-in-chief

Sokol Ye. I., dr. tech. sc., member-cor. of National Academy of Sciences of Ukraine, NTU "KhPI", Ukraine

Deputy editor-in-chief

Marchenko A. P., dr. tech. sc., prof., NTU "KhPI", Ukraine

Secretary

Gorbunov K. O., docent, NTU "KhPI", Ukraine

Editorial staff

Associate editor:

Permiakov A.A., prof., NTU "KhPI", Ukraine

Deputy editor:

Klochko A. A., prof., NTU "KhPI", Ukraine

Executive secretary:

Basova Ye. V. PhD, NTU "KhPI", Ukraine

Editorial staff members:

Antonyuk V.S., prof., NTUU "KPI", Ukraine

Dobrotvorskiy S.S., prof., NTU "KhPI", Ukraine

Kalchenko V.V., prof., ChNTU, Ukraine

Kane M.M. , prof., Belarusia NTU, Belarus

Kovalev V.D., prof., DSEA, Ukraine

Mironenko Ye.V., prof., DSEA, Ukraine

Pasichnyk V.A., prof., NTUU "KPI", Ukraine

Syzyi Yu.A., prof., NTU "KhPI", Ukraine

Stalinskiy D.V., prof., Ukraine

Stepanov M.S., prof., NTU "KhPI", Ukraine

Fadiev V.A., prof., NTU "KhPI", Ukraine

Khavin G.L., prof., NTU "KhPI", Ukraine

Shelkovyi O.M., prof., NTU "KhPI", Ukraine

Рекомендовано до друку Вченою радою НТУ «ХПІ».

Протокол № від листопада 2018 р.

В. О. ІВАНОВ, І. М. ДЕГТЯРЬОВ, В. О. ЗАЛОГА, Є. В. БАСОВА

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ТОЧНОСТІ МЕХАНІЧНОЇ ОБРОБКИ ДЕТАЛЕЙ ТИПУ ВАЖЕЛІВ

Верстатні пристрої відіграють важливу роль у забезпеченні випуску якісної продукції. Запропонована конструкція гнучкого верстатного пристрою забезпечує багатокоординатну обробку деталей типу важелів. Наявність механізмів регулювання, що дозволяють здійснювати переналадження установлювально-затискних елементів верстатного пристрою, підтверджує ефективність розробленого конструкторського рішення в умовах багатономенклатурного виробництва. Результати експериментальних досліджень механічної обробки деталей показали, що розміри (діаметри отворів, міжцентрові відстані) і взаємне розташування поверхонь знаходяться в межах призначених допусків. Шорсткість оброблених поверхонь важелів відповідає вимогам креслення. Запропонований верстатний пристрій не поступається спеціальному верстатному пристрою та забезпечує точність і якість оброблених поверхонь.

Ключові слова: верстатний пристрій; гнучкість; важіль; багатокоординатна обробка; якість; точність.

В. А. ИВАНОВ, И. М. ДЕГТЯРЕВ, В. А. ЗАЛОГА, Е. В. БАСОВА

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТОЧНОСТИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ ТИПА РЫЧАГОВ

Станочные приспособления имеют важное значение в обеспечении выпуска качественной продукции. Предложенная конструкция гибкого станочного приспособления обеспечивает многокоординатную обработку деталей типа рычагов. Наличие механизмов регулирования, которые позволяют осуществлять переналадку установочно-затжимных элементов станочного приспособления, подтверждает эффективность разработанного конструкторского решения в условиях многономенклатурного производства. Результаты экспериментальных исследований механической обработки деталей показали, что размеры (диаметры отверстий, межцентровые расстояния) и взаимное расположение поверхностей находятся в пределах назначенных допусков. Шероховатость обработанных поверхностей рычагов соответствует требованиям чертежа. Предложенное станочное приспособление не уступает специальному станочному приспособлению и обеспечивает точность и качество обработанных поверхностей.

Ключевые слова: станочное приспособление; гибкость; рычаг; многокоординатная обработка; качество; точность.

V. IVANOV, I. DEHTIAROV, V. ZALOGA, Y. BASOVA

EXPERIMENTAL STUDIES OF MACHINING ACCURACY OF LEVERS

Fixtures play an important role in ensuring the production of quality products. The proposed design of the flexible fixture provides multiaxis machining of lever-type parts. The presence of adjustment mechanisms that allow the re-adjustment of the locating-and-clamping elements of the fixture confirms the effectiveness of the design solution developed for multiproduct manufacturing. The results of experimental studies of parts machining showed that the dimensions (hole diameters, intercenter distances) and the mutual arrangement of surfaces are within the limits of the assigned tolerances. The roughness of the machined surfaces of the levers meets the requirements of the drawing. The proposed fixture is not inferior to a special fixture and ensures the accuracy and quality of the machined surfaces.

Keywords: fixture, flexibility, level, multiaxis machining, quality, accuracy.

Вступ. Інтенсифікація технологічних процесів і підвищення ефективності технологічного обладнання в машинобудуванні є одним із пріоритетних завдань, спрямованих на пошук оптимальних технічних рішень. Це підтверджується тим, що в умовах жорсткої конкуренції, стрімкого розвитку та використання новітніх технологій, машинобудівна галузь на підприємствах усього світу проводить постійний пошук впровадження нових та більш ефективних технологічних процесів (ТП). Основою підвищення якості продукції, збільшення продуктивності і зниження трудомісткості технологічних процесів на сьогоднішній день стала розробка гнучких верстатних пристроїв (ВП). Доцільно зазначити, що верстатні пристрої відіграють важливу роль у забезпеченні випуску конкурентоспроможної продукції, що підтверджується такими даними: частка у загальному обсязі технологічного оснащення складає 70–80% [1]; витрати при технологічній підготовці виробництва, проектуванні та виготовленні ВП досягають 90% [2]; вартість ВП становить 10–20% загальної вартості виробничих систем [3]; до 40% бракованих деталей у

машинобудуванні виникає через недосконалість ВП [4].

Аналіз останніх досліджень та літератури.

Аналіз джерел інформації показав, що процес проектування ВП це трудомісткий та складний процес, який потребує урахування багатьох параметрів. Тому при проектуванні ВП, як правило, розглядається механічна система «ВП – заготовка». Автором статті [5] запропоновано скінченноелементу модель, яка покаже взаємозв'язок контактної пружності з розподілом тиску в місці контакту в системі «ВП – заготовка» та дозволяє передбачити нормальні і тангенціальні контактні сили, а також розподіл тиску на кожному елементі системи «ВП – заготовка» без обмежень на типи оброблюваних матеріалів. Z. Liu та ін. [6] побудували багатокритеріальний генетичний алгоритм, що заснований на методах оптимізації та об'єднує у собі геометричну модель системи «ВП – заготовка» та модель контактної пружності та розрахунку розподілу тиску, враховуючи тертя в системі «ВП – заготовка», який дозволяє прискорити розрахунки та використовувати при цьому менші ресурси обчислювальних машин. M. Vasundara та ін.

[7] виконали дослідження максимальної величини пружної деформації заготовки при її закріпленні у різних ВП і здійснили підбір оптимального компонування ВП, де перевага надавалась конструкції з найменшими деформаціями. В. Li та S. Melkote [8] представили метод багатократної (повторної) оптимізації визначення місця розташування затискних елементів ВП при розрахунках динамічних параметрів системи «ВП – заготовка». За рахунок використання оптимізаційних методів для 3D-моделей даних систем максимальна величина позиційного вектора похибки обробки була скорочена на 58%. А. Nalbandh та С. Rajuaguru [9] запропонували використовувати «генетичний алгоритм» проектування та оптимізації конструкції ВП, що базується на імовірнісних методах розрахунку та може бути використаний для знаходження глобального оптимуму рішення для багатьох типів оптимізаційних розрахунків, що в подальшому може бути інтегрована з САПР ТП. У роботі [10] розроблено спосіб моделювання та оптимізації верстатних пристроїв при нестационарних умовах, подібно до реального процесу різання з метою виявлення оптимальної конструкції ВП. Т. Papastathis [11] підкреслює важливість впровадження переналаджуваних ВП, але акцентує увагу на складності вибору оптимальної конструкції ВП для обробки нежорстких деталей. При цьому вирішується питання щодо регулювання величини сили закріплення залежно від величини сили різання. У роботі [12] досліджено тертя між функціональними елементами верстатного пристрою та заготовкою, а також визначено деформації, що виникають у місцях їх контакту. Автори статті [13] розробили комплексну модель системи «ВП – заготовка», при моделюванні якої визначено вплив попереднього навантаження від сил закріплення та сил, що виникають у процесі обробки та вимушених коливань, на похибку оброблюваної плоскої поверхні. У. Kang [14] розробив модель системи «ВП – заготовка» для формулювання задач стійкості положення заготовки та обчислення мінімального зусилля закріплення, необхідного для механічної обробки, а також вплив послідовності закріплення затискними елементами. J. Asante [15] обчислив і дослідив вплив піддатливості ВП і режимів різання на стабільність положення заготовки, та використав його як основу для вибору відповідного ВП серед кількох альтернатив, застосовуючи аналітичний підхід. V. Cioata і I. Kiss [16] розробили та представили спрощену аналітичну модель контактної деформації між затискними елементами ВП і заготовкою, і скінченноелементну модель для оцінки контактної деформації у місцях контакту затискних елементів ВП і заготовки. У. Zheng [17] розробив скінченноелементну модель визначення стійкості положення ВП із контактними елементами для розв'язання контактних задач при закріпленні заготовки у ВП. У. Rong та У. Bai [18] провели ряд досліджень у галузі точності обробки та аналізу

стійкості положення ВП, перетворюючи просторову задачу у плоску задачу за рахунок «діючого фактора», що враховує дію сили тертя. У. Chou та ін. [19] розробили методику визначення точок закріплення, а також необхідної сили закріплення для забезпечення стійкості положення заготовки у процесі обробки за рахунок застосування гвинтових механізмів закріплення у ВП. М. Y. Wang [20] представив компонування ВП для заготовок складної форми, заснований на концепції оптимального планування експерименту. У. Rong та ін. [21] представили алгоритм знаходження та оцінювання похибки базування шляхом аналізу чутливості функцій для схеми базування у призмах. М. Estrems та ін. [22] визначили зміну у фіксуєчому отворі всередині обертання заготовки при цьому заготовка була зорієнтована за допомогою двох призм, щоб визначити, як відбувається зміна величини розмірів залежно від точності ВП. J. Hou та А. Trappey [23] застосували призми як притискачі для стабільної та ефективної роботи при установленні непризматичних деталей типу циліндрів, базуючись на оцінці мінімальних деформацій та застосуванні підходу з використанням жорсткої конструкції ВП. К. Afzeri та ін. [24] оптимізували конфігурацію затискного ВП контактної типу, де заготовка утримувалась за допомогою точкових контактів із певним розташуванням масиву затискачів під дією сил тертя на контактних поверхнях. W. Cai [25] оптимізував макет точкового контакту зведенням до мінімуму варіантів покриття площі заготовки, представлений як деякий ключ процесу контакту в місцях характерних точок. А. Al-Nabaibeh та ін. [26] представили систему точкового типу для закріплення деталей складної форми в аерокосмічній промисловості, експериментальне дослідження якої підтвердило, що запропонована система може бути швидко переналаджена для обробки деталей складної форми.

Таким чином, у даний час актуальним є розрахунки та розробка моделей процесів взаємодії у системі «ВП – заготовка», а також дослідження точності механічної обробки при зміні параметрів ВП. Проте недостатньо уваги приділяється підвищенню гнучкості ВП та інтенсифікації технологічних процесів, що з появою нових компонувань верстатів, здатних виконувати багатокординатну обробку, є актуальною задачею. Це дозволяє використати резерви для скорочення штучного часу обробки деталі за рахунок зменшення в ньому частки допоміжного часу, що при невеликих партіях та частій зміні номенклатури деталей може бути вигідним з точки зору собівартості продукції.

Методика експериментальних досліджень.

Експериментальні дослідження проведено з метою визначення дійсних розмірів оброблюваних поверхонь та їх відносного розташування, а також шорсткості оброблених поверхонь.

Об'єктом обробки є двоплечий важіль (рис. 1), який потребує обробки поверхонь із кількох сторін. У якості заготовки, для виконання натурального

експерименту, були використані вилівки з чавуну марки СЧ20 ГОСТ 1412-85. Обробка важеля виконувалася на 5-ти координатному обробному центрі вертикального компоновання моделі DECKEL MAHO DMU 50V.

Для можливості доступу до усіх поверхонь важеля без ризику зіткнень рухомих елементів верстата та верстатного пристрою запропонований ВП [27] був додатково установлений у трикулачковому патроні 7100-0032 ГОСТ 2675-80 (рис. 2). При цьому виконано його попередню вивірку щодо осі обертання стола, та для досягнення співвісності патрона з основою ВП застосовувалось усунення похибок биття кулачків шляхом їх оброблення у закріпленому патроні на столі верстата. При настроюванні пробна заготовка установлювалась симетрично осі ВП у вертикальній та горизонтальній площинах у межах 0,5 мм за вимогами креслення. У подальшому інші заготовки встановлювались без вивірки. Спеціальний ВП встановлювався безпосередньо на столі верстата (рис. 3).

Установлення заготовок у спеціальному ВП відбувалось шляхом їх базування на оправці. При цьому центральний отвір був попередньо оброблений до розмірів згідно з кресленням і максимальний зазор у парі «оправка – деталь» складав 0,03 мм, що менше допусків на міжцентрові відстані.

Обробка заготовок у запропонованому та спеціальному ВП виконувалась із розрахованими по довідникам та визначеними за каталогами режимами різання (табл. 1). Змащувально-охолоджуючі рідини не застосовувались.

Під час обробки на кожному з переходів вібрацій та інших непередбачуваних явищ не виникло. Досягнення точності лінійних розмірів здійснено за рахунок корекції інструмента після першого проходу при обробці першої заготовки. У подальшому корегування не проводились. Усього за час проведення експерименту оброблено 100 важелів (по 50 у кожному ВП).

Оброблені важелі пройшли перевірку точності, тобто оцінку відповідності розмірів оброблених деталей у ВП вимогам креслення. Вимірювання розмірів та взаємного розташування поверхонь виконувались на координатно-вимірювальній машині моделі 3D CNC SMS Thome Prazision Rapid (рис. 4–6). Також визначені міжцентрові відстані та лінійні розміри для партії деталей N = 20 шт.

Обробка результатів дослідження.

Протоколи вимірювань усіх розмірів оброблених деталей у запропонованому та спеціальному ВП зведені у табл. 2. У протоколи були занесені результати вимірювань 2-ї, 11-ї та 20-ї деталей для кожного ВП. На першій деталі для кожного ВП виконувалось налагодження процесу обробки, тому дані деталі не брались до уваги.

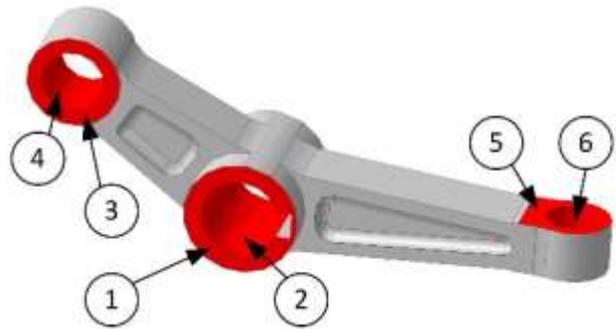


Рис. 1 – Тривимірна модель об'єкту механічної обробки: 1, 3, 5 – торці; 2, 4, 6 – отвори



Рис. 2 – Обробка допоміжного отвору важеля, що перпендикулярний головному, у запропонованому верстатному пристрої

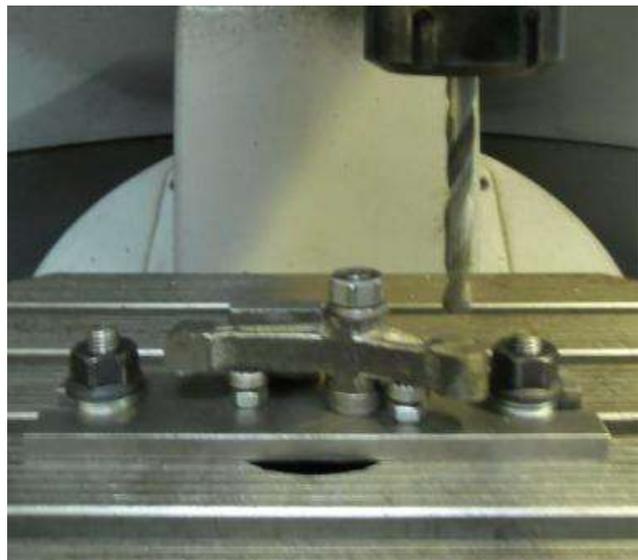


Рис. 3 – Обробка допоміжного отвору важеля, що паралельний головному, у спеціальному верстатному пристрої

Таблиця 1 – Режими різання на переходах механічної обробки важеля

Номер поверхні (рис. 1)	Перехід	Різальний інструмент (матеріал)	Глибина різання t , мм	Подача S_0 , мм/об	Швидкість різання V м/хв
1	Фрезерування	Фреза кінцева Ø20 (WC)	1	0,88	83
2	Свердління	Свердло спіральне (P6M5)	7,3	0,45	30
	Розточування	Різець (BK8)	0,15	0,07	100
3	Фрезерування	Фреза кінцева Ø20 (WC)	1	0,88	83
4	Свердління	Свердло спіральне (P6M5)	5,85	0,4	30
	Розгорткування	Розгортка (P6M5)	0,15	1,6	11
5	Фрезерування	Фреза кінцева Ø20 (WC)	1	0,88	83
6	Свердління	Свердло спіральне (P6M5)	4,85	0,38	30
	Розгорткування	Розгортка (P6M5)	0,15	1,6	11



Рис. 4 – Вимірювання розмірів головного отвору



Рис. 5 – Вимірювання розмірів допоміжного отвору, що паралельний головному



Рис. 6 – Вимірювання розмірів допоміжного отвору, що перпендикулярний головному

Усі розміри деталей, що були оброблені у запропонованому ВП, знаходяться в межах допусків, що задані на кресленні, а саме розміри отворів, міжцентрові відстані та взаємне розташування поверхонь оброблюваної деталі.

Максимальне відхилення міжцентрових відстаней від номінальних значень склало 0,03 мм для запропонованого ВП та 0,05 мм для спеціального ВП, що можна пояснити наявністю вищевказаного зазору для установлення заготовки у ВП.

Вимірювання шорсткості виконувалось на універсальному профілометрі моделі Mitutoyo SJ-400. За даними лабораторних вимірювань (табл. 3) шорсткість оброблених поверхонь важелів знаходиться у межах 1,33...1,54 мкм за критерієм R_a , що є допустимим відповідно до вимог креслення.

Таблиця 2 – Протокол вимірювання розмірів деталі «Важіль», мм

Розмір	Дослідні зразки важелів, оброблені у					
	запропонованому ВП			спеціальному ВП		
	№2	№11	№20	№2	№11	№20
Ø15H7 ^{+0,018}	15,015	15,014	15,015	–	–	–
Ø12H9 ^{+0,043}	12,012	12,012	12,011	12,012	12,011	12,011
Ø10H9 ^{+0,036}	10,011	10,011	10,011	10,011	10,011	10,011
26,5h12 _{-0,21}	26,428	26,425	26,421	26,422	26,421	26,427
15h12 _{-0,18}	14,991	14,995	14,992	14,988	14,988	14,988
10h12 _{-0,15}	9,994	9,997	9,996	9,881	9,903	9,908
60±0,05	60,031	60,024	60,027	60,041	60,049	60,032
40±0,05	40,005	40,005	40,008	40,046	40,037	40,028

Таблиця 3 – Протокол вимірювання шорсткості поверхонь деталі «Важіль», мкм

Розмір	Шорсткість поверхонь дослідних зразків важелів, оброблених у					
	запропонованому ВП			спеціальному ВП		
	№2	№11	№20	№2	№11	№20
Ø15H7 ^{+0,018}	1,42	4,1	1,51	–	–	–
Ø12H9 ^{+0,043}	1,47	1,39	4,12	1,41	1,51	4,28
Ø10H9 ^{+0,036}	1,45	1,49	1,41	1,33	1,36	1,35
26,5h12 _{-0,21}	1,48	1,45	1,54	1,42	1,48	1,52
15h12 _{-0,18}	1,45	1,49	1,51	1,52	1,38	1,46
10h12 _{-0,15}	1,44	1,47	1,53	1,49	1,51	1,38

Проте, на заготовках, де мають місце наявність раковин та ливарних пор, в окремих місцях шорсткість досягає 4,1...4,3 мкм за критерієм Ra.

Збільшення шорсткості можна пояснити нестаціонарними умовами різання, тобто нерівномірністю розподілення припуску, а також неминучим виникненням вібрацій на переривчастих поверхнях. Як видно з табличних даних, ця тенденція є справедливою як для запропонованого верстатного пристрою, так і для спеціального верстатного пристрою.

Фактичні значення відхилень від номінального розміру головного отвору, відхилення від

перпендикулярності допоміжного отвору Ø10H9 відносно головного Ø15H7 та фактичні значення шорсткості головного отвору для дослідної партії важелів наведені на рис. 7–9 відповідно.

Отже, результати контролю свідчать, що запропонований ВП не поступається спеціальному ВП у жодному компоненті за критерієм розмірної точності деталей, що оброблені у ньому та шорсткості поверхонь. Як видно з табл. 2, точність взаємного розташування поверхонь у запропонованому ВП вища, ніж у спеціальному ВП, що насамперед досягається за рахунок виконання механічної обробки за один установ.

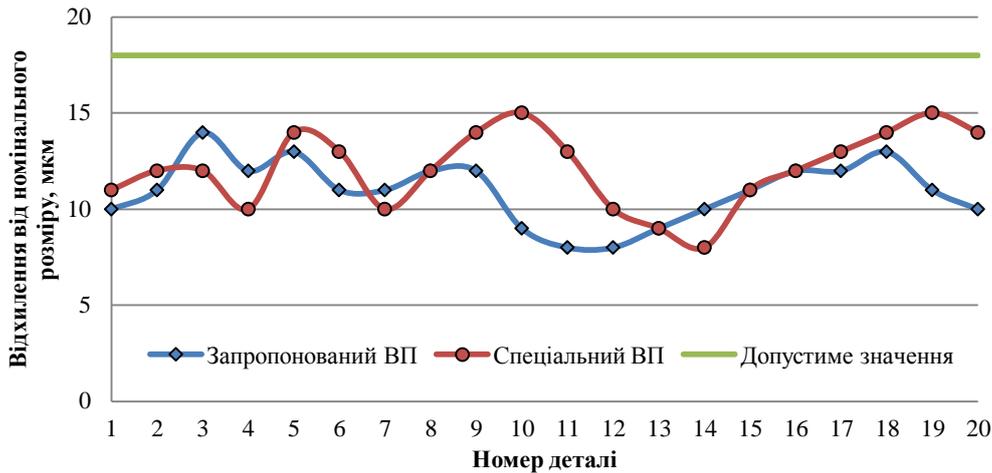


Рисунок 7 – Фактичні відхилення розміру головного отвору від номінального значення

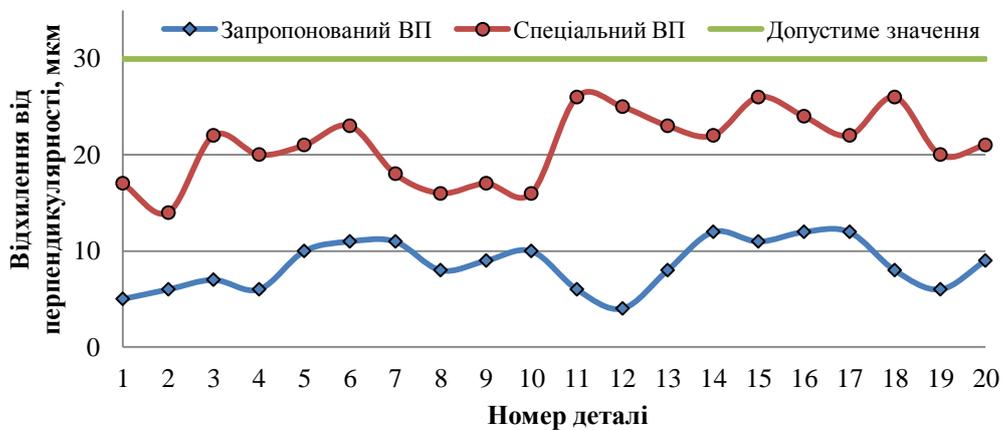
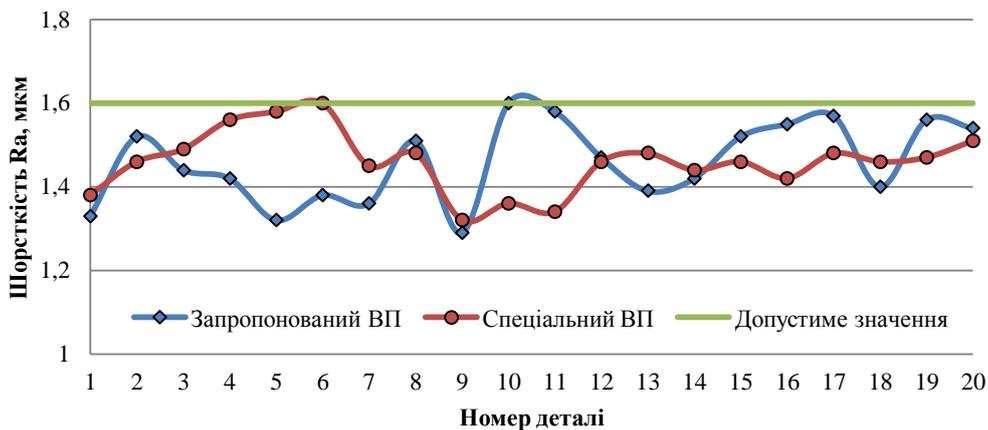
Рисунок 8 – Фактичні відхилення від перпендикулярності допоміжного отвору $\varnothing 10H9$ відносно головного $\varnothing 15H7$ 

Рисунок 9 – Фактична шорсткість поверхні головного отвору

Висновки. Виконані експериментальні дослідження точності механічної обробки важелів у двох компонуваннях верстатних пристроїв показали, що усі розміри оброблених деталей знаходяться у межах призначених допусків на обробку, проте точність відносного розміщення поверхонь деталі, що оброблена у запропонованому верстатному пристрої вища у середньому на 0,02 мм. Максимальне

відхилення міжцентрових відстаней від номінальних значень склало 0,03 мм для запропонованого верстатного пристрою та 0,05 мм для спеціального верстатного пристрою. Шорсткість поверхонь, оброблених важелів знаходиться у межах 1,33...1,54 мкм за критерієм Ra, що відповідають вимогам креслення.

Список литературы

1. Ряховский А. В. *Разработка и внедрение комплекта унифицированной технологической оснастки для обработки корпусных деталей специзделий... дис. канд. техн. наук : 05.02.08* Харьков, 1996. 135 с.
2. Иванов В.О. *Вибір оптимальних компоновок верстатних пристроїв для верстатів з ЧПК... дис. канд. техн. наук : 05.02.08* Харків, 2010. 239 с.
3. Hashemi H., Shaharoum A. M., Sudin I. A case-based reasoning for design of machining fixture. *International Journal of Manufacturing Technology*, 2014. Vol. 74. pp. 113–124.
4. Wang H., Rong Y., Li H., Shaun P. Computer aided fixture design: recent research and trends. *Computer-Aided Design*, 2010. Vol. 42 (12). pp. 1085–1094.
5. Asante J. N. A combined contact elasticity and finite element-based model for contact load and pressure distribution calculation in a frictional workpiece-fixture system. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2008. Vol. 39. pp. 578–588.
6. Liu Z., Wang M., Wang K., Mei X. Multi-objective optimization design of a fixture layout considering locator displacement and force-deformation. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2012. Vol. 67. pp. 1267–1279.
7. Vasundara M., Padmahaban K. P., Sabareeswaran M., RajGanesh N. Machining fixture layout design for milling operation using FEA. *ANN and RSM. Procedia Engineering*. 2012. Vol. 38. pp. 1693–1703.
8. Li B., Melkote S. Optimal fixture design accounting for the effect of workpiece dynamics. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2001. Vol. 28. pp. 701–707.
9. Nalbandh A. H., Rajyaguru C. C. Fixture design optimization using genetic algorithm-a review. *Journal of information, knowledge and research in mechanical engineering*. 2013. Vol. 2. pp. 466–471.
10. Amaral N. *Finite element analysis study on fixtured workpiece deformation : Bachelor of Science Thesis*. Worcester, USA, 2000. 109 p.
11. Papastathis T. N. *Modelling and design methodology for fully-active fixtures* : PhD Thesis. The University of Nottingham, Great Britain, 2010. 272 p.
12. Kumbhar N., Patil G., Mohite S., Sutar M. Finite element modelling and analysis of workpiece-fixture system. *International Journal of Applied Research in Mechanical Engineering*. 2012. Vol. 2, Issue. 2. pp. 60–65.
13. Hu S., Liao Y. An integrated model of a fixture–workpiece system for surface quality prediction. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2001. Vol. 17. pp. 810–818.
14. Kang Y., Rong Y., Yang J.C. Computer-aided fixture design verification. Part 3. Stability analysis. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2003. Vol. 21. pp. 842–849.
15. Asante J. N. Effect of fixture compliance and cutting conditions on workpiece stability. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2010. Vol. 48. pp. 33–43.
16. Cioata V., Kiss I. The machining error due to contact deformation of workpiece-fixture system. *Bulletin of ACTA Technical Engineering*. 2009. pp. 33–36.
17. Zheng, Y. *Finite element analysis for fixture stiffness* : PhD Thesis. Worcester Polytechnic Institute, Worcester, MA, USA, 2005. 148 p.
18. Rong Y., Bai Y. Automated generation of modular fixture configuration design. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. 1997. Vol. 119(2). pp. 208–219.
19. Chou Y.C. Automated fixture design for concurrent manufacturing planning. *Concurrent Engineering: Res. & Appl.* 1993. Vol. 1. pp. 219–229.
20. Wang M. Y. Automated fixture layout design for 3D workpieces. *International Journal of Robotics and Automation*. 1999. no 2. pp. 1577–1582.
21. Rong Y., Hu W., Kang Y. et al. Locating error analysis and tolerance assignment for computer-aided fixture design. *International Journal of Production Research*. 2001. no 39. pp. 3529–3545.
22. Estrems M., Sanchez H. T., Faura F. Influence of fixtures on dimensional accuracy in machining processes. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2003. no21. pp. 384–390.
23. Hou J. L., Trappey A. J. Methodology for applying V-blocks and clamps to non-prismatic workpart fixtures. *International Journal of Computer Applications in Technology*. 1997. no 10. pp. 152–167.
24. Afzeri K., Konneh M., Sutjipto A. J., Aminanda Y. Optimization of pin type fixture configurations. *International Journal Science Engineering Technology*. 2008. no 1. pp 33–40.
25. Cai W. Robust pin layout design for sheet-panel locating. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2006. no 28. pp. 486–494.
26. Al-Habaibeh A., Gindy N., Parkin R. M. Experimental design and investigation of a pin-type reconfigurable clamping system for manufacturing aerospace components. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*. 2003. no12. pp. 1771–1777.
27. Иванов В. О., Дегтярьов І. М., Карпусь В. Є. Пат. 98925, Україна. *Переналаджуваний установлювальнo-затискний модуль для обробки деталей типу важелів*, 2015

References (transliterated)

1. Riakhovskiy A. *Razrabotka i vnedrenie kompleksa unificirovamoj tekhnologicheskoy osnastki dlya obrabotki korpusnyh detalej specizdelij... dis. kand. tekhn. nauk : 05.02.08* [Development and implementation of a set of standardized tooling for processing body parts of special products. Cand. tech. sci. diss. (Ph. D.)] Kharkov, 1996. 135 p.
2. Ivanov V. *Vibir optimal'nih komponentov verstatnih pristroiv dlya verstativ z CHPK... dis. kand. tekhn. nauk : 05.02.08* [Choosing the best layout of machine tools for CNC machines... Cand. tech. sci. diss. (Ph. D.)] Kharkiv, 2010. 239 p.
3. Hashemi H., Shaharoum A. M., Sudin I. A case-based reasoning for design of machining fixture. *International Journal of Manufacturing Technology*, 2014. Vol. 74. pp. 113–124.
4. Wang H., Rong Y., Li H., Shaun P. Computer aided fixture design: recent research and trends. *Computer-Aided Design*, 2010. Vol. 42 (12). pp. 1085–1094.
5. Asante J. N. A combined contact elasticity and finite element-based model for contact load and pressure distribution calculation in a frictional workpiece-fixture system. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2008. Vol. 39. pp. 578–588.
6. Liu Z., Wang M., Wang K., Mei X. Multi-objective optimization design of a fixture layout considering locator displacement and force-deformation. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2012. Vol. 67. pp. 1267–1279.
7. Vasundara M., Padmahaban K. P., Sabareeswaran M., RajGanesh N. Machining fixture layout design for milling operation using FEA. *ANN and RSM. Procedia Engineering*. 2012. Vol. 38. pp. 1693–1703.
8. Li B., Melkote S. Optimal fixture design accounting for the effect of workpiece dynamics. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2001. Vol. 28. pp. 701–707.
9. Nalbandh A. H., Rajyaguru C. C. Fixture design optimization using genetic algorithm-a review. *Journal of information, knowledge and research in mechanical engineering*. 2013. Vol. 2. pp. 466–471.
10. Amaral N. *Finite element analysis study on fixtured workpiece deformation : Bachelor of Science Thesis*. Worcester, USA, 2000. 109 p.
11. Papastathis T. N. *Modelling and design methodology for fully-active fixtures* : PhD Thesis. The University of Nottingham, Great Britain, 2010. 272 p.
12. Kumbhar N., Patil G., Mohite S., Sutar M. Finite element modelling and analysis of workpiece-fixture system. *International Journal of Applied Research in Mechanical Engineering*. 2012. Vol. 2, Issue. 2. pp. 60–65.
13. Hu S., Liao Y. An integrated model of a fixture–workpiece system for surface quality prediction. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2001. Vol. 17. pp. 810–818.
14. Kang Y., Rong Y., Yang J. C. Computer-aided fixture design verification. Part 3. Stability analysis. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2003. Vol. 21. pp. 842–849.
15. Asante J. N. Effect of fixture compliance and cutting conditions on workpiece stability. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2010. Vol. 48. pp. 33–43.
16. Cioata V., Kiss I. The machining error due to contact deformation of workpiece-fixture system. *Bulletin of ACTA Technical Engineering*. 2009. pp. 33–36.
17. Zheng, Y. *Finite element analysis for fixture stiffness* : PhD Thesis. Worcester Polytechnic Institute, Worcester, MA, USA, 2005. 148 p.

18. Rong Y., Bai Y. Automated generation of modular fixture configuration design. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. 1997. Vol. 119(2). pp. 208–219.
19. Chou Y.C. Automated fixture design for concurrent manufacturing planning. *Concurrent Engineering: Res. & Appl.* 1993. Vol. 1. pp. 219–229.
20. Wang M. Y. Automated fixture layout design for 3D workpieces. *International Journal of Robotics and Automation*. 1999. no 2. pp. 1577–1582.
21. Rong Y., Hu W., Kang Y. et al. Locating error analysis and tolerance assignment for computer-aided fixture design. *International Journal of Production Research*. 2001. no 39. pp. 3529–3545.
22. Estrems M., Sanchez H. T., Faura F. Influence of fixtures on dimensional accuracy in machining processes. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2003. no21. pp. 384–390.
23. Hou J. L., Trappey A. J. Methodology for applying V-blocks and clamps to non-prismatic workpart fixtures. *International Journal of Computer Applications in Technology*. 1997. no 10. pp. 152–167.
24. Afzeri K., Konneh M., Sutjipto A. J., Aminanda Y. Optimization of pin type fixture configurations. *International Journal Science Engineering Technology*. 2008. no 1. pp 33–40.
25. Cai W. Robust pin layout design for sheet-panel locating. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2006. no 28. pp. 486–494.
26. Al-Habaibeh A., Gindy N., Parkin R. M. Experimental design and investigation of a pin-type reconfigurable clamping system for manufacturing aerospace components. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*. 2003. no12. pp. 1771–1777.
27. Ivanov V., Dehtiarov I., Karpus V. *Perenalagodzhuvaniy ustanovlyuval'no-zatisknij modul' dlya obrobki detalej tipu vazheliv*. [The transceiver]. Patent UA, no 98925, 2015

Надійшла (received) 05.02.2018

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Іванов Віталій Олександрович (Иванов Виталий Александрович, Vitalii Ivanov) – кандидат технічних наук, доцент, Сумський державний університет, доцент кафедри технології машинобудування, верстатів та інструментів; м. Суми, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0595-2660>; e-mail: ivanov@tmvi.sumdu.edu.ua

Дегтярьов Іван Михайлович (Дегтярев Иван Михайлович, Ivan Dehtiarov) – кандидат технічних наук, Сумський державний університет, старший викладач кафедри технології машинобудування, верстатів та інструментів; м. Суми, Україна

Залого Вільям Олександрович (Залого Вильям Александрович, Viliam Zaloga) – доктор технічних наук, професор, Сумський державний університет, завідувач кафедри технології машинобудування, верстатів та інструментів; м. Суми, Україна

Басова Євгенія Володимирівна (Басова Евгения Владимировна, Yevheniia Basova) – кандидат технічних наук, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри технології машинобудування та металорізальних верстатів; м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0002-8549-4788; e-mail: e.v.basova.khpi@gmail.com

С.В.КОВАЛЕВСЬКИЙ, О.С.КОВАЛЕВСЬКА

АКТУАЛІЗАЦІЯ ЕКСПЕРТНИХ МОДЕЛЕЙ ЗА ДОПОМОГОЮ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ

У статті розглянуті питання, пов'язані із застосуванням експертних систем для інноваційних технічних рішень. Проведено аналіз методів для вирішення практичних завдань, заснованих на статистичному моделюванні предметної області. Встановлено, що створення моделей експертних оцінок за допомогою нейронних мереж і реалізація цього підходу для оцінок структури інноваційного технологічного устаткування є перспективним напрямком. Особливістю таких моделей, є здатність багатовимірної апроксимації даних. Показано можливість та переваги використання математичних моделей на базі однорідних мереж для розв'язання обернених задач в оптимізаційній постановці. Викладений підхід був реалізований для оцінок структури інноваційного технологічного устаткування для механоскладального виробництва верстатів-роботів з кінематикою паралельної структури. В якості вихідної інформації про об'єкт прийнята фасетна класифікація структур механізмів з кінематикою паралельної структури. Фасетний метод класифікації стосовно верстатів-роботів дає можливість описати безліч можливих рішень для аналізу і вибору їх структури. Результати цієї оцінки показали якісне збіг з рівнями значущості елементів механізму з кінематикою паралельної структури на безлічі прецедентів, схильних до експертними оцінками. Розроблені методи аналізу структури інноваційних механізмів, використаних ознак пов'язаності графів механізмів з кінематикою паралельної структури, матриць їх інцидентності і запропонованого методу потенціалів. Запропоновано методику проектування механічних ланок виконавчих механізмів при застосуванні принципу мультиплікативності рухомих плечей механізмів з кінематикою паралельної структури, дозволяє отримати збільшення передавального відношення виконавчого механізму. Проведено оцінку достовірності розподілів експертних оцінок по кожному з прецедентів шляхом ранжирування показників і з використанням вербально-числової шкали Харрінгтона для забезпечення достовірності експертних оцінок, використаних для створення моделі.

Ключові слова: експертні моделі, нейронні мережі, фасетна класифікація, інноваційні технологічні рішення.

С.В.КОВАЛЕВСКИЙ, Е.С.КОВАЛЕВСКАЯ

АКТУАЛИЗАЦИЯ ЭКСПЕРТНЫХ МОДЕЛЕЙ ПРИ ПОМОЩИ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

В статье рассмотрены вопросы, связанные с применением экспертных систем для инновационных технических решений. Проведен анализ методов для решения практических задач, основанных на статистическом моделировании предметной области. Установлено, что создание моделей экспертных оценок при помощи нейронных сетей и реализация этого подхода для оценок структуры инновационного технологического оборудования является перспективным направлением. Особенностью таких моделей, является способность многомерной аппроксимации данных. Показаны возможности и преимущества использования математических моделей на базе однородных сетей для решения обратных задач в оптимизационной постановке. Изложенный подход был реализован для оценок структуры инновационного технологического оборудования для механосборочного производства станков-роботов с кинематикой параллельной структуры. В качестве исходной информации об объекте принята фасетная классификация структур механизмов с кинематикой параллельной структуры. Фасетный метод классификации применительно к станков-роботов дает возможность описать множество возможных решений для анализа и выбора их структуры. Результаты этой оценки показали качественное совпадение с уровнями значимости элементов механизма с кинематикой параллельной структуры на множестве прецедентов, подверженных экспертными оценками. Разработанные методы анализа структуры инновационных механизмов, использованных признаков связанности графов механизмов с кинематикой параллельной структуры, матриц их инцидентности и предложенного метода потенциалов. Предложена методика проектирования механических звеньев и исполнительных механизмов при применении принципа мультипликативности подвижных плеч механизмов с кинематикой параллельной структуры, позволяет получить увеличение передаточного отношения исполнительного механизма. Проведена оценка достоверности распределений экспертных оценок по каждому из прецедентов путем ранжирования показателей и с использованием вербально-числовой шкалы Харрингтона для обеспечения достоверности экспертных оценок, использованных для создания модели.

Ключевые слова: экспертные модели, нейронные сети, фасетная классификация, инновационные технологические решения.

S.V.KOVALEVSKYY, O.S.KOVALEVSKA

ACTUALIZATION OF EXPERT MODELS WITH THE HELP OF NEURAL NETWORKS

The article deals with issues related to the use of expert systems for innovative technical solutions. The analysis of methods for solving practical problems based on statistical modeling of the subject area. It has been established that the creation of expert assessment models using neural networks and the implementation of this approach for assessing the structure of innovative technological equipment is a promising direction. A feature of such models is the ability of multidimensional approximation of data. The possibilities and advantages of using mathematical models based on homogeneous networks for solving inverse problems in an optimization formulation are shown. The described approach was implemented to assess the structure of innovative technological equipment for the mechanical assembly production of machine-robots with the kinematics of a parallel structure. As a source of information about the object, a faceted classification of the structures of mechanisms with the kinematics of a parallel structure was adopted. The faceted classification method applied to machine tools-robots makes it possible to describe many possible solutions for the analysis and selection of their structure. The results of this evaluation showed a qualitative coincidence with the levels of significance of the elements of the mechanism with the kinematics of a parallel structure on a set of precedents subject to expert assessments. Developed methods for analyzing the structure of innovative mechanisms, used signs of connectedness of the graphs of mechanisms with the kinematics of a parallel structure, their incidence matrices and the proposed method of potentials. A technique for designing mechanical links of actuators when applying the principle of the multiplicativity of the moving arms of mechanisms with the kinematics of a parallel structure is proposed, which allows an increase in the actuator ratio to be obtained. The assessment of the reliability of the distribution of expert assessments for each of the precedents was carried out by ranking the indicators and using the Harrington number-verbal scale to ensure the accuracy of the expert estimates used to create the model.

Keywords: expert models, neural networks, faceted classification, innovative technological solutions.

Вступ. При вирішенні завдань проектування технічних, зокрема - технологічних систем, пров'яз інженерами необхідних компетенцій залежить від їх рівня знань та інженерного досвіду. Конкуренція на ринку машинобудівної продукції при створенні

виробів і виробництв вимагає постійного оновлення і поліпшення значень критеріїв їх конкурентоспроможності. У цих умовах достовірні оцінки і прогнозування інноваційних технічних і технологічних рішень набуває особливого значення

для нової галузі інженерної діяльності - інноватики [1].

Під прикладною інноватикою розуміється в різних галузях господарювання напрям інноваційної діяльності з вирішення проблем планування, організації і реалізації нововведень [7].

Більшість інноваційних технічних рішень використовують методи і алгоритми функціонально-вартісного аналізу, експертних оцінок, морфологічних таблиць, генетичного прогнозування, як засобів досягнення бажаного результату [2,3,4,5]. Ці методи засновані на статистичному моделюванні предметної області і репрезентативних оцінках прецедентів, що залежать від неявно існуючих структурних зв'язків умовних «входів» і «виходів» моделей об'єктів.

Аналіз останніх досліджень та літератури.

Експертні системи являють собою розділ штучного інтелекту і використовуються для підвищення продуктивності та якості прийнятих рішень [8].

Експертні системи орієнтовані на вирішення широкого кола завдань в неформалізованих областях, на додатки, які до недавнього часу вважалися малодоступними для обчислювальної техніки.

При вирішенні практичних завдань експертні системи досягають результатів, які не поступаються, а іноді і перевершують можливості людей-експертів, не оснащених ЕОМ. Особливо широко застосування експертні системи отримали в медицині, математиці, машинобудуванні, хімії, геології, обчислювальній техніці, бізнесі, законодавстві, обороні. В даний час особливо актуальне використання експертних систем в таких додатках, як освіта, психолого - педагогічна діагностика та тестування.

Експертні системи будуються для вирішення широкого кола проблем в таких областях, як:

- Прогнозування - проектування можливих наслідків даної ситуації.
- Діагностика - визначення причин несправностей у складних ситуаціях на основі спостережуваних симптомів.
- Проектування - знаходження конфігурації компонентів системи, яка задовольняє цільовим умов і безлічі проектних обмежень.
- Планування - розробка послідовності дій для досягнення множини цілей за даних початкових умов і тимчасові обмеження.
- Моніторинг - порівняння спостережуваного поведінки системи з її очікуваним поведінкою.
- Інструкування - допомога в освітньому процесі з вивчення технічної області.
- Управління - управління поведінкою складного середовища [9, 10].

Найбільш корисною характеристикою експертної системи є те, що вона застосовує для вирішення проблем високоякісний досвід. Цей досвід може представляти рівень мислення найбільш кваліфікованих експертів в даній області, що веде до рішень творчих, точних і ефективних. Саме високоякісний досвід в поєднанні з умінням його застосовувати робить систему рентабельною, здатною заслужити визнання на ринку. Цьому також сприяє

гнучкість системи. Система може нарощуватися поступово відповідно до потреб бізнесу або замовника.

Іншою корисною рисою експертних систем є наявність в них прогностичних можливостей. Експертна система може функціонувати в якості моделі рішення задачі в заданій області, даючи очікувані відповіді в конкретній ситуації і показуючи, як зміняться ці відповіді в нових ситуаціях. Експертна система може пояснити докладно, яким чином нова ситуація привела до змін. Це дозволяє користувачеві оцінити можливий вплив нових фактів або інформації і зрозуміти, як вони пов'язані з рішенням. Аналогічно користувач може оцінити вплив нових стратегій або процедур на рішення, додаючи нові правила або змінюючи вже існуючі.

Важливою властивістю експертних систем є можливість їх застосування для навчання і тренування. Експертні системи можуть бути розроблені з розрахунком на подібний процес навчання, так як вони вже містять необхідні знання та здатні пояснити процес свого міркування. Залишається тільки додати програмне забезпечення, що підтримує відповідний вимогам ергономіки інтерфейсу [11-14].

У той час як експертні системи пробують ввести досвід людей в комп'ютерну програму, нейронні мережі намагаються створити значущі моделі з великої кількості даних. Нейронні мережі можуть розпізнавати моделі, занадто неясні для людей, і адаптувати їх при отриманні нової інформації.

Нейромережеві технології, на відміну від експертних систем, призначені для відтворення неусвідомлених розумових зусиль людини. Такого роду технології використовуються для розпізнавання будь-яких подій або предметів. З їх допомогою можна відтворити численні зв'язки між безліччю об'єктів. Принципова відмінність штучних нейромереж від звичайних програмних систем, наприклад експертних, полягає в тому, що вони не вимагають програмування. Вони самі настроюються, тобто навчаються тому, що потрібно користувачеві [15-17].

Таким чином, аналіз останніх досліджень, свідчить про те, що експертні системи стали досить популярним засобом, що використовується для прийняття рішень, та багато з таких систем показали свою досить високу ефективність [18,19]. Однак, вони мають ряд недоліків. По-перше, це досить висока вартість і складність розробки і підтримки робочого стану систем подібного роду. По-друге, потрібно багато часу для вивчення алгоритмів мислення людей-експертів і трансляцію їх у правила, на яких буде побудована експертна система. По-третє, такі системи в більшості своїй не здатні до навчання і автоматичної модифікації закладених у них алгоритмів на основі накопиченого досвіду. Це означає, що будь-яка зміна оточуючого середовища може призвести до істотного зниження якості висновків, одержуваних системою. Тому, **метою досліджень** є створення моделі експертних оцінок за допомогою нейронних мереж, та реалізація цього підходу для оцінок структури інноваційного технологічного устаткування.

Матеріали та результати дослідження.

Нехай j -й об'єкт ($j=1,2,\dots,m$) представлений безліччю i «входів» ($i=1,2,\dots,n$) $\bar{X} \in x_{11}, x_{21}, \dots, x_{12}, x_{22}, \dots, x_{ij}, \dots, x_{nm}$, яким відповідає безліч експертних оцінок $\bar{E} \in e_1, e_2, \dots, e_j, \dots, e_m$, тобто $e_j \leftrightarrow \{x_{1j}, x_{2j}, \dots, x_{ij}, \dots, x_{nj}\}$. Створена таблиця кортежів прецедентів і їх експертних оцінок (табл. 1)

Таблиця 1 - Вихідні дані для створення моделі експертних оцінок

№, пп	\bar{X}						\bar{E}
	x_{11}	x_{21}	...	x_{i1}	...	x_{n1}	
1	x_{11}	x_{21}	...	x_{i1}	...	x_{n1}	e_1
2	x_{12}	x_{22}	...	x_{i2}	...	x_{n2}	e_2
...
j	x_{1j}	x_{2j}	...	x_{ij}	...	x_{nj}	e_j
...
m	x_{1m}	x_{2m}	...	x_{im}	...	x_{nm}	e_m

Інструментом створення моделі експертних оцінок є математична однорідна мережа на нейроподібних елементах. Особливістю такої моделі є здатність багатовимірної апроксимації даних, представлених в табл. 1. Причому, прагнення зменшити число нейроподібних елементів веде до втрати точності відтворення даних таблиці кортежів, але на кордоні максимально допустимої похибки моделі спостерігається максимальне «згладжування» сплайнів в n -вимірному просторі. Таким чином, може бути створена нейромережева модель будь-якого об'єкта, навіть при слабкій формалізації завдання його експертних оцінок.

Найбільш яскраво розкриваються можливості і переваги використання математичних моделей на базі однорідних мереж для розв'язання обернених задач в оптимізаційній постановці. Основна мета рішення таких задач є пошук таких векторів $\{x_{1opt}, x_{2opt}, \dots, x_{iopt}, \dots, x_{nopt}\}$, при яких експертна

оцінка e_{opt} досягає свого оптимального значення.

Математичний опис оптимізаційної постановки задачі можна представити в наступному вигляді:

Цільова функція:

$$F(x_1, x_2, \dots, x_n) = e_{opt} \rightarrow \max$$

при обмеженнях:

$$x_{1min} \leq x_1 \leq x_{1max},$$

$$x_{2min} \leq x_2 \leq x_{2max},$$

$$\dots \dots \dots$$

$$x_{imin} \leq x_i \leq x_{imax},$$

$$\dots \dots \dots$$

$$x_{nmin} \leq x_n \leq x_{nmax}.$$

Представлена система обмежень може бути

надана в більш жорсткому вигляді, проте суті своїй постановка оптимізаційної задачі не змінюється.

Викладений підхід був реалізований для оцінок структури інноваційного технологічного устаткування для механоскладального виробництва верстатів-роботів з кінематикою паралельної структури. В якості вихідної інформації про об'єкт прийнята фасетна класифікація структур механізмів з кінематикою паралельної структури.

Фасетний метод класифікації стосовно до верстатів-роботів дає можливість описати безліч можливих рішень для аналізу і вибору їх структури. Тоді безліч вихідних даних представляється у вигляді:

$$x_{11}, x_{21}, \dots, x_{12}, x_{22}, \dots, x_{ij}, \dots, x_{nm},$$

де i – порядковий номер елемента структури механізму з кінематикою паралельної структури; j – порядковий номер варіанта - прецеденту механізму з кінематикою паралельної структури, який оцінюється експертною оцінкою e_j .

Для забезпечення достовірності експертних оцінок, використаних для створення моделі, яка б дозволила обґрунтувати оптимальну структуру механізму з кінематикою паралельної структури на безлічі обмежень, що задаються, була проведена оцінка достовірності розподілів експертних оцінок по кожному з прецедентів шляхом ранжирування показників і з використанням вербально-числової шкали Харрінгтона [6].

Результати цієї оцінки показали якісний збіг з рівнями значущості елементів механізму з кінематикою паралельної структури на безлічі прецедентів, підданих експертними оцінками. Це дозволило зробити висновок про можливість використання створеної моделі експертних оцінок механізму з кінематикою паралельної структури для оптимізації їх конструкції, яка полягала в тому, щоб знайти таке поєднання складових фасетного опису, яке б могло сформувати максимальну оцінку e_j .

Висновки.

Представлена фасетна система класифікації механізмів з кінематикою паралельної структури, на основі яких показано безліч варіантів їх структур. Сполучення класифікаційних ознак в межах їх змінюваних діапазонів дає можливість прогнозувати можливості обладнання механоскладальних цехів на основі механізмів з кінематикою паралельної структури.

На підставі викладеного розроблені методи аналізу структури інноваційних механізмів використаних ознак пов'язаності графів механізмів з кінематикою паралельної структури, матриць їх інцидентності і запропонованого методу потенціалів. Це надало можливість запропонувати методіку проектування механічних ланок виконавчих механізмів при застосуванні принципу мультиплікативності рухомих плечей механізмів з кінематикою паралельної структури, що дозволяє отримати збільшення передавального відношення виконавчого механізму в 3-5 разів.

Список литературы

1. Селиванов С. Г., Гузаиров М. Б. *Системотехника инновационной подготовки производства в машиностроении*. Москва: Машиностроение, 2012. 568 с.
2. Кузнецов Ю. М. Світові тенденції і перспективи розвитку верстатобудування в Україні. *Вісник НПУ ім. М. П. Драгоманова*. Київ, НПУ ім. М. П. Драгоманова, 2007. №1. С. 45–55.
3. Кузнецов Ю. М., Крижанівський В. А., Скляр Р. А. Сучасний стан, прогнозування і перспективи розвитку верстатів з паралельною кінематикою. *Вісник Житомир. держ. техн. ун-та. Сер.: Технічні науки*. Житомир, 2005. №1. С. 320–333.
4. Струтинський В. Б. Теоретичний аналіз жорсткості шестикоординатного механізму паралельної структури. *Вісник НТУ «КПІ». Сер.: Машинобудування*, 2009. № 57. С. 198–207.
5. Щелкунов С. Б., Виноградов С. В., Щелкунова М. Є., Сарілов М. Ю. Автоматизація проектування механізмів паралельної структури. *Фундаментальні дослідження*, Пенза, 2015. №2. С. 374–375.
6. Зубрецькая Н.А., Федін С. С. Повышение достоверности принятия решений о качестве продукции на основе нечеткой модели обобщенного показателя. *Системы обработки информации. Сб. научн. тр. Харків. нац. ун-т пов. сил*. Харків. 2012. №3. С. 26–29.
7. Волков О. І., Денисенко М. П., Гречан А. П. *Інноваційний розвиток промисловості України*. Київ: КНТ, 2006. 648 с.
8. Трофимов В. В. *Методы принятия управленческих решений: учебник для бакалавров*. Москва: Юрайт, 2013. 335 с.
9. Ясницький Л. М. *Введення в штучний інтелект*. Київ: Академія, 2005. 176 с.
10. Гаскаров Д. Б. *Інтелектуальні інформаційні системи*. Київ: Вища школа, 2003. 168 с.
11. Зелинський С. Э. *Автоматизация управления предприятием*. Киев: Кондор, 2006. 518 с.
12. Кравченко В. Г. *Проективання автоматизованих інформаційних систем*. Київ: КНЕУ, 2008. 360 с.
13. Новак В. О. *Інформаційне забезпечення менеджменту*. Київ: Кондор, 2006. 462 с.
14. Leondes H., Cornelius T. Expert systems: the technology of knowledge management and decision making for the 21st century. *Sea Harbor Drive*. Florida. 2002. PP. 1–22.
15. Leith P. The rise and fall of the legal expert system. *European Journal of Law and Technology*. University of Warwick. 2010. № 1. PP. 1–16.
16. Haskin D. *Years After Hype. Expert Systems Paying Off For Some*. Sparttanburg: Datamation. 2013. 328 p.
17. Wong K. Expert system applications in business: a review and analysis of the literature. *Information and Management*. Youngstown. 2013. № 29. PP. 141–152.
18. Hollan J. *STEAMER: An interactive inspectable simulation-based training system*. Pittsburg: AI Magazine, 2013. 237 p.
19. Jump G. M. Experience Using Knowledge-Based Reasoning in Real Time Process Control. *International Federation of Automatic Control. Symposium on Compute Aided Design in Control Systems*. Cambridge. 2013. 328 p.
20. Kuznyetsov Yu. M. Svitovi tendentsiyi i perspektyvy rozvytku verstatobuduvannya v Ukraini [World trends and prospects for machine tool development in Ukraine]. *Visnyk NPU im. M. P. Dragomanova. Kyiv, NPU im. M. P. Dragomanova*. 2007, no. 1. pp. 45–55.
21. Kuznyetsov Yu. M., Kryzhanivskyy V. A., Sklyarov R. A. Suchasnyy stan, prohnozuvannya i perspektyvy rozvytku verstativ z paralel'noyu kinematykoju [Current state, forecasting and prospects of development of machines with parallel kinematics.]. *Visnyk Zhytomyr. derzh. tekhn. un-ta. Ser.: Tekhnichni nauky. Zhytomir*, 2005. no. 1. pp. 320–333.
22. Strutynskyy V. B. Teoretychniy analiz zhorstkosti shestykoordinatnoho mekhanizmu paralel'noyi struktury [Theoretical analysis of the stiffness of the six-coordinate mechanism of a parallel structure]. *Visnyk NTU «KPI». Ser.: Mashynobuduvannya*, 2009. no. 57. pp. 198–207.
23. Shchelkunov Ye. B., Vynogradov S. V., Shchelkunova M. Ye., Sarilov M. Yu. Avtomatyzatsiya proektuvannya mekhanizmiv paralel'noyi struktury [Automation of the design of mechanisms of parallel structure]. *Fundamental'ni doslidzhennya, Penza*, 2015. no. 2. pp. 374–375.
24. Zubretskaya N.A., Fedin S. S. Povyshenie dostovernosti prinyatiya resheniy o kachestve produktsii na osnove nechetkoy modeli obobshchennogo pokazatelya [Improving the reliability of making decisions about product quality based on a fuzzy model of a generalized indicator]. *Systemy obrobky informatsiyi. Sb. nauchn. tr. Kharkiv. nats. un-t pov. syl. Kharkiv*. 2012. no. 3. pp. 26 – 29.
25. Volkov O. I., Denysenko M. P., Hrechak A. P. *Innovatsiynyy rozvytok promyslovosti Ukrainy* [Innovative development of Ukrainian industry]. Kyiv: KNT, 2006. 648 p.
26. Trofimov V. V. *Metody prinyatiya upravlencheskikh resheniy: uchebnik dlya bakalavrov* [Management decision-making methods: a textbook for bachelors]. Moskva: Yurayt, 2013. 335 p.
27. Yasnyts'kyy L. M. *Vvedennya v shtuchnyy intelekt* [Introduction to artificial intelligence]. Kyiv: Akademiya, 2005. 176 p.
28. Haskarov D. B. *Intelektual'ni informatsiyni systemy* [Intelligent Information Systems]. Kyiv: Vyshcha shkola, 2003. 168 p.
29. Zelinskiy S. E. *Avtomatyzatsiya upravleniya predpriyatiem* [Automation of enterprise management]. Kiev: Kondor, 2006. 518 p.
30. Kravchenko V. H. *Proektuvannya avtomatyzovanykh informatsiynikh system* [Designing automated information systems]. Kyiv: KNEU, 2008. 360 p.
31. Novak V. O. *Informatsiynne zabezpechennya menedzhmentu* [Information provision of management]. Kyiv: Kondor, 2006. 462 p.
32. Leondes H., Cornelius T. Expert systems: the technology of knowledge management and decision making for the 21st century. *Sea Harbor Drive*. Florida. 2002. pp. 1–22.
33. Leith P. The rise and fall of the legal expert system. *European Journal of Law and Technology*. University of Warwick. 2010. № 1. pp. 1–16.
34. Haskin D. *Years After Hype. Expert Systems Paying Off For Some*. Sparttanburg: Datamation. 2013. 328 p.
35. Wong K. Expert system applications in business: a review and analysis of the literature. *Information and Management*. Youngstown. 2013. № 29. pp. 141–152.
36. Hollan J. *STEAMER: An interactive inspectable simulation-based training system*. Pittsburg: AI Magazine, 2013. 237 p.
37. Jump G. M. Experience Using Knowledge-Based Reasoning in Real Time Process Control. *International Federation of Automatic Control. Symposium on Compute Aided Design in Control Systems*. Cambridge. 2013. 328 p.

References (transliterated)

1. Selivanov S. G., Guzairov M. B. *Sistemotekhnika innovatsionnoy podgotovki proizvodstva v mashinostroenii*. [System engineering of innovative preproduction in mechanical engineering.] Moscow, Mashinostroenie, 2012. 568 p.

Поступила (received) 30.10.2018

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Ковалевський Сергій Вадимович (Ковалевский Сергей Вадимович, Kovalevskyy Serhiy Vadimovich) – доктор технічних наук, професор, кафедра технології машинобудування ДДМА; м. Краматорськ, Україна; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4708-4091>; e-mail: kovalevskii@dgma.donetsk.ua

Ковалевська Олена Сергіївна (Ковалевская Елена Сергеевна, Kovalevska Olena Sergeevna) – кандидат технічних наук, доцент, кафедра технології машинобудування ДДМА, м. Краматорськ, Україна; ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-5884-0430>; e-mail: olenakovalevska@gmail.com

А.М. СЛІПЧУК, Р.С. ЯКИМ

ДОСЛІДЖЕННЯ МІЦНОСТІ СПРЯЖЕННЯ «КОМБІНОВАНИЙ ЗУБОК – ШАРОШКА» БУРОВИХ ДОЛІТ НА ПРИКЛАДІ 3-D МОДЕЛІ

Аналітично встановлено характер та величину напруженого стану в спряженні «комбінований зубок – шарошка». На основі отриманих результатів обґрунтовано ефективність застосування запропонованої конструкції вставного породоруйнівного оснащення, що реалізовує ефект раціонального розподілу значень натягів по всій довжині спряженої поверхні. Удосконалена конструкція кріплення «комбінованого зубка» у шарошку забезпечує високу надійність такого оснащення, і крім того істотно спрощує технологію виготовлення отворів у шарошках. За результатами моделювання встановлено величину напруження у зубку, вставці та шарощі під час експлуатації такого долота. Результати моделювання напруженого стану в спряженні підтвердили дані, які отримали експериментальним шляхом, а саме: підвищено жорсткість з'єднання «комбінований зубок – шарошка» за рахунок зменшення запасу міцності кріплення та кращими умовами спряження в контакт, за рахунок однорідності матеріалів (у даному випадку «сталь – сталь»).

Ключеві слова: міцність, надійність, комбінований зубок, шарошка, напружений стан, натяг, з'єднання, вставні комбіновані породоруйнівні зубки.

А.Н. СЛИПЧУК, Р.С. ЯКЫМ

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЧНОСТИ СОЕДИНЕНИЯ «КОМБИНИРОВАННЫЙ ЗУБОК - ШАРОШКА» БУРОВЫХ ДОЛОТ НА ПРИМЕРЕ 3-D МОДЕЛИ

Аналитически установлено характер распределения и величину напряженного состояния в соединении «комбинированный зубок - шарошка». На основе полученных результатов обоснована эффективность применения предложенной конструкции установленного породоразрушающего оснащения, реализующий эффект рационального распределения значений натяжения по всей длине сопряженной поверхности. Усовершенствованная конструкция крепления «комбинированного зубка» в шарошку обеспечивает высокую надежность такого оснащения, и кроме того существенно упрощает технологию изготовления отверстий в шарошке. По результатам моделирования установлено величину напряжения в зубки, вставке и шарошки во время эксплуатации такого долота. Результаты моделирования напряженного состояния в сопряженные подтвердили данные, получили экспериментальным путем, а именно: повышены жесткость соединения «комбинированный зубок - шарошка» за счет уменьшения запаса прочности крепления и лучшими условиями сопряжения в контакте, за счет однородности материалов (в данном случае «сталь - сталь»).

Ключевые слова: прочность, надежность, комбинированный зубок, шарошка, напряженное состояние, натяжение, соединение, вставные комбинированные породоразрушающие зубки.

A.M. SLIPCHUK, R.S. JAKYM

RESEARCH OF STRENGTH IN CONNECTION «COMBINED TUNGSTEN CARBIDE INSET CUTTER - CONE» OF ROLLER CONE DRILL BIT FOR EXAMPLE 3-D MODEL

The character and magnitude of the stressed state in the connection "combined tungsten carbide inset cutter - the cone" are determined analytically. On the basis of the obtained results, the efficiency of the structures for the insertion rope-destroying equipment is substantiated. The effect of rational distribution of tensions throughout the length of the conjugate surface is realized. The improved design of the "combined tungsten carbide inset cutter" fixing in the cone ensures high reliability of such equipment, and in addition significantly simplifies the technology of manufacturing holes in cone. According to the simulation results, the value of the stress in the pin, insert and shaver during the operation of such a bit is set. The results of simulated stress states in conjugated data confirmed. The results are obtained experimentally. Increased stiffness of the connection "combined tungsten carbide inset cutter - cone" due to the reduction in the strength of the attachment and the best conditions of pinching, due to the homogeneity of materials (in this case, "steel - steel").

Key words: durability, reliability, combined tungsten carbide inset cutter, roller cone drill bit, cone, tension, connection.

Вступ. Надзвичайно важкі умови роботи породоруйнівного оснащення висувають комплекс вимог, поміж яких чільне місце посідають: застосування спеціальних матеріалів, забезпечення конструкційної міцності породоруйнівного зубка та надійності закріплення в тілі шарошки. Характер закріплення вставних твердосплавних зубків породоруйнівного оснащення шарошок є одним з головних чинників, що визначає експлуатаційні показники бурових доліт. У світовій практиці уже стало традицією систематично розширювати асортимент тришарошкових бурових доліт з різноманітним вставним породоруйнівним оснащенням. Висока ціна твердосплавного матеріалу вставних зубків обумовила пошук можливостей застосування їхніх комбінованих конструкцій [1-3]. Такі рішення, як правило, потребували суттєвих, а то і докорінних змін у технологію виготовлення породоруйнівного оснащення шарошок бурових доліт. Тому, за останні десятиліття, зважаючи на сучасні наукоємні підходи у

технології нафтогазового машинобудування, намітилася тенденція до мінімізації затрат часу і ресурсів для конструкторсько-технологічної підготовки виготовлення тришарошкових бурових доліт. Відтак, функціонально-орієнтована технологія виготовлення породоруйнівного оснащення ставить вимогу усестороннього вивчення способів та методів забезпечення міцності спряження «комбінований зубок – шарошка». Тому встановлення раціональних параметрів конструкції хвостовиків твердосплавних вставок тришарошкових бурових доліт є актуальною проблемою і має важливе практичне значення для долотобудування.

Основна частина.

За останні роки вирішення окресленої проблеми значний вклад внесено в роботах [4 – 10] та ін. Встановлено [4, 11], що руйнування в ділянці спряження з'єднання „зубок-шарошка” пов'язані не тільки з показниками міцності сталі шарошки, а й

конструкцією спряжених поверхонь отвору й хвостовика твердосплавної вставки. Важливою є також величина натягу в з'єднанні [12]. Низькі показники міцності сталі шарошки обмежують значення величини допустимого натягу безпекою утворення тріщин та зрізом шару матеріалу в отворі, а високі – безпекою утворення тріщин чи випадання твердосплавних вставок [13]. При високих значеннях границі плинності сталі шарошки, виникає крайовий ефект і концентрація напружень в зоні “отвір шарошки-зовнішній пояс” спричинює небезпеку утворення тріщин по краях отвору.

У випадку високої крихкості шарошок спостерігається відколювання фрагментів вінців та зубків (рис 1). Одночасно зауважено різний характер руйнування твердосплавних вставних зубків. Це пояснюється неоптимальним натягом у спряженні з'єднання „зубок-шарошка” [11 – 14].



Рис. 1 – Макротріщини в ділянці вершини шарошки та випадання твердосплавних зубків

Встановлено [14], що суттєво можна змінити напружений стан в ділянці контакту спряження з'єднання „зубок-шарошка”, і тим самим підвищити надійність з'єднання, якщо змінити та вдосконалити конструкції хвостовика твердосплавної породоруйнівної вставки.

Відомі спроби змінити конструкції хвостовика зубків під їхнє паяння або заплавлювання рідкою сталлю в тіло шарошки [1,2]. Проте спосіб паяння твердосплавних зубків не знайшов застосування при виготовленні доліт великих діаметрів, де можна було б отримати значний ефект.

Здійснений теоретичний аналіз жорсткості з'єднання „зубок-шарошка” [4]. Автори прогноують підвищення ефективності з'єднання за рахунок збільшення довжини частини зубка, що вплавається. Однак при цьому неминує збільшуватися розміри вузла опори. В розрахунковій моделі припускається, що коливання здійснюються без опору, тобто контактний шар має лише пружні властивості, а шарошка жорстка.

Авторами [15] запропоновано здійснювати з'єднання „зубок-шарошка” сплавленням, яке ґрунтується на змочуванні поверхні зубка металом шарошки, розчиненням, взаємною дифузією з наступним утворенням твердого зв'язку. Наведено залежності, які дозволяють визначити напруження в твердосплавному зубку, нанесеному шарі і металі

шарошки. Для порівняння розглядали напружено-деформований стан з'єднання з натягом „зубок-шарошка”. Автори оперують середніми значеннями напружень, отриманими з співвідношень нормальних σ_r і тангенціальних σ_τ напружень в циліндричних тілах. Проте в області контактної зони з'єднання „зубок-шарошка” діють радіально-стискаючі σ_r , тангенціальні σ_τ і поздовжньо-осьові напруження σ_z .

Для зменшення імовірності руйнувань при пресуванні твердосплавних вставок в отвори тіла бурового інструменту встановлені параметри західної фаски, а також висунуті рекомендації щодо знежирення спряжених поверхонь вставки і отвору для кращого зчеплення [15].

В статті досліджено характер та величину напруження у контакті „зубок-шарошка”, яке виникає у долоті при роботі, а також характер взаємозв'язку між конструктивними особливостями хвостовика породоруйнівних вставок та напруженим станом у спряжених деталях.

Аналіз поверхонь отворів під твердосплавне вставне оснащення виявив сліди пластичної деформації та фретінгового зносу. У всіх випадках в ділянці виходу зубка з отвору тіла шарошки було зафіксовано помітні ділянки притертості з ідеально чистою поверхнею і слідами наклепу, також можуть траплятися тріщини. Найбільш виражена площа контакту в посадці „зубок – шарошка” зафіксована в верхній і нижній частинах поверхні отвору. Тут найбільш помітна пластична деформація у формі вм'ятини від краю основи дна хвостовика (рис. 1), що може бути пояснене значною жорсткістю системи „зубок – шарошка – вибій”. Відтак, відбувається прогресуюче у міру відробки долота розхитування твердосплавного зубка в отворі шарошки [16].

Отже, найбільш перспективним з огляду на напружений стан в зубку і шарошці є шлях зменшення жорсткості робочої системи „порода – зубок – шарошка” [16]. Це позитивно впливає на довговічність твердосплавного оснащення бурових доліт.

Відтак, поставлено задачу вивчити характер напруженого стану нової конструкції хвостовика вставного твердосплавного оснащення тришарошкових бурових доліт (конструкція породоруйнівної вставки, описана в [13]), шляхом оптимізації жорсткості системи „порода – зубок – шарошка”.

У відповідності до існуючого технологічного процесу складання бурових шарошкових доліт в з'єднанні „зубок-шарошка” робочий натяг повинен знаходитися між $N_{\min}=0,081\text{мм}$ та $N_{\max}=0,144\text{мм}$.

Поверхня хвостовика даної конструкції складається з рівних частин твердого сплаву і сталі. Виконання кільця на меншому діаметрі хвостовика твердосплавного зубка дозволяє не тільки підвищити надійність з'єднання вставки з тілом породоруйнівного інструменту, а також оптимізувати жорсткість кріплення зубка, що забезпечує високу стійкість твердосплавного зубка до руйнування. Тобто, кільце виконує роль буфера, який одночасно підвищує

міцність пресового з'єднання і знижує жорсткість між тілом породоруйнівного інструменту та твердосплавним зубком.

Для експериментальних досліджень були проведені стендові випробування шарошкового долота 250,8 ТКЗ – ПГВ – Д27Б з експериментальними зубками (рис. 2). Зубок виготовлено з сплаву ВК10КС-К, для якого $\sigma_T = 1900$ МПа. Шарошки та кільця хвостовиків зубків виготовлено з сталі 14ХНЗМА, для якої $\sigma_T = 900$ МПа. Для можливості порівняльної оцінки працездатності експериментальної конструкції зубка через один встановлювали зубки стандартної конструкції.



Рис. 2 – Загальний вигляд долота з експериментальними породоруйнівними вставками після відпрацювання 8 год. в стендових умовах

Випробування долота проводилось на металевому вибої зі сталі 20 при осьовому навантаженні 220-250 кН та частоті обертання долота 60 – 75 об/хв, що дозволяє в необхідній мірі імітувати реальні умови роботи долота (рис 2).

Оскільки контактний зв'язок зубка з тілом шарошки є єдиним чинником, що забезпечує міцність з'єднання, розглянемо вплив механічних властивостей матеріалів тіла шарошки і зубка на величину сил контактного зв'язку і натяги в з'єднанні.

Глибина посадки експериментальних зубків та створеної 3D моделі становила 10 мм, з яких 5 мм – висота сталевго кільця, закріпленого на твердосплавній ступені хвостовика меншого діаметру, і 5 мм – висота твердосплавної ступені хвостовика більшого діаметру. Деяка частина цієї глибини відноситься до тіла вінця, а найбільша, де знаходиться сталеве кільце – до тіла шарошки. Оскільки вінець є виступом на тілі шарошки і має близькі вільні грані, напружений стан тіла вінця і шарошки будуть відрізнятися один від одного (рис. 3).

При посадці з натягом контактні тиски визначаються відомими формулами Ляме.

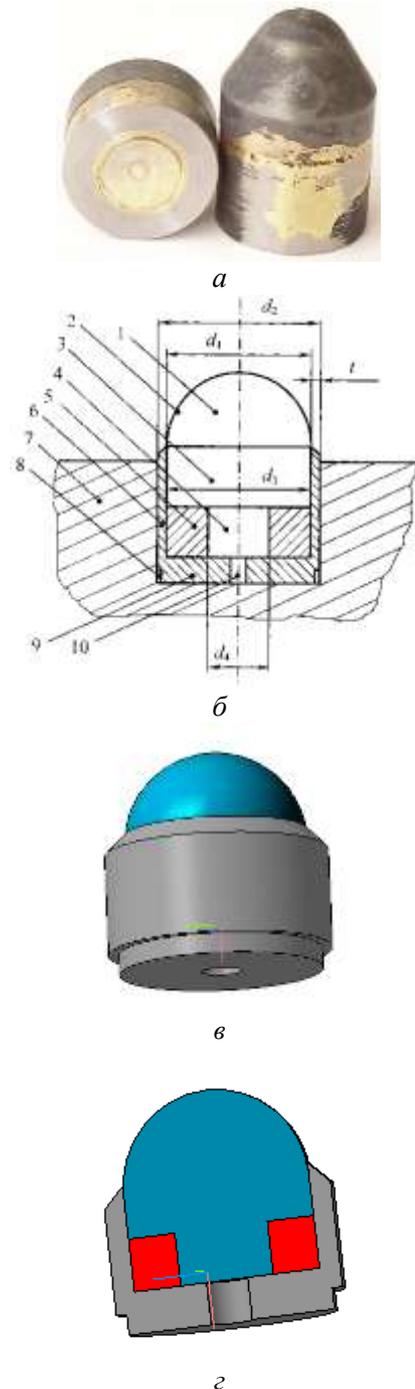


Рис. 3 – Об'єкт дослідження: а – загальний вигляд, б – схематичне зображення конструкції, в – 3D модель породоруйнівної вставки, г – розріз 3D модель породоруйнівної вставки згідно:

- 1 – твердосплавний елемент (зубок), 2 – робоча головка, 3 – ступінь хвостовика із більшим діаметром, 4 – ступінь хвостовика із меншим діаметром, 5 – кільце, 6 – проміжна втулка, 7 – гніздо корпусу інструменту, 8 – циліндрична виступка, 9 – дно проміжної втулки, 10 – центральний отвір

Оскільки розмір шарошки у порівнянні до зубка на порядок більший, то тиск в зоні контакту зубка з тілом шарошки виразиться формулою

$$p_k = \frac{N}{d_3} \left(\frac{1 - \mu_z}{E_z} + \frac{1 + \mu_{ш}}{E_{ш}} \right)^{-1}, \quad (1)$$

де: d_3 – діаметр зубка (15,28 мм);

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

μ_z – коефіцієнт Пуассона для матеріалу хвостовика зубка (для сталі кільця – 0,3 для твердого сплаву – 0,24),

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

E_z – модуль пружності для матеріалу хвостовика зубка (для твердосплавної ступені хвостовика – $5,6 \cdot 10^5$ МПа, а для сталевого кільця хвостовика – $2,1 \cdot 10^5$ МПа);

$E_{ш}$ – модуль пружності для матеріалу шарошки – $2,1 \cdot 10^5$ МПа.

В області контактної зони як в тілі шарошки, так і в тілі зубка виникають радіально-стискаючі σ_r , тангенціальні σ_τ і поздовжньо-осьові напруження σ_z .

Враховуючи що $[\sigma_p]_{ш} < [\sigma_p]_z$, 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 з

$$p_k(l) = \frac{N}{d_3} \left(\frac{1 - \mu_z}{E_z} + \frac{l^2 + d_3 + \mu_{ш}}{l^2 - d_3 + E_{ш}} \right)^{-1} \quad (3)$$

де l – ширина вінця шарошки.

Отже у запропонованій конструкції шарошки, яка зображена на рис. 4 досліджувався напружений стан. Аналізом характеру пошкоджень аналізованих вінців встановлено, що вони зазнають найбільших навантажень, що узгоджується з даними в дослідженні [14].

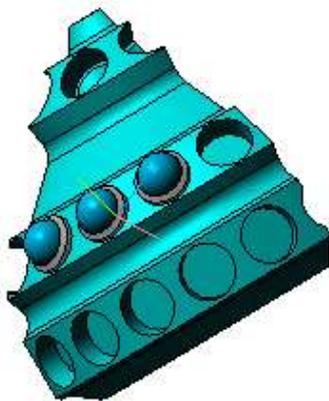


Рис. 4– Сегмент 3-D шарошки тришарошкового бурового долота діаметром 302мм без навантаження

Згідно здійснених досліджень тепер проведемо аналіз міцності шарошки долота удосконаленої конструкції діаметром 302мм на яку діє зведена сила яка прикладена до основного твердосплавного зубка моделі і є рівна 28кН. Змодельємо такий випадок (рис.4): на основний зубок – прикладаємо 25кН на кожен. Моделювали ділянку контактного напруження з трьома зубками, які припадають на досліджувану ділянку впливу зубки – вибій, на кожен зі згаданих зубків припадало до 25кН [14]. Загалом у контактній зоні зубки знаходилися під навантаженням до 80 кН, що відповідно впливає на напружений стан вінців шарошки [14]. Крім того враховано тиск від натягу посадки „хвостовик зубка – вставка - отвір шарошки” – 114 МПа. Результати здійснених досліджень характеру напруженого стану у вінцях шарошки подано на рис. 5 а та б.

Аналізом характеру пошкоджень аналізованих вінців встановлено, що вони зазнають найбільших навантажень, що узгоджується з даними в дослідженні [16].

Після отриманих результатів (рис.5а, рис. 5б) можна побачити, що як і очікувалось найбільш напруженим місцем буде частина на зубку (рис. 5б).

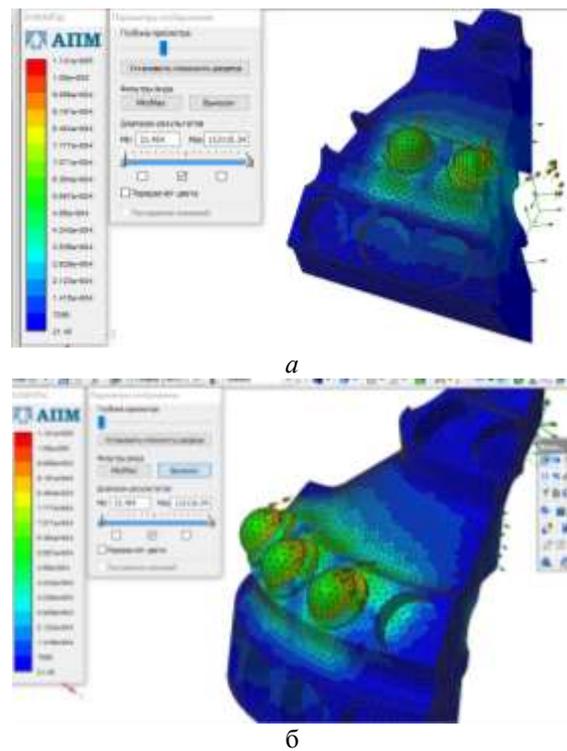


Рис. 5 – Моделювання напруженого стану у ділянках спряження „хвостовик зубка – отвір шарошки” на вінцях шарошки бурового долота діаметром 302мм: а,б – визуалізація чисельних досліджень

При взаємодії трьох елементів ”зубок-вставка-шарошка” контактні напруження на зубку можуть досягати більше 100000 МПа. Зважаючи, що маємо розподіл цих напружень по спряжених поверхнях, а також те, що проміжна втулка відіграє роль додаткового компенсатора, яка зазнає додаткових деформацій при пресуванні, забезпечується надійний

контакт між хвостовиком вставки та тілом вінця шарошки. Дія втулки як компенсатор добре ілюструється на рис. 6., де ділянка контакту є ребро навколо зубка.

В результаті проведених досліджень встановлено якісний взаємозв'язок між жорсткістю кріплення твердосплавного вставного озброєння в отворах шарошки та характером руйнування твердосплавних зубків. А саме, площа стикування спряжених поверхонь та напружений стан в з'єднанні визначають довговічність твердосплавного зубка.

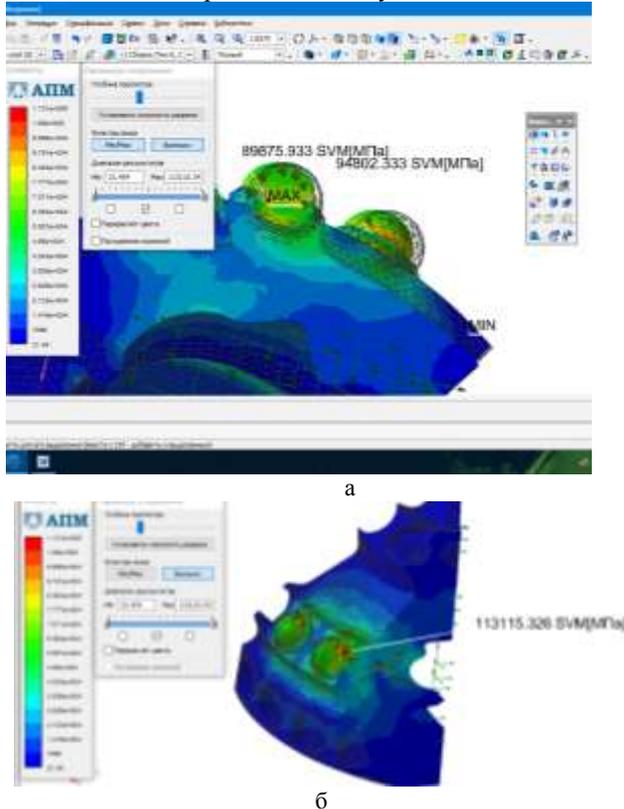


Рис. 6 – Візуалізація комп'ютерного дослідження: а – зображення найбільш напружених зон шарошки; б – зображення точки з найбільшим напруження на зубку шарошки

Висновки. Дослідженнями встановлено характер розподілу контактних напружень у спряжених ділянках „комбінований зубок – отвір шарошки” який вперше візуалізовано та графо-аналітично оцінено (рис. 5-6). Встановлено раціональні параметри конструкції породоруйнівних вставок, для які легко екстраполюються на різні типорозміри вставок. Моделюванням і аналізом встановлено сприятливий розподіл напруженого стану у небезпечній ділянці поверхні отвору у вінці шарошки. Аналізом (при оптичному збільшенні в 20 р.) контрольних ділянок у спряжених поверхнях не виявлено мікротріщин, які могли бути присутні у серійних долотах. Застосування породоруйнівних вставок уможливило спростити та здешевити технологію виготовлення шарошок. А саме, відпадає необхідність у захисті вінців від цементації (який є шкідливим техпроцесом), необхідності додаткового оброблення отворів (розвірчування, калібрування, підбирати дно). Моделювання процесу буріння

виявило працездатність породоруйнівного оснащення та забезпечує підвищення надійності з'єднання „зубок – шарошки”. Додатково введений елемент вставка дозволила змістити найбільш напружене місце із циліндричного ребра шарошки на зубок, який забезпечує вищу тріщиностійкість за рахунок сприятливіших фізико-механічних показників матеріалу. [16] Випробовування шарошок вдосконаленої конструкції у стендових умовах, при застосуванні металевого вибою, підтвердили ефективність отриманих параметрів вставного породоруйнівного оснащення шарошок [17].

Встановлено характер розподілу напруженого стану в з'єднанні «комбінований зубок – шарошка», яким обґрунтовано ефективність застосування конструкції вставного породоруйнівного оснащення, що реалізовує ефект раціонального розподілу значень натягів по всій довжині спряженої поверхні. Це забезпечує не тільки високу надійність вставного породоруйнівного оснащення, але й істотно спрощує технологію виготовлення отворів у шарошках під твердосплавне оснащення. Встановлено раціональної величини натягу при посадці твердосплавних зубків з комбінованим хвостовиком в тіло шарошки, які легко екстраполюються на інші типорозміри породоруйнівних вставок. Результати моделювання та розрахунку напруженого стану в з'єднаннях підтвердили те, що підвищити жорсткість з'єднання можна збільшенням сили натягу за рахунок зменшення запасу міцності створюючи сприятливі умови для спряження в контакті максимально однорідних матеріалів (у даному випадку «сталь – сталь»).

Надалі актуальним є розробка нових раціональних конструкцій породоруйнівного оснащення шарошок, в тому числі породоруйнівних вставок, схем його ефективного розташування на вінцях шарошки. Окремих питанням подальших досліджень є вивчення проблеми функціональної та енергетичної взаємодії елементів опори та породоруйнівного оснащення.

Список літератури

1. Кершенбаума В. Я. Буровой породоразрушающий инструмент. Международная инженерная энциклопедия. Шарошечные долота / В. Я. Кершенбаума, А. В. Торгашова, А. Г. Мессера. – М.: Нефть и газ, 2003. – 257 с.
2. Масленников И. К. Буровой инструмент: справочник / Масленников И. К. – М.: Недра, 1989. – 430 с.
3. Жидовцев Н. А. Долговечность шарошечных долот / Жидовцев Н. А., Кершенбаум В. Я., Гинзбург Э. С. [и др.] – М.: Недра, 1992. – 272 с.
4. S.L. Chen. 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. Paper Number 80493-MS.
5. Bybee K. Drilling Performance of an Energy-Balanced Roller-Cone Bit. / Bybee K. // Journal of Petroleum Technology. – 2003. – № 12. – P. 49-50.
6. Zhou, R.S. A Contact Stress Model for Predicting Rolling Contact Fatigue / Zhou R.S., Nixon H. // SAE Technical Paper 921720 in SEA Transactions Journal, Vol. 101, № 2, Sept. 1, 1992.
7. Huang. Experimental research on the surface strengthening technology of roller cone bit bearing based on the failure analysis / Huang, Zhiqiang, Li Qin, Zhou, Jing Shuang, Ma Yachao, Hu Wengang, Fan Yongtao // Engineering failure analysis. vol 29. 2013. 12-26 P.
8. Naganawa Shigemi. Feasibility study on roller-cone bit wear detection from axial bit vibration / Naganawa Shigemi // Journal of petroleum

- science and engineering. vol: 82. 2012. 140-150 p.
9. Kryzhaniv's'kyi E. I. Contact fracture of rolling bodies of open bearings of three-cone rock bits in aqueous environment / *Kryzhaniv's'kyi E. I., Yakym, R. S., Shmandrov's'kyi, L. E., Petryna, Yu. D.* // Materials science journal. Vol. 46. №. 5. 2011. 607-612 p.
 10. Deng Yong. Theoretical and experimental study on the penetration rate for roller cone bits based on the rock dynamic strength and drilling parameters / *Deng Yong, Chen, Mian, Jin, Yan, Zhang Yakun, Zou Daiwu, Lu, Yunhu* // Journal of natural gas science and engineering. Vol. 36. 2016. 117-123p.
 11. Schroder Jon. Bearing innovations extend roller-cone bit life. oil & gas journal / *Schroder Jon, Di Pasquale Maurizio, Richards Alun, Yorty Jesse* // vol. 114 №. 6. 2016. 50-55 p.
 12. Яким Р. С. Науково-практичні основи технології виготовлення тришарошкових бурових доліт та підвищення їх якості і ефективності: монографія / Р.С. Яким, Ю.Д.Петрина, І.С.Яким. – Івано-Франківськ: Видання ІФНТУНГ, 2011. – 384 с.
 13. Петрина Ю.Д. Вплив фізико-механічних властивостей сталі шарошки на міцність з'єднання „шарошка-зубок” в тришарошкових бурових долотах / *Ю. Д. Петрина, Р.С. Яким, Т. Б. Пасинович* // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2007. – № 3 (24). – С.73–78.
 14. Сліпчук А.М. Покращення якості технології процесу запресовування зубків у шарошки бурових доліт/ *Сліпчук А.М. Яким Р.С.* // Високі технології в машинобудуванні: зб. наук. праць. – Харків, НТУ “ХПІ”, 2017. – Вип. 1 (27). – 186 с. 134-143с.
 15. Кривошея В.В. Перспективная технология сборки породоразрушающих инструментов. / *В.В.Кривошея, А.В.Мельничук* // Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения / Тезисы докладов V Международной конференции / ИСМ им. В. Н. Бакуля НАН Украины. – К.: ИПЦ АЛКОН НАН Украины, – 2002. – С. 140 – 144.
 16. Сліпчук А.М. Покращення якості технології процесу запресовування зубків у шарошки бурових доліт/ *Сліпчук А.М. Яким Р.С.* // Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль у машинобудуванні та приладобудуванні. Вісник Національного університету “Львівська політехніка”. Львів. – 2017. № 867 С.69-77.
 17. Ю.Д.Петрина Пат. 38856 Україна, МПК E21B 10/46. Породоруйнівна вставка / *Ю.Д.Петрина, Р.С.Яким, Т.Б.Пасинович* -2009.

References (transliterated)

1. Kershenbauma V. YA. *Burovoy porodorazrushayushchiy instrument. Mezhdunarodnaya inzhenernaya entsiklopediya. T.1: sharoshechnyye dolota* [Drilling rock cutting tool. International Engineering Encyclopedia. Vol. 1 Cone bits]. Moscow, Neft' i gaz Publ., 2003. - 257 p.
2. Maslennikov I.K. *Burovoy instrument: spravochnik* [Drilling tool: a guide]. Moscow, Nedra Publ., 1989. - 430 p.
3. Zhidovtsev N. A., Kershenbaum V. YA., Ginzburg E. S. *Dolgovechnost' sharoshechnykh dolot* [Durability of roller bits]. Moscow, Nedra Publ., 1992, - 272 p.
4. S.L. Chen, J. Dahlem, C. Rayburn. 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. Paper Number 80493-MS. doi.org/10.2118/80493-MS
5. Bybee K. Drilling Performance of an Energy-Balanced Roller-Cone Bit. *Journal of Petroleum Technology*. - 2003. - № 12. 49-50 p.
6. Zhou R.S., Nixon H. A Contact Stress Model for Predicting Rolling Contact Fatigue. *Journal of commercial vehicles*. 1992. Vol. 101, SECTION 2. pp. 556-563.
7. Huang, Zhiqiang, Li Qin, Zhou, Jing Shuang, Ma Yachao, Hu Wengang, Fan Yongtao. Experimental research on the surface strengthening technology of roller cone bit bearing based on the failure analysis. *Engineering failure analysis*. 2013, vol. 29. pp 12-26.
8. Naganawa Shigemi. Feasibility study on roller-cone bit wear detection from axial bit vibration. *Journal of petroleum science and engineering*. 2012. vol. 82. pp. 140-150.
9. Kryzhaniv's'kyi E. I., Yakym, R. S., Shmandrov's'kyi, L. E., Petryna, Yu. D. Contact fracture of rolling bodies of open bearings of three-cone rock bits in aqueous environment. *Materials science journal*. 2011. Vol. 46. no. 5. pp. 607-612.
10. Deng Yong, Chen, Mian, Jin, Yan, Zhang Yakun, Zou Daiwu, Lu, Yunhu. Theoretical and experimental study on the penetration rate for roller cone bits based on the rock dynamic strength and drilling parameters. *Journal of natural gas science and engineering*. 2016. Vol. 36. pp. 117-123.
11. Schroder Jon, Di Pasquale Maurizio, Richards Alun, Yorty Jesse. Bearing innovations extend roller-cone bit life. *Oil & gas journal*. 2016. vol. 114 no. 6. pp. 50-55.
12. R.S. Yakim, YU.D.Petrina, I.S.Yakim. *Nauchno-prakticheskiye osnovy tekhnologii izgotovleniya trisharoshkovykh burovyykh dolot i povysheniya ikh kachestva i effektivnosti* [Scientific and practical bases of the technology for manufacturing cone drill bits and improving their quality and efficiency]. Ivano-Frankovsk, IFNTUNG Publ., 2011, 384 p.
13. YU. D. Petrina, R.S. Yakim, T. B. Pasinovich. Vliyaniye fiziko-mekhanicheskikh svoystv stali sharoshki na mitsnist' soyedineniye "sharoshka-zubok" v trisharoshkovykh burovyye dolota [Influence of physical and mechanical properties of steel cones on the strength of the connection "Cone-tungsten carbide inset cutter" in the drill bits] *Razvedka i razrabotka neftnyykh i gazovykh mestorozhdeniy*. [Prospecting and Development of Oil and Gas Fields]. Ivano-Frankovsk. 2007. Vol. 3 no.24. pp.73-78.
14. Slipchuk A.M. Yakim R.S. Uluchsheniye tekhnologii protsessa zapressovki zubkov v sharoshki burovyykh dolot [Refinement technology pressing of tungsten carbide inset cutter in roller cone bit] *Vysokiy tekhnologii v mashinostroyenii: sb. nauk. trudov*. [New solutions in modern technologies. Collected Works] - Khar'kov, NTU "KHPI" Publ., 2017. - Vol. 7, no. 1229. pp. 134-143.
15. Krivosheya V.V., Mel'nichuk A.V.. *Perspektivnaya tekhnologiya sborki porodorazrushayushchikh instrumentov*. [Promising assembly technology rock cutting tools]. Porodorazrushayushchiy i metalloobrabatyvayushchiy instrument - tekhnika i tekhnologiya yego izgotovleniya i primeneniya / *Tezisy dokladov V Mezhdunarodnoy konferentsii ISM im. V. N. Bakulya NAN Ukrainy*. [Type destructive and metalworking tools - technology and technology of its manufacture and use. Abstracts of the V International Conference name's. V. N. Bakulya]. Kiev, IPTS ALKON NAN Ukrainy Publ., 2002, pp. 140 – 144
16. Slipchuk A.M. Yakim R.S. Uluchsheniye tekhnologii protsessu zapressovki zubtsov v sharoshki burovyykh dolot [Improving the quality of the technology of the process when preserving tungsten carbide inset cutter in the cone]. *Vest. Natsional'nogo universiteta "Lvovskaya politehnika"*. *Optyimizatsiya vyrobnychkh protsesiv i tekhnichnyy kontrol' u mashinobuduvanni ta pryladobuduvanni*. [Bulletin of the L'vov Polytechnic Institute. Series: Production Processes Optimization and Technical Control in Engineering and Instrumentation]. L'vov, 2017. Vol. 867. pp. 69-77.
17. YU.D. Petrina, R.S.Yakim, T.B.Pasinovich. *Porodorazrushayushchiy vstavka* [The insert for destructive a breed] Patent 38856 Ukraina, 2009

Поступила (received) 04.10.2018

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Сліпчук Андрій Миколайович (Сліпчук Андрей Николаевич, Slipchuk Andrey Nikolaevich) – кандидат технічних наук, доц. кафедри технології машиностроєння Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів; тел.: (032)-258-25-01; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0584-6104>, e-mail: andsl@ukr.net

Яким Роман Степанович (Яким Роман Степанович, Yashkym Roman Stepanovich) – кандидат технічних наук, проф., Дрогобицький державний педагогічний університет ім. І.Франка, м. Дрогобич; тел.: (067)9070484; e-mail: Jakym.r@online.ua

М.С. МЕЛЬНИК, Я.С. АНТОНЕНКО

ДОСЛІДНИЦЬКИЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ КОНТРОЛЮ ЯКОСТІ ЗВАРНИХ СТАНИН ВАЖКИХ ВЕРСТАТІВ

Застосування у металорізальних верстатах станин зварних конструкцій надає суттєві переваги по зниженню металоемності і підвищенню технологічності порівняно з литими конструкціями. Однак важливий недолік зварних станин полягає у наявності значних залишкових механічних напружень, зазвичай більших ніж в аналогічних литих станинах. Наявність цих напружень призводить до викривлення геометричної форми станини з плином часу, зі зміною температури, під впливом вібрацій та значних експлуатаційних навантажень. В деяких випадках внутрішні напруження можуть призводити до втрати статичної стійкості деякими стінками або перегородками станини. Така втрата стійкості обумовлює явище біфуркації викривлення геометричної форми станини, і робить неможливим виправлення геометричної форми за допомогою регульованих опор, що є звичайною операцією для станин важких верстатів. В даній роботі запропоновано спосіб виявлення елементів станини, що втратили статичну стійкість. Цей спосіб оснований на особливостях коливань механічних осциляторів з двома станами стійкої рівноваги, що відомі як осцилятори Дуффінга. В таких осциляторах при переході амплітуди коливань через точку біфуркації відбувається різка зміна частоти і спектрального складу коливань. Це показано в роботі на прикладі математичного моделювання коливань осциляторів з двома станами стійкої рівноваги. Факт різкої зміни параметрів коливань при перевищенні певної амплітуди обрано у якості критерію для визначення наявності у зварній станині елементів з двома стійкими станами рівноваги. За даним способом розроблено схему дослідницької установки і методику випробувань. Також запропоновано технологічні заходи для усунення виявлених у станині станів втрати статичної стійкості.

Ключові слова: важкий верстат, зварна станина, зварний шов, внутрішні напруження, осцилятор Дуффінга, дослідницький комплекс, коливання, спектр коливань, біфуркація.

М.С. МЕЛЬНИК, Я.С. АНТОНЕНКО

ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА СВАРНЫХ СТАНИН ТЯЖЕЛЫХ СТАНКОВ

Применение в металлорежущих станках станин сварных конструкций дает существенные преимущества по снижению металлоемкости и повышению технологичности по сравнению с литыми конструкциями. Однако важный недостаток сварных станин заключается в наличии значительных остаточных механических напряжений, которые обычно больше, чем в аналогичных литых станинах. Наличие этих напряжений приводит к искажению геометрической формы станины с течением времени, с изменением температуры, под влиянием вибраций и значительных эксплуатационных нагрузок. В некоторых случаях внутренние напряжения могут приводить к потере статической устойчивости некоторыми стенками или перегородками станины. Такая потеря устойчивости обуславливает явление бифуркации искривления геометрической формы станины, и делает невозможным исправление геометрической формы с помощью регулируемых опор, что является обычной операцией для станин тяжелых станков. В данной работе предложен способ обнаружения элементов станины, которые потеряли статическую устойчивость. Этот способ основан на особенностях колебаний механических осцилляторов с двумя состояниями устойчивого равновесия, известных как осцилляторы Дуффинга. В таких осцилляторах при переходе амплитуды колебаний через точку бифуркации происходит резкое изменение частоты и спектрального состава колебаний. Это показано в работе на примере математического моделирования колебаний осцилляторов с двумя состояниями устойчивого равновесия. Факт резкого изменения параметров колебаний при превышении определенной амплитуды выбран в качестве критерия для определения наличия в сварной станине элементов с двумя устойчивыми состояниями равновесия. Для данного способа разработана схема испытательной установки и методика испытаний. Также предложены технологические меры по устранению выявленных в станине состояний потери статической устойчивости.

Ключевые слова: тяжелый станок, сварная станина, сварной шов, внутренние напряжения, осциллятор Дуффинга, исследовательский комплекс, колебания, спектр колебаний, бифуркация.

M.S. MELNYK, YA.S. ANTONENKO

RESEARCH COMPLEX TO CONTROL THE QUALITY OF WELDED BED OF HEAVY MACHINE-TOOLS

The use of metal-welded structures in metal-cutting machines provides significant advantages in reducing metal consumption and improving processability compared to cast structures. However, an important disadvantage of welded beds is the presence of significant residual mechanical stresses, which are usually greater than in similar cast beds. The presence of these stresses leads to a distortion of the geometric shape of the bed over time, with temperature changes, under the influence of vibrations and significant operating loads. In some cases, internal stresses can lead to a loss of static stability by some walls or bed partitions. Such a loss of stability causes the bifurcation of the curvature of the geometric shape of the bed, and makes it impossible to correct the geometric shape with the help of adjustable supports, which is a common operation for beds of heavy machines. In this article, a method for detecting bed elements that have lost static stability is proposed. This method is based on the features of the oscillations of mechanical oscillators with two stable equilibrium states, known as Duffing oscillators. In this oscillators, when the oscillation amplitude passes through the bifurcation point, an abrupt change in the frequency and spectral composition of the oscillations occurs. This is shown in the work on the example of mathematical modeling of oscillations of oscillators with two stable equilibrium states. The fact of a sharp change in the oscillation parameters when a certain amplitude is exceeded is chosen as a criterion for determining the presence of the elements with two stable equilibrium states in the welded bed. For this method, a test equipment scheme and a test procedure have been developed. Also a technological methods to eliminate the states of static stability loss have been proposed.

Keywords: heavy machine tool, weld bed, weld seam, internal stresses, Duffing oscillator, research complex, oscillations, oscillation spectrum, bifurcation.

Вступ. Застосування у металорізальних верстатах базових деталей зварних конструкцій надає суттєві переваги по зниженню металоемності і підвищенню технологічності порівняно з литими конструкціями.

Застосування для виготовлення зварних станин низьковуглецевих сталей, що мають модуль Юнга $E = 2 \cdot 10^5$ МПа, замість чавуна з модулем Юнга $E = 0,8 \cdot 10^5 \dots 1,2 \cdot 10^5$ МПа, надає можливість майже в двічі

знизити металосміність при збереженні заданої жорсткості або підвищити жорсткість при збереженні розмірів і маси. Крім того, перехід на технологію виготовлення методом зварювання дозволяє суттєво скоротити або повністю відмовитися від ливарного виробництва, яке вимагає значно більших матеріальних та енергетичних витрат як на створення так і на експлуатацію порівняно зі зварювальним виробництвом.

Одночасно зварні станини верстатів мають і суттєві недоліки. Перший недолік полягає у зниженій вібростійкості зварних станин, оскільки сталеві вироби гірше поглинають та розсіюють енергію механічних коливань ніж чавунні. Внаслідок цього верстати зі зварними станинами більш схильні до виникнення автоколивань у процесі різання ніж аналогічні верстати з литими чавунними станинами. Особливо це проявляється на важких верстатах на чорнових режимах різання. Проте цей недолік досить успішно усувається шляхом заповнення незадіяних порожнин у станині спеціальними вібропоглинаючими сумішами.

Другий недолік полягає у тому, що після виконання зварних з'єднань у виробі утворюються значні залишкові механічні напруження. За значенням ці напруження як правило перевищують відповідний показник для чавунних відливок аналогічної форми і розмірів. Крім того просторовий розподіл цих напружень по об'єму виробу для зварних станин носить суттєво більш складний характер ніж для литих станин. Наявність цих напружень призводить до викривлення геометричної форми станини з плином часу, зі зміною температури, під впливом вібрацій та значних експлуатаційних навантажень. Зменшення залишкових напружень шляхом відпалу пов'язане зі значними енерговитратами і не завжди призводить до бажаного ефекту, крім того для станин важких верстатів є не завжди можливим внаслідок великих габаритів. Також для зменшення залишкових напружень відома технологія вібраційного старіння [1, 2, 3]. Вона полягає в накладенні на станину механічних коливань на одній з власних частот з виникненням резонансу. При цьому в станині створюються знакозмінні напруження, які складаючись з залишковими напруженнями в місцях їх зосередження перевищують межу плинності і викликають пластичні деформації матеріалу, знижуючи таким чином залишкові напруження. Однак практичне ефективне застосування такої технології потребує висококваліфікованих фахівців і складного вузькоспеціалізованого обладнання. Незначне відхилення амплітуди коливань від оптимального значення в меншу або в більшу сторону призводить або до неотримання ефекту, або до руйнування коштовного виробу. Важливим фактором для успішного застосування вібраційного старіння є попереднє визначення розподілу залишкових напружень для правильного вибору місць розташування вібраторів, напрямків та параметрів коливань.

Однак проблема залишкових внутрішніх напружень полягає не лише в викривленні геометрії

напрямних поверхонь з плином часу в наслідок релаксації цих напружень. За даними фахівців Краматорського заводу важкого верстатобудування зафіксовано чимало випадків, коли станина важкого верстата зварної конструкції суттєво змінювала свою форму без дії будь-яких навантажень лише від зміни температури, і при відновленні значення температури не поверталася в первісний стан. Такі станини (довжиною більше 6000 мм) мають знижену жорсткість на згин та на кручення порівняно зі станинами легких та середніх верстатів і встановлюється на фундаменті за допомогою спеціальних клинових регульованих опор, що дозволяють у межах пружних деформацій станини виправити геометричні похибки станини. Крок опор є близьким до найменшого поперечного розміру (висоти) станини і таким чином значну долю жорсткості верстата в цілому забезпечує фундамент. Після повторного регулювання опор вищезазначене явище викривлення станини могло повторюватися як від дії навантаження так і при коливаннях температури. Подібні явища можна спостерігати і на інших зварних виробках, особливо з тонкостінного листового металу (корпуси, ємності і т. п.). Але на таких виробках незначні викривлення форми не впливають на якість і функціональне призначення цих виробів і на них просто не звертають уваги.

Перша частина. Вищезазначений факт дозволив висунути припущення, що такі вироби і в тому числі станини мають два або більше стабільних станів з мінімумами потенціальної енергії пружних деформацій, тобто виявляють явище біфуркації. Це відбувається внаслідок того, що в процесі виконання зварних з'єднань метал шва внаслідок кристалізації і охолодження скорочується і створює одномірні стискаючі навантаження на основний метал шва, спрямовані переважно уздовж цього шва. Під дією цих навантажень, які власне і є внутрішніми залишковими напруженнями, плоскі елементи конструкції та стержні можуть втратити стійкість і зайняти один з двох можливих пружно-деформованих станів. Під дією зовнішніх навантажень або температурних деформацій можливий перехід між цими можливими станами, і якщо він відбувається то його наслідком є викривлення форми станини в цілому. Якщо таких деталей, що втратили стійкість в станині декілька, то відповідно і точок біфуркації буде декілька, що додатково ускладнює проблему.

Для боротьби з розглянутим явищем необхідно вирішити дві задачі: діагностичну, тобто створити методику і обладнання для виявлення і локалізації елементів, що втратили стійкість, і технологічну, тобто розробити способи повернення стійкості для виявлених елементів.

Метою даної роботи є вирішення діагностичної задачі з виявлення і локалізації фрагментів зварних станин, що втратили стійкість, та розробка технологічних рекомендацій по зменшенню виявлених залишкових внутрішніх напружень принаймні до рівня, при якому виключається втрата статичної стійкості будь-яким фрагментом станини.

Експериментально визначити наявність декількох

стійких станів рівноваги найпростіше шляхом статичних випробувань. Статичні випробування полягають у послідовному прикладанні і знятті навантаження на досліджувану станину, та вимірюванні координат контрольних точок станини, що не співпадають з координатами опор станини у дослідній наладці. Причому напрямком навантаження після кожного циклу навантаження-розвантаження необхідно змінювати на протилежний, а також проводити досліди по різним координатним осям і для декількох точок прикладання навантаження. Якщо у таких дослідах координати контрольних точок змінюють своє значення – це свідчить про наявність декількох стійких станів рівноваги.

Такий метод дослідження є достатньо інформативним і достовірним, але для дослідження станин важких верстатів він пов'язаний з суттєвими практичними складнощами, що обумовлені розмірами цих станин. Значення сил навантаження має бути близьким до значення максимальних робочих навантажень, що діють у верстаті, а для важких верстатів це становить декілька десятків кілоньютон. Внаслідок чого розміри, складність і вартість навантажувальних пристроїв виявляються близькими до відповідних показників станини. Враховуючи той факт, що важкі верстати виробляються малими партіями, а частіше окремими одиницями, і навантажувальні пристрої необхідно розробляти і виготовляти для кожної моделі верстата окремо, собівартість виробництва станин з урахуванням таких випробувань може подвоїтися. Теж саме стосується і пристроїв для вимірювання координат опорних точок. Тому поставлена задача діагностування потребує розробки більш економічних методів дослідження станин.

В роботі [4] теоретично показана можливість реконструкції поля внутрішніх напружень у неоднорідних стиснених стержнях виходячи з параметрів вимушених або вільних коливань цих стержнів. Ці дослідження є важливим підґрунтям і можуть бути використані за основу для розробки практичної технології, але вони не придатні для безпосереднього застосування для поставленої задачі. По-перше описана в цій роботі методика основана на чисельних методах і пов'язана з великими об'ємами розрахунків та масивами даних. Крім того її було випробувано на простих стержнях а станина важкого верстата являє собою не зрівняно більш складну конструкцію, відповідно об'єми розрахунків можуть виявитися неприйнятними. По друге, потрібно знати, тобто певним чином виміряти, повну картину коливань конструкції, що для таких деталей як станина важкого верстата виконати занадто складно і коштовно. По третє, для нашої задачі немає необхідності повністю відтворювати картину внутрішніх напружень, а достатньо лише виявлення факту наявності елементів зі втратою статичної стійкості, тавстановлення їх приблизної просторової локалізації.

Для вирішення такої задачі було розроблено метод дослідження на основі динамічних випробувань. Суть метода полягає у наступному. Якщо

розглядати станину верстата як балку без внутрішніх напружень у вільному стані, або закріплену будь-яким чином, але так, що створена система є статично визначною, то ця балка при збудженні зовнішньою періодичною силою на одній з власних частот являє собою гармонічний осцилятор і описується лінійним диференціальним рівнянням другого порядку. Вимушені коливання такої балки відбуваються за синусоїдальним законом, що під час випробування легко визначається за допомогою датчиків переміщення або віброшвидкості або віброприскорення і спектроаналізатора. При наявності внутрішніх напружень в рівнянні залежності пружної сили деформованої станини від координати пружного переміщення з'являються складові другого, третього і вищих ступенів. У такому випадку вимушені коливання станини будуть нелінійними і будуть мати суттєві відхилення від синусоїдального закону, що також легко визначається за допомогою спектроаналізатора. Факт наявності у спектрі коливань станини складових вищих порядків можна використовувати як критерій для виявлення значних залишкових внутрішніх напружень.

При наявності елементів, що втратили статичну стійкість і призвели до наявності двох або більше мінімумів потенціальної енергії пружної деформації, характер коливань також буде виявляти явище біфуркації. Тобто у випадку коли амплітуда коливань не досягає точки нестійкої рівноваги, та у випадку коли вона її перевищує параметри коливань і їх гармонічний склад будуть якісно відрізнятися. Це явище можна застосовувати як критерій для виявлення елементів, що втратили статичну стійкість.

Для обґрунтування запропонованого методу досліджень розглянемо найпростіший випадок поперечних коливань стисненого пружного стержня або пластини, що втратила стійкість рис. 1.

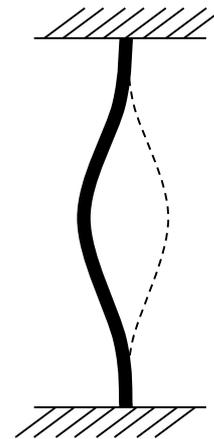


Рис. 1 – Схема коливань стисненої пластини, що втратила стійкість

Цьому випадку відповідають поперечні перегородки та фрагменти поздовжніх стінок станини між зварними швами. Характер їх деформації під дією внутрішніх напружень від зварних швів перебільшено наведений на рис. 2.

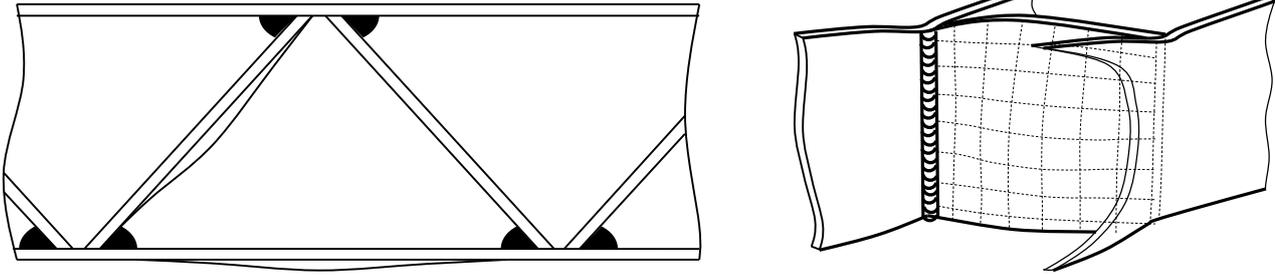


Рис. 2 – Характер деформації перегородок у зварних станинах.

Зрозуміло, що така деформація є бістабільною, і вона створює реактивні моменти згину в зоні зварних швів, що призводять до біфуркації викривлення геометрії конструкції в цілому. Вказану задачу, якщо не враховувати хвильові процеси в станині як у твердому пружному тілі та складний двох або тривимірний характер розподілу внутрішніх напружень, можна спростити і привести до розрахункової схеми рис. 3.

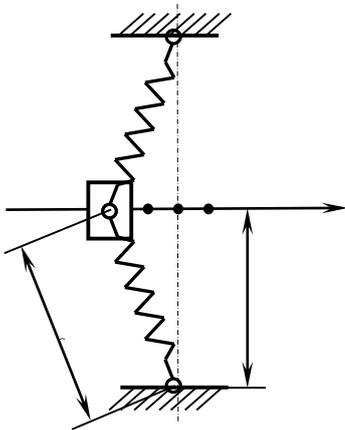


Рис. 3 – Розрахункова схема коливань стисненого стержня.

В цій схемі на умовно зосереджену масу стержня m , що коливається діє сила інерції $m\ddot{x}$ та пружна сила від пружин які замінюють собою деформацію стискання - розтягування стержня або пластини. В цьому місті слід зазначити, що довжина стержня у вільному стані перевищує відстань між опорами в закріпленому стані, тому еквівалентна схема має три стани рівноваги: двастійких, коли деформація пружин дорівнює нулю (позначені на рис. 3 точками 1 і 2), та один нестійкий, коли пружини стиснені і центр мас розташований на одній лінії з опорами (позначений на рис. 3 точкою 0). В теорії нелінійних коливань така схема відома [5, 6], має назву осцилятор Дуффінга і описується наступним диференціальним рівнянням:

$$m \frac{d^2x}{dt^2} - k_1x + k_2x^3 = 0 \quad (1)$$

де k_1 і k_2 постійні коефіцієнти; m – маса рухомого тіла; x – координата рухомого тіла; t – час. Схема на рис. 3 являє собою окремий випадок осцилятора Дуффінга.

Користуючись законом Гука для пружної деформації і відомими з розрахункової схеми (рис. 3) геометричними залежностями, отримаємо вираз для пружної сили що діє на зосереджену масу в напрямку коливань:

$$F_{пр} = C \left(x - \frac{2l_0x}{\sqrt{x^2+h^2}} \right) \quad (2)$$

де x – координата зосередженої маси у напрямку коливань; l_0 – довжина пружини у вільному стані; h – половина відстані між опорами; C – коефіцієнт жорсткості пружини. В реальній конструкції на пластину також діють сили в'язкого спротиву повітря і внутрішнього тертя $\beta m\dot{x}$, пропорційні до швидкості маси m , де β – коефіцієнт в'язкого тертя. Таким чином отримуємо диференціальне рівняння руху зосередженої маси m для розрахункової схеми рис. 3:

$$m \frac{d^2x}{dt^2} - \beta \frac{dx}{dt} - C \left(x - \frac{2l_0x}{\sqrt{x^2+h^2}} \right) = 0 \quad (3)$$

Для дослідження властивостей цього рівняння зручно застосувати один з чисельних програмних пакетів, наприклад MatlabSimulink. Отримане рівняння описує вільні коливання стержня (пластини). Щоб дослідити характер коливань треба зробити їх вимушеними, але просте додавання зовнішньої періодичної сили не дасть потрібного результату, оскільки отримане рівняння є нелінійним, отже частота власних коливань буде залежати від амплітуди. Зробити [5, 6] відомо, що при певних поєднаннях параметрів вимушені коливання такого осцилятора будуть хаотичними, що не дозволить визначити правомірність обраного критерію. Тому треба створити систему не з вимушеними коливаннями а з автоколиваннями. З цією метою додамо до диференціального рівняння (3) зовнішню періодичну силу, регульованої амплітуди і синхронізовану за напрямком зі швидкістю маси m . В такому випадку рівняння (3) прийме вигляд:

$$m \frac{d^2x}{dt^2} - \beta \frac{dx}{dt} - C \left(x - \frac{2l_0x}{\sqrt{x^2+h^2}} \right) = F \cdot \text{sign} \left(\frac{dx}{dt} \right) \quad (4)$$

де F – амплітуда зовнішньої періодичної сили; sign – функція, що дорівнює одиниці і має знак аргументу, в нашому випадку – знак швидкості.

На рис. 4 приведена реалізація отриманого рівняння (4) в середовищі Matlab Simulink.

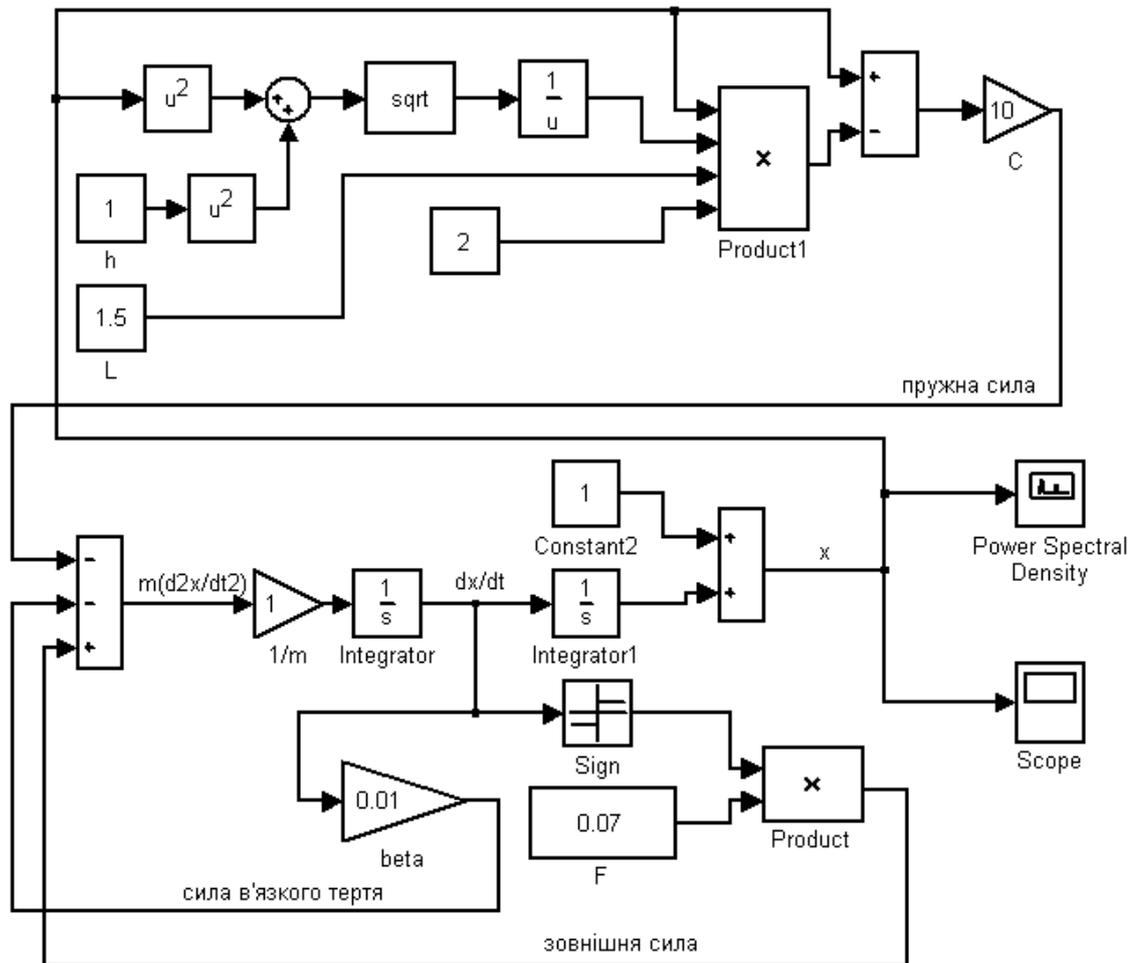


Рис. 4 – Реалізація диференціального рівняння коливань стисненого стержня в середовищі Matlab Simulink

Всі позначення на структурній схемі співпадають з позначеннями в рівнянні (4). Постійна Constant2 введена штучно, щоб задати початковий поштовх для збудження коливань зі зростаючою амплітудою. Параметри системи підібрані у співвідношенні, близькому до реального об'єкту, таким чином, щоб забезпечити наочність явища біфуркації. Дослідження

коливань виконувалися за допомогою осцилоскопа Scope, та спектроаналізатора Power spectral Density. На рис. 5 приведена осцилограма координати x за весь інтервал моделювання (300 сек). На цій осцилограмі приблизно на 80-й секунді чітко видно явище біфуркації, коли пікове значення координати x перетнуло точку нестійкої рівноваги 0 (рис. 3).

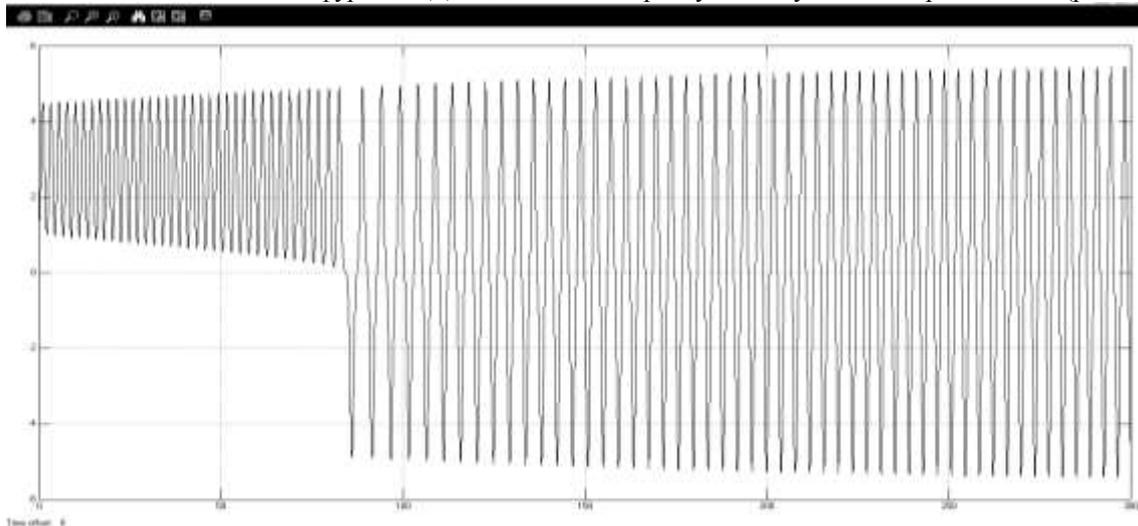


Рис. 5 – Осцилограма координати x

Після заходу амплітуди коливань за точку 0 відбулося різке двохкратне зростання амплітуди і приблизно двохкратне зменшення частоти коливань. Далі приведено розтягнені фрагменти осцилограми і спектри коливань безпосередньо перед моментом біфуркації рис. 6, та одразу після моменту біфуркації рис. 7.

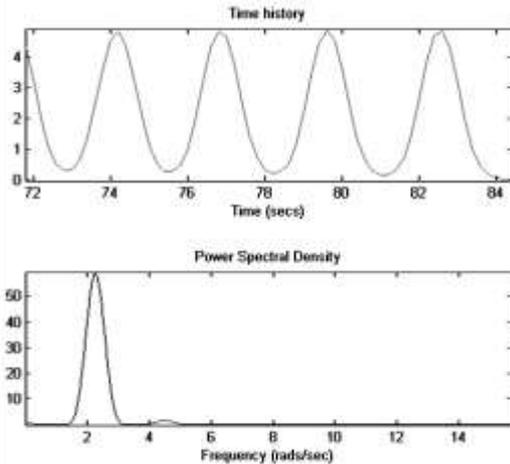


Рис. 6 – Осцилограма та спектр коливань до біфуркації

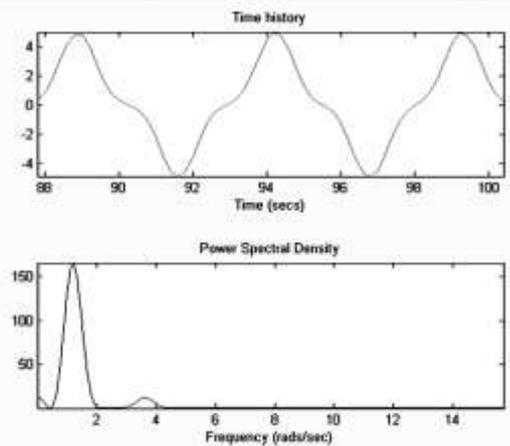


Рис. 7 – Осцилограма та спектр коливань після біфуркації

На цих рисунках чітко видно якісну різницю в характері коливань, а також відмінності спектрального складу, а саме: до моменту біфуркації в спектрі коливань крім основної частоти 2,2 рад/с присутня друга гармоніка (складова з подвоєною частотою – 4,4 рад/с), яка після моменту біфуркації повністю зникає, а замість цього знижується основна частота приблизно до 1,2 рад/с і з'являється третя гармоніка (складова з потроєною частотою 3,6 рад/с).

Висновки по першій частині. В результаті проведених теоретичних досліджень встановлено наступне.

1) Будь-яка коливальна система, яка має більш ніж один стан рівноваги, виявляє явище біфуркації характеру коливань.

2) Це явище біфуркації характеру коливань полягає в різкій зміні амплітуди, частоти і спектрального складу коливань коли амплітуда коливань перевищує певну точку біфуркації.

3) Деталі зварних конструкцій (в тому числі

станин важких верстатів), що втратили статичну стійкість під дією внутрішніх залишкових напружень від зварних швів належать до вищевказаних коливальних систем і виявляють явище біфуркації.

4) Різка зміна амплітуди, частоти і спектрального складу коливань при плавному збільшенні енергії синхронізованих вимушених коливань зварної станини може бути використана у якості критерію для виявлення факту втрати статичної стійкості певними елементами станини.

Друга частина. З урахуванням вищевказаного можна запропонувати наступну схему діагностичної установки (рис. 8) і методику випробувань.

За структурою і принципом дії запропонована схема повністю повторює теоретичну модель, наведену на рис. 4, та працює наступним чином. Регульоване джерело постійного струму забезпечує установку електричною енергією, а також забезпечує регулювання амплітуди силивібратора, який розгойдує досліджувану станину. Постійний струм від регульованого джерела подається на силовий інвертор, який забезпечує перемикання напрямку струму у обмотці вібратора (та відповідно і напрямку сили) синхронно до коливань станини.

Цю синхронізацію забезпечує ланцюг зворотного зв'язку, утворений датчиком віброшвидкості, що встановлюється на досліджуваній елемент станини, підсилювачем датчика та перемикачем напрямку сили, який керує силовим інвертором. Перемикач напрямку сили виконує функцію визначення напрямку (знаку) миттєвої швидкості досліджуваного елемента, та відповідного перемикання силового інвертора. Узгодження напрямків сили та швидкості забезпечує автоколивання системи з плавно зростаючою амплітудою. Додатково перемикач повинен виконувати функцію захисту і вимикати вібратор при перевищенні амплітудою певного значення, заздалегідь встановленого оператором для певного досліджуваного об'єкта. Параметри коливань спостерігаються оператором за допомогою осцилоскопа і спектроаналізатора.

Випробування треба проводити за наступним алгоритмом. Досліджувана станина встановлюється на дві опори по краях і закріплюється таким чином, щоб забезпечити максимум з можливих видів коливань. Закріплення має забезпечувати таку силу тертя станини по опорі, що становить 70..90% від максимального робочого навантаження на станину. Така міра забезпечить додатковий захист станини від перевантаження і руйнування, бо при перевищенні певної амплітуди почнеться прослизання станини по опорах, а це в свою чергу викличе збільшення втрат енергії коливань і зменшення амплітуди до допустимого рівня. Далі на станину встановлюється вібратор з датчиком швидкості, причому останній для зручності може бути вбудований у вібратор. Місце встановлення вібратора має відповідати місцю з найбільшою амплітудою коливань обраного типу (моди). Протягом випробувань місце встановлення вібратора і датчика декілька разів змінюється з метою локалізації елементів зі втраченою стійкістю.

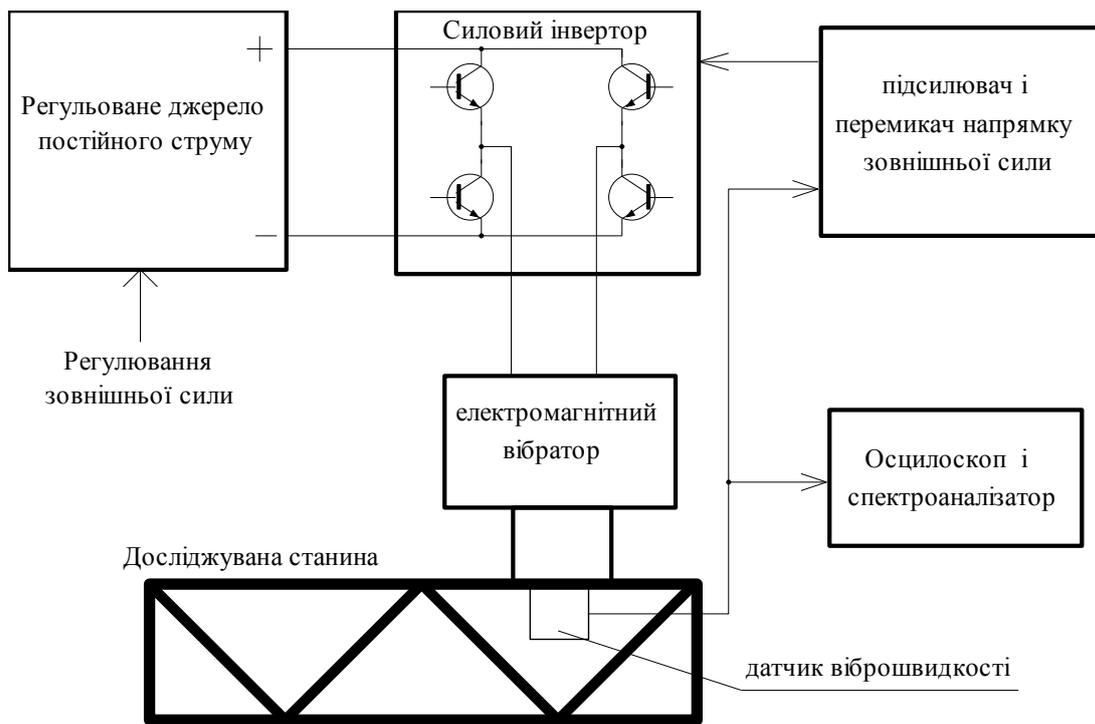


Рис. 8 – Схема діагностичної установки

Після закріплення вібратора оператор встановлює мінімальне значення сили вібратора та допустиме значення амплітуди коливань для обраного досліджуваного елемента станини. Допустиме значення амплітуди розраховується заздалегідь, наприклад методом скінчених елементів на підставі не перевищення допустимих механічних напружень в цьому елементі.

Для збудження автоколивань, якщо вони не виникли самостійно внаслідок власних шумів джерела живлення, можна застосувати початковий поштовх штучним перемиканням струму вібратора, або механічно – за допомогою удару гумовим молотком по досліджуваному елементу станини. Після збудження автоколивань оператор повинен плавно збільшувати амплітуду струму вібратора впритул до спрацювання встановленого захисту, і одночасно спостерігати за осцилограмою і спектром коливань, роблячи з них відповідні висновки за вищеописаним критерієм. Переставляючи вібратор з датчиком на різні елементи досліджуваної станини і порівнюючи значення амплітуд в точках біфуркації (якщо вони мають місце) можна встановити, який в якому саме місці або місцях станини відбулася втрата статичної стійкості.

У разі виявлення таких місць станину не можна вважати придатною для застосування у верстаті і вона відбраковується. Для виправлення такого браку можна запропонувати наступний технологічний прийом. За отриманими значеннями амплітуд в точках біфуркації або балки є стисненою та вип'яченою. В цих місцях амплітуда в точках біфуркації буде найбільшою, що очевидно з рис. 1, 2. Потім в цих місцях виконуються наскрізні розрізи перпендикулярно до зварних швів як

зображено на рис. 9, наприклад за допомогою газокисневого різача, які потім заварюються.

При виконанні таких розрізів на стиснених областях частково вивільняються внутрішні залишкові напруження (розпрямляється стиснена область, що втратила статичну стійкість), а під час заварювання відновлюється міцність та жорсткість елемента і створюються додаткові стягуючі зусилля, що розвантажують основні зварні шви. Таким чином можливо повернути цим елементам статичну стійкість, відповідно в станині в цілому зникне явище біфуркації і буде забезпечено стабільність її геометричної форми. Для формування більш чітких рекомендацій щодо розмірів цих розрізів і технології їх заварювання необхідно провести додаткові експериментальні дослідження, оскільки отримання вихідних даних для теоретичного розрахунку в кожному конкретному випадку є не виправдано складною і коштовною задачею.

На завершення слід вказати технічні можливості практичної реалізації запропонованої діагностичної установки. Так електрична та електронна частини установки є подібними до аналогічних функціональних вузлів в існуючих промислових установках і не мають створити ніяких складнощів у відповідних фахівців під час розробки принципіальної електричної схеми. Єдиного зауваження потребує перемикач напрямку сили і система захисту. Перемикач являє собою простий компаратор напруги, що порівнює сигнал від датчика швидкості з нулем і таким чином визначає знак швидкості. Такі прилади виробляються масово у вигляді інтегральних схем. Аналогічно на базі компаратора і тригера може бути побудована система захисту і обмеження амплітуди коливань.

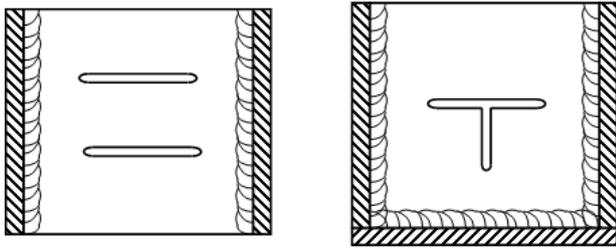


Рис. 9 – Схеми виконання розрізів для компенсації залишкових напружень

Осцилоскоп та спектроаналізатор є серійними вимірювальними приладами. Враховуючи порівняно низькі частоти досліджуваних коливань, для даної установки придатні будь-які, навіть найпростіші моделі таких приладів, причому це можуть бути як самостійні спеціалізовані прилади, так і персональний комп'ютер, оснащений аналогово-цифровим перетворювачем і відповідним програмним забезпеченням. Подібна ситуація стосовно електромагнітного вібратора. На даний момент розроблено і виробляється серійно ряд електромагнітних (електродинамічних) вібраторів, що застосовуються для динамічних випробувань різноманітних промислових виробів та будівельних споруд. Вібратор для запропонованої установки може бути підібраний за потрібним зусиллям з існуючих, або розроблений на їх основі. Зусилля вібратора має бути достатнім для компенсації втрат енергії коливань на в'язкий спротив повітря та внутрішню тертя, тобто воно може бути приблизно в 100...200 разів менше ніж максимальне робоче навантаження на досліджувану станину у складі верстата. Датчик віброшвидкості магнітоелектричної системи також є серійним виробом.

Висновки по другій частині. В другій частині розроблено схему діагностичної установки для випробувань зварних станин у виробничих умовах на наявність явища біфуркації геометричної форми. Також розроблено методику досліджень і первинні рекомендації щодо виправлення елементів зварних станин, що втратили статичну стійкість.

Подальшими етапами цих досліджень є створення експериментального зразка діагностичної установки і натурального зразка зварної станини з явищем біфуркації пружних деформацій від внутрішніх залишкових напружень, та перевірка практичної працездатності і розроблених теоретичних положень. Також необхідно провести експериментальні дослідження щодо технології повернення статичної стійкості тим елементам станини які її втратили під дією внутрішніх напружень від зварних швів.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Мельник Максим Сергійович (Мельник Максим Сергеевич, Melnik Maksim Sergeevich) – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри «Комп'ютеризовані мехатронні системи, інструмент і технології», Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ, тел.: (0626)41-47-82, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3126-0978>, e-mail: maksimmelnik941@gmail.com

Антоненко Яна Сергіївна (Антоненко Яна Сергеевна, Antonenko Yana Sergeevna) – асистент кафедри «Комп'ютеризовані мехатронні системи, інструмент і технології», Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ; тел.: (0626)41-47-82, e-mail: yana.s.antonenko@gmail.com

Список литературы

1. Дрыга А. И. Виброкомплексы для стабилизирующей обработки литых и сварных деталей // Станки и инструменты. — 1990. — № 6. — С. 28–29.
2. Дрыга А. И. Вибростабилизирующая обработка сварных и литых деталей в машиностроении: Теория, исследования, технология / Донбасская гос. машиностроительная академия. - Краматорск : ДГМА, 2004. - 167с. : рис., табл. - Библиогр. : с. 155-167.
3. Гедрович А. И. Оценка неравномерности снижения остаточных напряжений при виброобработке сварных соединений / А.И. Гедрович, А.Б. Жидков // Вісник КДПУ ім. М. Остроградського. – 2009. – № 2(55), Ч.1 – С. 40 – 43.
4. Dudarev V., Nedin R., Vatulyan A. On modeling and method of nondestructive reconstruction of residual stress-strain state in a rod. 10th International conference on mechanics, resource and diagnostics of materials and structures (MRDMS) : Ekaterinburg, RUSSIA. : MAY 16-20, 2016. UNSP 040013
5. Ivana Kovacic, Michael J Brennan. The Duffing equation : Nonlinear oscillators and their Behaviour. John Wiley & Sons, 2011. 386 p. ISBN 9780470715499
6. Lakshmanan M., Murali K. Chaos in nonlinear oscillators: Controlling and synchronization. — World scientific. Series on nonlinear science. — Vol. 13. — P. 35-90. — 1996. — ISBN 9789810221430.

References (transliterated)

1. Dryga A. I. Vibrokompleksy dlya stabiliziruyushchey obrabotki litykh i svarnykh detaley. [Vibrocomplexes for stabilizing treatment of cast and welded parts]. *Stanki i instrumenty*. 1990, no. 6, pp. 28–29.
2. Dryga A. I. *Vibrustabiliziruyushchaya obrabotka svarnykh i litykh detaley v mashinostroyenii: Teoriya. issledovaniya. Tekhnologiya* [Vibration-stabilizing treatment of welded and cast parts in mechanical engineering: Theory, research, technology]. Kramatorsk, Donbasskaya gos. mashinostroitelnaya akademiya Publ., 2004. 167 p.
3. Gedrovich A. I., Zhidkov A. B. Otsenka neravnomernosti snizheniya ostatochnykh napryazheniy pri vibroobrabotke svarnykh soyedineniy [Estimation of unevenness of reduction of residual stresses during vibroprocessing of welded joints]. *Visnik KDPU im. M. Ostrogradskogo*. 2009, no. 2(55), Vol. 1, pp. 40–43.
4. Dudarev V., Nedin R., Vatulyan A. On modeling and method of nondestructive reconstruction of residual stress-strain state in a rod. X Int. Sci. Conf. on mechanics, resource and diagnostics of materials and structures (MRDMS). Ekaterinburg, RUSSIA. : MAY 16-20, 2016. UNSP 040013
5. Kovacic I., Brennan M. J. The Duffing equation: Nonlinear oscillators and their Behaviour. John Wiley & Sons Publ., 2011. 386 p.
6. Lakshmanan M., Murali K. Chaos in nonlinear oscillators: Controlling and synchronization. World scientific. Series on nonlinear science. 1996, Vol. 13., pp. 35-90.

Поступила (received) 11.10.2018

В.И. ПОЛЯНСКИЙ**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕХНОЛОГИИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ФОРМУЮЩЕЙ ОСНАТКИ ДЛЯ МАКАРОННОЙ И КОНДИТЕРСКОЙ ОТРАСЛЕЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ**

Приведено теоретическое решение по определению максимально возможной производительности обработки при фрезеровании цилиндрической и торцевой фрезами с учетом ограничения по предельной (из условий прочности фрезы) толщине среза. Доказана эффективность применения схемы фрезерования торцевой фрезой в условиях однопроходного высокоскоростного резания с точки зрения повышения производительности и качества обработки на станках с ЧПУ типа «обрабатывающий центр». В отличие от схемы фрезерования цилиндрической фрезой, схема фрезерования торцевой фрезой обеспечивает формирование различных по кривизне боковых поверхностей профиля обрабатываемого изделия, что значительно расширяет ее технологические возможности, особенно при обработке на станках с ЧПУ типа «обрабатывающий центр». Показано, что схема фрезерования торцевой фрезой также обеспечивает перенос основной части образующегося в процессе резания тепла в снимаемый слой припуска (а не в поверхностный слой обрабатываемой детали). Это снижает вероятность появления прижогов и других температурных дефектов на обрабатываемой поверхности и соответственно повышает качество обработки. Теоретически обоснованы практические рекомендации по снижению энергоемкости обработки, состоящие в применении современных режущих инструментов с алмазными износостойкими покрытиями, которые обеспечивают снижение интенсивности трения в зоне резания. Результаты исследований, приведенные в работе, используются в практической деятельности при изготовлении сложнопрофильной формующей оснастки для макаронной и кондитерской отраслей промышленности в ОАО «Империя металлов» (г. Харьков), где производство оснащено современными высокоточными металлообрабатывающими центрами и станками с ЧПУ.

Ключевые слова: механическая обработка, формующая оснастка, фрезерование, торцевая фреза, производительность обработки, толщина среза, энергоемкость обработки.

В.І. ПОЛЯНСЬКИЙ**ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ТЕХНОЛОГІЇ МЕХАНІЧНОЇ ОБРОБКИ ФОРМУЮЧОЇ ОСНАТКИ ДЛЯ МАКАРОННОЇ ТА КОНДИТЕРСЬКОЇ ГАЛУЗЕЙ ПРОМИСЛОВОСТІ**

Наведено теоретичне рішення по визначенню максимально можливої продуктивності обробки при фрезеруванні циліндричною та торцевою фрезами з урахуванням обмеження з граничної (з умов міцності фрези) товщини зрізу. Доведено ефективність застосування схеми фрезерування торцевою фрезою в умовах однопрохідного високошвидкісного різання з точки зору підвищення продуктивності та якості обробки на верстатах з ЧПУ типу «обробний центр». На відміну від схеми фрезерування циліндричною фрезою, схема фрезерування торцевою фрезою забезпечує формування різних за кривизною бічних поверхонь профілю оброблюваного виробу, що значно розширює її технологічні можливості, особливо при обробці на верстатах з ЧПУ типу «обробний центр». Показано, що схема фрезерування торцевою фрезою також забезпечує перенесення основної частини тепла, що утворюється в процесі різання, в шар припуску, що знімається (а не в поверхневий шар оброблюваної деталі). Це знижує ймовірність появи припеків та інших температурних дефектів на обробленій поверхні й, відповідно, підвищує якість обробки. Теоретично обґрунтовано практичні рекомендації щодо зниження енергоємності обробки, які полягають в застосуванні сучасних ріжучих інструментів з алмазними зносостійкими покриттями, що забезпечують зниження інтенсивності тертя в зоні різання. Результати досліджень, що наведено в роботі, використовуються в практичній діяльності при виготовленні складнопрофільної формуючої оснастки для макаронної та кондитерської галузей промисловості в ВАТ «Імперія металів» (м. Харків), де виробництво оснащено сучасними високоточними металообробними центрами та верстатами з ЧПУ.

Ключові слова: механічна обробка, формуюча оснастка, фрезерування, торцева фреза, продуктивність обробки, товщина зрізу, енергоємність обробки.

V.I. POLYANSKY**IMPROVING THE EFFICIENCY OF MECHANICAL TREATMENT TECHNOLOGY FORMING MACHINE FOR PASTA AND CONFECTIONERY INDUSTRY INDUSTRIES**

A theoretical solution is given to determine the maximum possible productivity of machining when milling cylindrical and face milling cutters, taking into account the limitation on the limiting thickness (from the strength conditions of the milling cutter). Proved the effectiveness of the use of a milling scheme with a face mill in single-pass high-speed cutting conditions in terms of increasing productivity and machining quality on CNC machining centers of the "machining center" type. In contrast to the milling scheme of a cylindrical mill, the milling scheme with a face mill provides for the formation of different curvature of the side surfaces of the profile of the workpiece, which significantly expands its technological capabilities, especially when machining on machining centers. It is shown that the scheme of milling with a face mill also ensures the transfer of the main part of heat generated during the cutting process into the removable allowance layer (and not into the surface layer of the workpiece). This reduces the likelihood of prizing and other temperature defects on the treated surface and, accordingly, improves the quality of processing. Theoretically justified practical recommendations for reducing the energy intensity of processing, consisting in the use of modern cutting tools with diamond wear-resistant coatings, which reduce the friction intensity in the cutting zone. The research results presented in the work are used in practical activities in the manufacture of complex-profile forming tooling for macaroni and confectionery industries in the Empire of Metals OJSC (Kharkiv), where the production is equipped with modern high-precision metalworking centers and CNC machines.

Keywords: : machining, forming tooling, milling, face milling, processing capacity, shear thickness, power consumption of processing.

Введение. Применение на предприятиях Украины современных металлорежущих станков с ЧПУ типа «обрабатывающий центр» зарубежного производства и прогрессивных сборных режущих твердосплавных и керамических режущих инструментов с износостойкими покрытиями появилась возможность существенного повышения производительности и

качества механической обработки, изготовления высокоточных деталей машин. Несмотря на высокую стоимость этих станков и инструментов, они достаточно быстро окупаются и обеспечивают высокую прибыль предприятию. В особой мере это относится к изготовлению сложнопрофильной формующей оснастки для макаронной и кондитерской

© В. И. Полянский, 2018

отраслей промышленности в ОАО «Империя металлов» (г. Харьков), являющемся лидером среди ведущих участников данного рынка, на долю которого приходится более 50 % производства оснастки среди стран СНГ. Благодаря применению новых современных станков с ЧПУ и режущих инструментов с износостойкими покрытиями освоено производство основных видов формующей оснастки для макаронной и кондитерской отраслей промышленности. Вместе с тем, с появлением новых труднообрабатываемых материалов и повышением требований к их механической обработке возникает необходимость дальнейшего совершенствования технологий изготовления формующей оснастки для макаронной и кондитерской отраслей промышленности, особенно наиболее массово применяемой технологии фрезерования. Поэтому настоящая работа посвящена теоретическому исследованию закономерностей фрезерования и повышению эффективности его применения на современных металлорежущих станках с ЧПУ типа «обрабатывающий центр».

Анализ последних исследований и публикаций.

Фрезерование является одним из основных видов механической обработки материалов и поэтому ему в научно-технической литературе постоянно уделяется большое внимание [1-4]. В настоящее время разработаны теоретические основы фрезерования и нормативы режимов резания для фрезерных работ. Однако они в большей степени базируются на результатах экспериментальных исследований, т.е. на эмпирических данных, что затрудняет разработку обобщенных практических рекомендаций для решения задач существенного повышения производительности, качества и точности механической обработки с применением современных режущих лезвийных инструментов и станков с ЧПУ. В связи с этим, актуальной является задача обоснования наиболее эффективной схемы фрезерования на станках с ЧПУ и реализующих ее условий обработки (режимов резания, характеристик инструментов и т.д.). Настоящая работа является дальнейшим развитием работ [5, 6] по теоретическому определению новых технологических возможностей фрезерования на станках с ЧПУ.

Цель исследования. Теоретическое обоснование условий повышения производительности и снижения энергоемкости обработки при фрезеровании на станках с ЧПУ деталей формующей оснастки для макаронной и кондитерской отраслей промышленности.

Изложение основного материала. Для анализа технологических возможностей фрезерования цилиндрической фрезой следует определить максимально возможную производительность обработки с учетом обеспечения заданной (из условия прочности режущей части фрезы) толщины среза. Для удобства расчетов толщины среза удаляемый в процессе обработки материал представлен в виде горизонтальных элементарных слоев (рис. 1 [5]), которые контактируют с режущими зубьями фрезы под разными углами β . Для периферийного

элементарного слоя обрабатываемого материала максимальная толщина среза $a = l \cdot \cos \beta$, где $\cos \beta = \sqrt{2 \cdot t \cdot (D_{фр} - t) / D_{фр}}$; t – глубина резания, м; $D_{фр} = 2 \cdot R_{фр}$ – диаметр фрезы, м; $R_{фр}$ – радиус фрезы, м; $l = V_{дем} \cdot \tau$ – перемещение периферийного элементарного слоя обрабатываемого материала в горизонтальном направлении за период времени $\tau = L / V_{фр}$ между работой двух соседних зубьев фрезы, м; $V_{дем}$ – скорость перемещения детали, м/с; $L = 2 \cdot \pi \cdot R_{фр} / z$ – расстояние (по окружности) между двумя зубьями фрезы, м; z – число зубьев фрезы; $V_{фр}$ – скорость вращения фрезы, м/с.

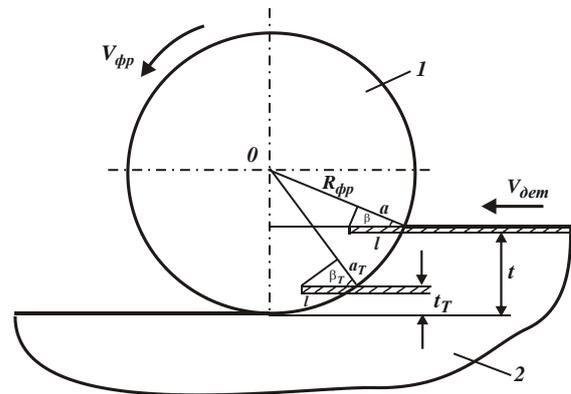


Рис. 1 – Расчетная схема параметров фрезерования цилиндрической фрезой:

1 – контур фрезы; 2 – обрабатываемая деталь

Тогда

$$a = \frac{2 \cdot \pi}{z} \cdot \frac{V_{дем}}{V_{фр}} \cdot \sqrt{t \cdot (D_{фр} - t)}. \quad (1)$$

Текущая толщина среза a_T , определяемая углом β_T и текущим значением t_T (рис. 1):

$$a_T = \frac{2 \cdot \pi}{z} \cdot \frac{V_{дем}}{V_{фр}} \cdot \sqrt{t_T \cdot (D_{фр} - t_T)}. \quad (2)$$

Из зависимости (2) вытекает, что $a_T < a$. Наибольшее значение a достигается при $t = D_{фр} / 2$:

$$a_{max} = \frac{\pi \cdot D_{фр}}{z} \cdot \frac{V_{дем}}{V_{фр}} = \frac{V_{дем}}{z \cdot n}, \quad (3)$$

где $V_{фр} = \pi \cdot D_{фр} \cdot n$; n – частота вращения фрезы, об./с.

Согласно зависимости (3), уменьшить a_{max} можно увеличением параметров z , n и уменьшением $V_{дем}$. Это указывает на эффективность применения высокоскоростного фрезерования.

Используя зависимость (1), можно определить максимально возможную производительность обработки $Q = B \cdot V_{дем} \cdot t$ с учетом обеспечения заданной (из условия прочности режущей части фрезы) толщины среза a , где B – ширина фрезерования, м.

Для этого следует зависимость (1) разрешить относительно скорости перемещения детали

$$V_{\text{дем}} = \frac{z \cdot a \cdot V_{\text{фр}}}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{t \cdot (D_{\text{фр}} - t)}}. \quad (4)$$

Максимально возможная производительность обработки Q определяется:

$$Q = B \cdot V_{\text{дем}} \cdot t = \frac{B \cdot z \cdot a \cdot V_{\text{фр}}}{2 \cdot \pi} \cdot \sqrt{\frac{1}{\left(\frac{D_{\text{фр}}}{t} - 1\right)}}. \quad (5)$$

Как видно, увеличить Q можно увеличением параметров B , z , a , $V_{\text{фр}}$ и t . Из приведенных зависимостей (4) и (5) следует, что с увеличением глубины резания t скорость перемещения детали $V_{\text{дем}}$ уменьшается, а Q , наоборот, увеличивается в связи с увеличением длины дуги контакта цилиндрической фрезы с обрабатываемым материалом. Из зависимости (5) также следует, что эффект увеличения Q обусловлен уменьшением отношения $D_{\text{фр}}/t$, т.е. эффективно уменьшать и $D_{\text{фр}}$. Однако это приведет к уменьшению числа зубьев фрезы z , что, согласно зависимости (5), вызовет уменьшение Q . Поэтому с целью увеличения Q целесообразно уменьшать $D_{\text{фр}}/t$ за счет увеличения глубины резания t .

Наибольшая максимально возможная производительность обработки достигается при $t = D_{\text{фр}}/2$:

$$Q = \frac{B \cdot z \cdot a \cdot V_{\text{фр}}}{2 \cdot \pi}. \quad (6)$$

На наибольшую максимально возможную производительность обработки не влияет диаметр фрезы $D_{\text{фр}}$. С учетом $V_{\text{фр}} = \pi \cdot D_{\text{фр}} \cdot n$, имеем:

$$Q = \frac{B \cdot z \cdot n \cdot a \cdot D_{\text{фр}}}{2}. \quad (7)$$

В этом случае Q определяется и диаметром фрезы $D_{\text{фр}}$: чем больше $D_{\text{фр}}$, тем больше Q . При фрезеровании торцевой фрезой скорость перемещения детали $V_{\text{дем}}$ можно определить, используя зависимость (4), рассматривая вместо глубины резания t ширину фрезерования B :

$$V_{\text{дем}} = \frac{z \cdot a \cdot V_{\text{фр}}}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{B \cdot (D_{\text{фр}} - B)}}. \quad (8)$$

Тогда максимально возможная производительность обработки Q определится аналогично (5):

$$Q = B \cdot V_{\text{дем}} \cdot t = \frac{z \cdot a \cdot V_{\text{фр}} \cdot t}{2 \cdot \pi} \cdot \sqrt{\frac{1}{\left(\frac{D_{\text{фр}}}{B} - 1\right)}}. \quad (9)$$

Наибольшая максимально возможная

производительность обработки достигается при $B = D_{\text{фр}}/2$:

$$Q = \frac{t \cdot z \cdot a \cdot V_{\text{фр}}}{2 \cdot \pi}. \quad (10)$$

Сравнивая зависимости (6) и (10), полученные применительно к процессам фрезерования цилиндрической и торцевой фрезами, видно, что они содержат разные параметры B и t . Однако, поскольку зависимости получены для условий $t = D_{\text{фр}}/2$ и $B = D_{\text{фр}}/2$, то $t = B$ и значения наибольших максимально возможных производительностей обработки при фрезеровании цилиндрической и торцевой фрезами одинаковы. При условии $t = D_{\text{фр}}$ наибольшая максимально возможная производительность обработки Q при фрезеровании торцевой фрезой, определяемая зависимостью (10), увеличится в 2 раза, т.е.

$$Q = \frac{t \cdot z \cdot a \cdot V_{\text{фр}}}{\pi}. \quad (11)$$

Это указывает на возможность достижения более высокой максимально возможной производительности обработки при фрезеровании торцевой фрезой с шириной фрезерования, равной диаметру фрезы $D_{\text{фр}}$.

Исходя из зависимости (11), увеличить Q при фрезеровании торцевой фрезой можно увеличением параметров t , z , a , $V_{\text{фр}}$, осуществляя однопроходное высокоскоростное фрезерование. Наряду с увеличением Q , данная схема фрезерования обеспечивает перенос основной части образующегося в процессе резания тепла в снимаемый слой припуска (а не в поверхностный слой обрабатываемой детали), что снижает вероятность появления прижогов и других температурных дефектов на обрабатываемой поверхности и соответственно повышает качество обработки. При фрезеровании цилиндрической фрезой фактически все образующееся в процессе резания тепло уходит в поверхностный слой обрабатываемой детали, что повышает вероятность появления температурных дефектов на обрабатываемой поверхности и снижает качество обработки. Следовательно, преимуществом применения схемы торцевого фрезерования является повышение производительности и качества обработки вследствие снижения теплового воздействия на обрабатываемую поверхность детали.

Используя данную схему фрезерования, можно с высокими показателями производительности и качества обрабатывать плоскости, пазы, отверстия и различные сложнопрофильные поверхности на станках с ЧПУ. В отличие от схемы фрезерования цилиндрической фрезой, схема фрезерования торцевой фрезой обеспечивает формирование различных по кривизне боковых поверхностей профиля обрабатываемого изделия, что значительно расширяет ее технологические возможности, особенно при обработке на станках с ЧПУ типа «обрабатывающий

центр». Поэтому данная схема фрезерования получила широкое применение при изготовлении формующей оснастки для макаронной и кондитерской отраслей промышленности [6] в ООО «Империя металлов» (г. Харьков).

Важным условием повышения эффективности фрезерования является снижение условного напряжения резания (энергоёмкости обработки), определяемого зависимостью [7], полученной для шлифования:

$$\sigma = \cos \psi_1 \cdot \cos \alpha \cdot \frac{2 \cdot \tau_{сдв}}{[1 - \sin(\alpha + \psi_1)]}, \quad (12)$$

где $\tau_{сдв}$ – предел прочности на сдвиг обрабатываемого материала, Н/м²; $\psi_1 = \psi + \gamma$; ψ – условный угол трения абразивного зерна с обрабатываемым материалом; γ – отрицательный передний угол режущего абразивного зерна; α – угол входа абразивного зерна в обрабатываемый материал.

При фрезеровании передний угол режущего лезвия фрезы γ , как правило, является положительным, тогда угол $\psi_1 = \psi - \gamma$ меньше, чем при шлифовании, что снижает энергоёмкость обработки σ .

Как следует из зависимости (12), уменьшить энергоёмкость обработки σ можно уменьшением угла α – входа режущего лезвия фрезы в обрабатываемый материал до значения $\alpha = 0$. Однако это осуществимо при точении, поскольку при фрезеровании выполняется условие $\alpha > 0$ и соответственно энергоёмкость обработки σ больше.

Уменьшение угла $\psi_1 = \psi - \gamma$ также способствует уменьшению энергоёмкость обработки σ (как при точении, так и при фрезеровании). Это указывает на необходимость увеличения переднего угла режущего лезвия фрезы γ и уменьшения интенсивности трения в зоне резания за счет уменьшения коэффициента трения инструментального и обрабатываемого материалов. Как известно, наименьшим коэффициентом трения обладает алмаз. Поэтому эффективно использовать алмазные инструменты или твердосплавные инструменты с алмазными износостойкими покрытиями.

Результаты исследований, приведенные в настоящей работе, используются в практической деятельности при изготовлении формующей оснастки для макаронной и кондитерской отраслей промышленности в ОАО «Империя металлов» (г. Харьков). Производство оснащено современными высокоточными металлообрабатывающими центрами и станками с ЧПУ (рис. 2). На рис. 3 – рис. 4 приведены некоторые образцы изготавливаемой оснастки, на рис. 5 – рис. 7 – сложнопрофильные изделия различного назначения.



Рис. 2 – Производственный участок, оснащенный современными высокоточными металлообрабатывающими центрами и станками с ЧПУ



Рис. 3 – Фильеры для производства отсадного печенья



Рис. 4 – Оснастка для производства пряничко



Рис. 5 – Валы для производства пельменей и вареников



Рис. 6 – Шестерня шевронного насоса из нержавеющей стали 12Х18Н10Т



Рис. 7 – Корпус распределителя карбюратора

Выводы. В работе приведены аналитические решения по определению максимально возможной производительности обработки при фрезеровании цилиндрической и торцевой фрезами с учетом ограничения по предельной (из условий прочности фрезы) толщине среза. Доказана эффективность применения схемы фрезерования торцевой фрезой в условиях однопроходного высокоскоростного резания с точки зрения повышения производительности и качества обработки на станках с ЧПУ типа «обрабатывающий центр». Установлено, что в отличие от схемы фрезерования цилиндрической фрезой, схема фрезерования торцевой фрезой обеспечивает формирование различных по кривизне боковых поверхностей профиля обрабатываемого изделия. Показано, что схема фрезерования торцевой фрезой также обеспечивает перенос основной части образующегося в процессе резания тепла в снимаемый слой припуска (а не в поверхностный слой обрабатываемой детали). Это снижает вероятность появления прижогов и других температурных дефектов на обрабатываемой поверхности и соответственно повышает качество обработки. Теоретически обоснованы практические рекомендации по снижению энергоемкости обработки, состоящие в применении современных режущих инструментов с алмазными износостойкими покрытиями, которые обеспечивают снижение интенсивности трения в зоне резания. Результаты исследований, приведенные в работе, используются в практической деятельности при изготовлении сложнопрофильной формующей оснастки для макаронной и кондитерской отраслей промышленности в ОАО «Империя металлов» (г. Харьков).

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Полянський Володимир Іванович (Полянський Владимир Иванович, Polyansky Vladimir Ivanovich) – кандидат технічних наук, Генеральний директор, ТОВ «Імперія металів», м. Харків; тел.: +38-067-57-80-906; e-mail: tools@imperija.com.

Список литературы

1. Бобров В.Ф. *Основы теории резания металлов*. Москва: Машиностроение, 1975. 343 с.
2. Грановский Г.И., Грановский В.Г. *Резание металлов: учебник*. Москва: Высшая школа, 1985. 304 с.
3. Лолодзе Т.Н. *Прочность и износостойкость режущего инструмента*. Москва: Машиностроение, 1982. 320 с.
4. *Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения*. В десяти томах. Т. 3. «Резание материалов лезвийными инструментами» / Под общей редакцией Ф. В. Новикова и А. В. Якимова. Одесса : ОНПУ, 2003. 546 с.
5. Полянский В. И. Условия повышения эффективности высокоскоростного фрезерования на основе снижения энергоемкости обработки. *Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. Збірник наукових праць*. Краматорськ, 2017. Вип. № 41. С. 18-24.
6. Полянский В.И. ООО «Империя Металлов». *Труды 16-й Междунар. науч.-техн. конф. «Физические и компьютерные технологии»*. Харьков: ХНПК «ФЭД», 2010. С. 156-160.
7. Новіков Ф.В., Анділахай О.О. *Основы струминно-абразивной обработки дробных деталей : монография*. Харків: Вид. ХНЕУ, 2014. 348 с.

References (transliterated)

1. Bobrov V. F. *Osnovy teorii rezaniya metallov [Fundamentals of the theory of cutting metals]*. Moscow: Mashinostroyeniye, 1975. 343.
2. Granovskiy G.I., Granovskiy V.G. *Rezaniye metallovo: uchebnik [Metal cutting: textbook]*. Moscow: Vysshaya shkola, 1985. 304.
3. Loladze T.N. *Prochnost' i iznosostoykost' rezhushchego instrumenta [Durability and wear resistance of the cutting tool]*. Moscow: Mashinostroyeniye, 1982. 320.
4. *Fiziko-matematicheskaya teoriya protsessov obrabotki materialov i tekhnologii mashinostroyeniya [Physico-mathematical theory of material processing and engineering technology]* V desyati tomakh. T. 3. *Rezaniye materialov lezviynymi instrumentami [Cutting materials with blade tools]*. Pod obschey redaktsiyey F. V. Novikova i A. V. Yakimova. Odessa , ONPU, 2003. 546.
5. Polyanskiy V.I. *Usloviya povysheniya effektivnosti vysokoskorostnogo frezerovaniya na osnove snizheniya energoyemkosti obrabotki [Conditions for improving the efficiency of high-speed milling on the basis of reducing the energy intensity of processing]* *Nadiynist' instrumentu ta optimizatsiya tekhnologichnykh sistem. Zbirnyk naukovykh prats' [Nadiynist instrumentu ta optimizatsiya tehnologichnykh systems. Zbirnik naukovih prats]*. Kramators'k, 2017, no. 41. pp. 18-24.
6. Polyanskiy V.I. ООО «Империя Металлов» [Ltd. "Empire Metals"] *Trudy 16-y Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. Fizicheskiye i komp'yutemyye tekhnologii [Proceedings of the 16th International. scientific and technical conf. "Physical and computer technologies"]*. Khar'kov, KHNPК "FED", 2010. pp. 156-160.
7. Novikov F.V., Andilakhay O.O. *Osnovy struminno-abrazivnoy obrabotky drobnykh detaley : monografiya [Establish a string-abrasive processing of other details: monographs]*. Khar'kov, Vyd. KhNEU, 2014. 348.

Поступила (received) 30.10.2018

Г.П. КЛИМЕНКО, Я.В. ВАСИЛЬЧЕНКО, М.В. ШАПОВАЛОВ

КАЧЕСТВО И НАДЕЖНОСТЬ ЭКСПЛУАТАЦИИ СБОРНЫХ ТВЕРДОСПЛАВНЫХ ИНСТРУМЕНТОВ

Повышение эффективности металлообработки, внедрение технологий материалосбережений в машиностроении, повышение качества продукции невозможно без разработки научно обоснованного управления эксплуатацией режущего инструмента. Статья посвящена актуальной проблеме современного машиностроительного производства, для которого характерна тенденция внедрения режущих инструментов сборной конструкции. Особую важность вопроса качества эксплуатации инструмента приобретают для тяжелого машиностроения, представителем которого является ПрАТ НКМЗ. Представлен алгоритм комплексной оценки качества эксплуатации режущего инструмента. Новизной научных разработок статьи является квалиметрический подход к оценке качества и надежности сборных инструментов. На основе статистических данных о работе сборных инструментов в условиях завода, определены резервы повышения их качества эксплуатации. Показано, что характерным отказом фрезы является поломка пластины. Это приводит к повышенному расходу инструментального материала. Установлено, что с точки зрения надежности фреза представляет собой параллельную систему. В работе впервые получено математическую зависимость определения надежности сборных фрез, на базе которой разработаны рекомендации их рациональной эксплуатации. Предложен принцип формирования системы рациональной эксплуатации инструмента и разработана методология квалиметрических исследований системы, в соответствии с которой процесс эксплуатации инструмента рассматривается с позиции управления его качеством. Квалиметрический подход к оценке качества работы инструмента позволил разработать методы количественной оценки качества процесса и обосновать структуру свойств, составляющих качество эксплуатации инструмента. Результаты исследований использованы для разработки общемашиностроительных нормативов режимов резания на тяжелых станках.

Ключевые слова: качество, надежность, эксплуатация, режущий инструмент, твердый сплав, квалиметрия.

Г.П. КЛИМЕНКО, Я.В. ВАСИЛЬЧЕНКО, М.В. ШАПОВАЛОВ

ЯКІСТЬ І НАДІЙНІСТЬ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ЗБІРНИХ ТВЕРДОСПЛАВНИХ ІНСТРУМЕНТІВ

Підвищення ефективності металообробки, впровадження технологій матеріалосбереження в машинобудуванні, підвищення якості продукції неможливо без розробки науково обґрунтованого управління експлуатацією різального інструменту. Стаття присвячена актуальній проблемі сучасного машинобудівного виробництва, для якого характерна тенденція впровадження різальних інструментів збірної конструкції. Особливу важливість питання якості експлуатації інструменту набувають для важкого машинобудування, представником якого є ПрАТ НКМЗ. Представлений алгоритм комплексної оцінки якості експлуатації різального інструменту. Новизною наукових розробок статті є квалиметричний підхід до оцінки якості та надійності збірних інструментів. На основі статистичних даних про роботу збірних інструментів в умовах заводу, визначені резерви підвищення їх якості експлуатації. Показано, що характерною відмовою фрези є поломка пластини. Це призводить до підвищеної витрати інструментального матеріалу. Встановлено, що з точки зору надійності фреза являє собою паралельну систему. В роботі вперше отримано математичну залежність визначення надійності збірних фрез, на базі якої розроблено рекомендації їх рациональної експлуатації. Запропоновано принцип формування системи рациональної експлуатації інструменту і розроблена методологія квалиметричних досліджень системи, відповідно до якої процес експлуатації інструменту розглядається з позиції управління його якістю. Квалиметричний підхід до оцінки якості роботи інструменту дозволив розробити методи кількісної оцінки якості процесу і обґрунтувати структуру властивостей, які складають якість експлуатації інструменту. Результати досліджень використані для розробки загальномашинобудівних нормативів режимів різання на важких верстатах.

Ключові слова: якість, надійність, експлуатація, різальний інструмент, твердий сплав, квалиметрия.

G. P. KLYMENKO, Y. V. VASILCHENKO, M. V. SHAPOVALOV

QUALITY AND RELIABILITY OF OPERATION OF ASSEMBLY OF SOLID-MOLDING TOOLS

Improving the efficiency of metalworking, the introduction of materials-saving technologies in engineering, improving product quality is impossible without the development of scientifically-based management of the operation of the cutting tool. The article is devoted to the actual problem of modern engineering production, which is characterized by the tendency to introduce cutting tools of a composite construction. Of particular importance is the quality of operation of the tool acquired for heavy engineering, whose representative is PrAT NKMZ. An algorithm for a comprehensive assessment of the quality of operation of the cutting tool is presented. The novelty of the scientific development of the article is a qualimetric approach to assessing the quality and reliability of prefabricated tools. On the basis of statistical data on the operation of prefabricated tools in the conditions of the plant, the reserves for improving their quality of operation are determined. It is shown that the characteristic failure of the cutter is a plate failure. This leads to increased consumption of tool material. It has been established that, from the point of view of reliability, the mill is a parallel system. In this paper, for the first time, a mathematical relationship was obtained to determine the reliability of modular milling cutters, on the basis of which recommendations for their rational exploitation were developed. The principle of forming a rational tool operation system is proposed and a methodology for qualimetric research of the system is developed, in accordance with which the tool operation process is considered from the standpoint of its quality management. The qualimetric approach to assessing the quality of the instrument operation has allowed us to develop methods for quantifying the quality of the process and substantiate the structure of the properties that make up the instrument operation quality. The research results were used to develop general engineering standards for cutting conditions on heavy machines.

Keywords: quality, reliability, operation, cutting tools, hard alloy, qualimetry.

Введение. Исследования уровня эксплуатации инструмента можно проводить с помощью квалиметрии – науке о качестве. Процесс эксплуатации режущего инструмента можно рассматривать как объект с точки зрения его качества. А уровень эксплуатации режущего инструмента - как количественную характеристику качества процесса эксплуатации, его оценку.

Под количественной оценкой качества в квалиметрии понимается некоторая функция отношения показателя качества рассматриваемого объекта к показателю качества объекта, принятого за эталон (или базу). Оценка, таким образом, это относительная безразмерная величина [1, 2].

Материалы исследований. Для построения и успешного функционирования систем управления

© Г.П. Клименко, Я.В. Васильченко, М.В. Шаповалов, 2018

качеством механообработки деталей необходима точная информация о качестве не только производимой продукции, но и качестве процессов, способствующих ее выпуску, среди которых одним из важных является процесс эксплуатации режущих инструментов.

Одним из важных этапов оценки качества режущего инструмента и процесса его эксплуатации является выбор и обоснование метода оценки, среди которых наибольшее распространение получили следующие: дифференциальный метод, метод комплексной оценки, смешанный метод оценки, метод интегральной оценки, статистические методы оценки, метод экспертной оценки, метод оценки качества разнородной продукции [3].

Для выбора лучшего из возможных вариантов конструкции инструментов уже на стадии предпроектного анализа применяется комплексный метод оценки качества режущего инструмента:

$$K = \sum_{n=1}^N (q \cdot K_B),$$

где K - уровень качества режущего инструмента;

$q = (a / A)$ – отношение значений N параметров оцениваемого (a) и базового (A) режущего инструмента;

K_B – коэффициенты весомости каждого из рассматриваемых параметров.

Для выбора наилучшего варианта по результатам испытаний опытных образцов инструментов ими рекомендуется также использовать метод оценки по упрощенной целевой функции (например, по производительности процесса резания или по обратной ей величине - основному времени).

$$K = 1 + \sum_{N=1}^N [(q - 1) \cdot \gamma]$$

При расчете коэффициентов весомости, в том числе и при учете качества изготовления продукции, могут быть два основных методических подхода: первый базируется на исследовании статистических данных, а второй предполагает индивидуальный анализ эффекта у потребителя. При этом первый учитывает стихийно сложившиеся предпочтения, второй - результаты объективного анализа.

Первый из них состоит в том, что берется определенный массив параметров однородных инструментов и обобщенные оценки потребителем их качества и методом регрессионного анализа находятся коэффициенты весомости. В качестве показателя полезности, ценности товара наиболее целесообразно использовать цены на международном рынке. Этот метод назван методом ценовых корреляций.

Суть второго метода состоит в том, что рассматривается базовый образец и условно принимаются изменения каждого параметра, и затем проводится подробный социально-экономический анализ изменения полезности инструмента для его потребителя. Этот метод назван методом социально-экономического анализа. Этот метод предполагает дифференцированный анализ полезности инструмента для потребителя.

Уровень качества K рассчитывается через проявившийся от этого изменения параметра эффект (Δ) у потребителя относительно базовой цены C_0 . Этот эффект должен быть интегральным ($\Delta_{\text{инт}}$) за весь срок службы (ресурс):

$$K = 1 + \frac{\Delta_{\text{инт}}}{C_0}$$

Цель работы – повышение эффективности использования сборного твердосплавного инструмента в условиях завода тяжелого машиностроения.

Согласно основным принципам квалиметрии для оценки качества эксплуатации режущего инструмента составлялась иерархическая схема всех наиболее важных свойств, характеризующих процесс эксплуатации [4, 5].

Качество эксплуатации как комплексное свойство эксплуатации рассматривается на самом высоком нулевом уровне иерархической схемы, а составляющие его - ниже, обобщенные свойства на более высоком уровне структуры. В свою очередь каждое свойство первого уровня состоит из некоторого числа менее общих свойств, лежащих на еще более высоком втором уровне рассмотрения и т.д. Совокупность технических свойств, составляющих качество эксплуатации инструмента, представлялось в виде иерархической структуры так, что каждое свойство j -го уровня рассмотрения определяется свойствами $j + 1$ уровня. Структурная схема строилась вплоть до простых свойств, то есть до свойств, которые далее не могут быть разложены, или до свойств, которые достаточно просто оцениваются. В последнем случае свойства, лежащие на самом высоком уровне, можно назвать условно-простыми.

Структура свойств или оценки качества предварительно разрабатывалась рабочей группой, а затем оценивалась экспертно для условий завода ПрАТ НКМЗ.

На основании результатов экспертной оценки уточнялась номенклатура свойств, составляющих качество. На рис.1 представлен алгоритм комплексной оценки качества эксплуатации режущего инструмента.

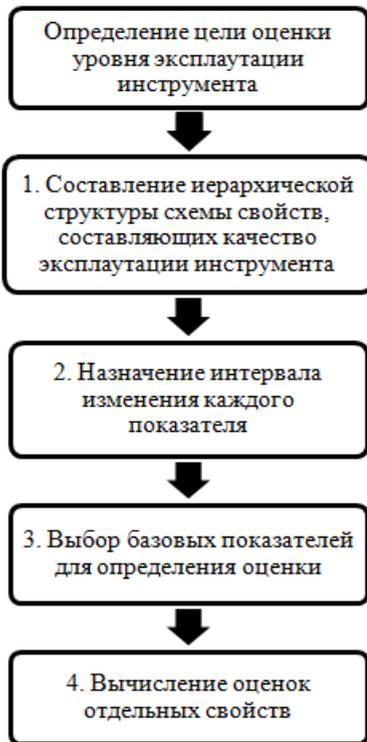
Качество эксплуатации режущего инструмента на 1-ом уровне рассмотрения определяется 3-мя группами свойств: техническими свойствами, связанными с обработкой, которые проявляются непосредственно в процессе обработки деталей резанием, а также свойствами обслуживания и организационными свойствами.

K техническим свойствам на 2-ом уровне рассмотрения отнесены качество технологической дисциплины и технологической подготовки. Первое свойство характеризуется соответствием заготовок, оборудования, инструмента, СОЖ, режимов резания и норм износа, требованиями нормативно-технической документации. Второе свойство определяется прогрессивностью используемых заготовок, оборудования, инструментов, СОЖ, техпроцессов.

Свойства обслуживания на 2-ом уровне рассмотрения определяются качеством восстановления (заточки и ремонта) и другими свойствами

обслуживания (обеспеченностью режущим инструментом, качеством транспортирования и хранения) [6, 7].

Первый этап.
Оценка единичных свойств процесса эксплуатации



Второй этап.
Оценка сложных свойств процесса эксплуатации и его качества в целом



Рис. 1 – Алгоритм комплексной оценки уровня качества эксплуатации режущего инструмент

К организационным свойствам на более низком

уровне рассмотрения относятся проверка соответствия инструмента ГОСТам и ТУ, сдаче отходов, технадзор, централизованность производства инструментов. Они определяют организационные мероприятия по повышению качеству эксплуатации инструмента.

Каждое свойство 4-го уровня может быть разложено на свойства еще более низкого уровня, например: качество заготовок характеризуется припуском, твердостью, дефектами поверхности; состояния оборудования - жесткостью, точностью, виброустойчивостью и т.д.

Анализ свойств, составляющих качество эксплуатации инструмента в условиях ПрАТ НКМЗ, показал, что наиболее важными свойствами сборного инструмента являются: правильность выбора режимов резания и конструкций инструмента, качество заготовок, шероховатость поверхности, надежность инструмента.

При разработке технологических процессов в условиях завода часто даны неправильные рекомендации по выбору конструкций инструментов и особенно марок инструментальных материалов. Частично эти ошибки корректируются рабочими в процессе эксплуатации инструментов. Режимы резания при обработке на станках превышают нормативные значения на величину от 20 до 90%, что также приводит к значительному ухудшению качества обрабатываемой поверхности.

На основании статистических данных получена регрессионная зависимость фактической шероховатости Ra_{ϕ} от фактической подачи S_{ϕ} (рис.2):

$$Ra_{\phi} = 10,477S_{\phi}^{1,57}$$

В заводских нормативах отсутствуют рекомендации по рациональной эксплуатации сборных инструментов. Для повышения качества эксплуатации инструмента необходимо внедрять в производство новое металлорежущее оборудование и организовывать участок централизованной заточки режущего инструмента.

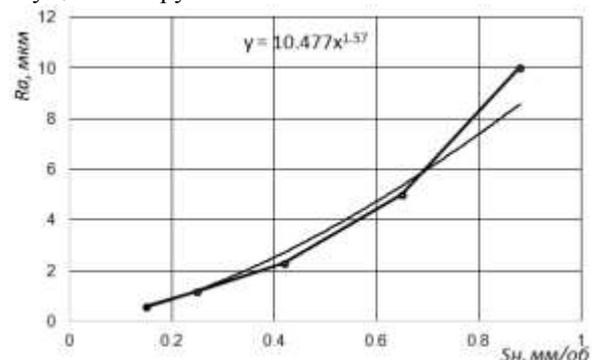


Рис. 2 – Зависимость фактических параметров шероховатости Ra_{ϕ} от S_{ϕ} подачи

Качество заготовок обследовалось по результатам моментных наблюдений. Припуски превышают предусмотренные на 20% и более. 10% заготовок соответствует требованиям, предъявляемым к ним. Завышенные припуски приводят к излишнему расходу материала, возрастанию трудоемкости механической обработки, повышению эксплуатационных расходов

станочной обработки (расход инструмента, электроэнергии и др.). Недостаточные припуски могут препятствовать исправлению погрешностей от предшествующей обработки и получению необходимой точности и шероховатости обработанной поверхности на выполняемом переходе. СОЖ на заводе применяется во всех случаях, где она требуется.

При работе инструментом из быстрорежущей стали используется эмульсон – 70%, твердосплавным инструментом – 30%, сульфозрезол используется при работе твердосплавным и быстрорежущим инструментом на глубокорасточных станках, СОЖ не применяется при обработке твердосплавным инструментом на тяжелых токарных станках с высотой центров 600 мм и выше, долбежных и строгальных станках в связи с отсутствием систем охлаждения, при фрезеровании твердосплавными торцовыми фрезами.

Уровень качества заточки оценивался по проценту централизованной заточки.

Из обследованного инструмента у 70% инструмента выбор геометрических параметров, инструментального материала соответствуют нормативам. Правильность выбора режимов резания производилось с учетом приведения фактических режимов к нормативным.

Наиболее важным свойством качества эксплуатации инструмента является его надежность. Представляет интерес рассмотрение надежности многолезвийных инструментов на примере фрез.

Анализ статистических данных о работе фрез сборной конструкции в условиях ПрАТ НКМЗ показал, что при фрезеровании наблюдается одновременное участие в работе нескольких режущих зубьев.

Статический анализ работы фрез с $z=4$ при обработке стали 9ХС с глубиной резания $t=4...6$ мм, подачей $S=0,12...0,15$ мм/зуб и скоростью резания $V=62,8$ м/мин показал, что чаще всего фреза снимается со станка при выходе из строя всех 4х зубьев. Такая эксплуатация фрез приводит к повышенному расходу инструментальных материалов. Характерным отказом пластин фрезы является их поломка, а не достижение критерия затупления пластины. Статический анализ показал, что закон распределения стойкости фрез – экспоненциальный [8].

При рассмотрении сборной фрезы как системы режущих элементов, в которой отказ одного из них не приводит к полному отказу фрезы, с точки зрения надежности фреза представляет собой параллельную систему с пассивным резервом. В этом случае, при отказе первой режущей пластины её нагрузку при резании воспринимает следующая за ней режущая пластина. При этом надежность фрезы в целом снижается, то есть уменьшается вероятность безотказной работы. Для сборной концевой фрезы, имеющей два зуба, средний период стойкости определяется:

$$T_{фр} = \int_0^{\infty} P_{фр} dt = \frac{1}{\lambda_1} + \frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1 + \lambda_2}$$

В случае если $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda$, то надежность фрезы определяется:

$$P_{фр} = 2e^{-\lambda_1 t} - e^{-2\lambda_2 t}; T = \frac{3}{2\lambda}$$

Сборные концевые твердосплавные фрезы имеют $z=2, 3, 4$. Формулы для расчета вероятности безотказной работы каждой фрезы получены аналогично перемножением вероятности двучленов.

Для сборной концевой фрезы, имеющей три зуба:

$$P_{фр} = P^3 + 3P - 3P^2$$

При экспоненциальном законе распределения времени безотказной работы каждого зуба фрезы получаем:

$$P_{фр} = e^{-\lambda_1 t} + e^{-\lambda_2 t} + e^{-(\lambda_1 + \lambda_2)t}$$

где λ_1 и λ_2 – интенсивность отказов зубьев фрезы.

Для сборной концевой фрезы, имеющей четыре зуба:

$$P_{фр} = 4P + 4P^3 - 6P^2 - P^4$$

При экспоненциальном законе распределения времени безотказной работы каждого зуба фрезы получаем:

$$P_{фр} = e^{-\lambda_1 t} + e^{-\lambda_2 t} + e^{-(\lambda_1 + \lambda_2)t}$$

где λ_1 и λ_2 – интенсивность отказов зубьев фрезы.

Для определения стратегии замены отказавших режущих элементов фрез введем понятие кратности резервирования k .

$$k = \frac{Z - Z_m}{Z_m}$$

где: Z – число зубьев фрезы,

Z_m – число отказавших зубьев.

Зависимости $P_{фр}(t)$ при резервировании с различной кратностью приведены в таблице 1.

Целесообразный уровень надежности фрезы определяется минимумом суммарных затрат на эксплуатацию инструмента и на его покупку. В зависимости от необходимого уровня надежности фрезы выбирается стратегия замены её режущих элементов.

Повышение надежности путем замены одного зуба приводит к недоиспользованию фрезы, повышению суммарных затрат. Наиболее целесообразно с точки зрения рационального уровня надежности для фрезы с $Z=4$ снимать её со станка при выходе из строя 2-х зубьев.

Для получения информации об условиях обработки деталей сборными концевыми фрезами, режимов резания, стойкости режущих пластин и видов их отказов был осуществлен сбор статистических данных в условиях ПрАТ НКМЗ.

Обработка корпусной детали из сплава 9ХС осуществлялась сборными концевыми фрезами $Z=4$ с пластинами из твердого сплава Т5К10 на станке модели Ferrari A 17 – E 550.

Для испытаний выбрана партия пластин $N=16$ штук. В таблице 2 приведены условия испытаний.

Целью испытаний пластины было установление закона распределения их наработки на отказ (периода стойкости), представленный в графическом виде на рисунке 3.

Таблица 1 – Выбор стратегии замены пластин фрезы

Число фрезы	зубьев	Кратность резервирова ния	Вероятность безотказной работы фрезы			
			Стратегия замены зубьев	λt		
				0,5	0,75	1
Z=2		1/1	После отказа 1-го зуба	0,7301	0,8431	0,6005
Z=3		1/2	После отказа 2-х зубьев	0,5243	0,6575	0,3063
		2/1	После отказа 1-го зуба	0,6721	0,8288	0,4683
Z=4		1/3	После отказа 1-го зуба	0,3741	0,4862	0,1443
		2/2	После отказа 2-х зубьев	0,6734	0,8288	0,4683
		3/1	После отказа 1-го зуба	0,9203	0,9757	0,8407

Таблица 2 – Условия испытаний сборных концевых фрез

Модель станка	Обрабатываемый материал	Режущая пластина		Характер припуска	Сечение среза		Скорость резани V, м/мин
		Размер, мм	Материал		t, мм	S, мм/об	
Ferrari A 17 – E 550	Сталь 9 ХС	l=17, d=9,525 s=4,76	T5K10	Непрерывный	6	0,15	62,8

Инструмент работает до отказа, которым может быть износ, выкрашивание, поломка режущей пластины.

Выбирается критерий затупления, который использует рабочий при обработке аналогичных деталей. (искрение, вибрации и др.). При испытаниях было принято, что износ по задней поверхности не должен превышать $h=1,6$ мм.

При испытаниях фиксировались следующие величины: характеристика станка и обрабатываемой заготовки, режимы резания, вид отказа, период стойкости, размеры износа и разрушение твердосплавной пластины.

Установлено, что закон распределения наработки на отказ не противоречит экспоненциальному.

Наибольшую твердость, износостойкость, красностойкость имеют сменные неперетачиваемые пластины «Seco» марки TP1000.

Фирмой «Sandvik Coromant» для чистовой обработки углеродистых и низколегированных сталей производятся твердосплавные пластины с покрытиями марок GC4020, GC1025.

Фирмой «Pramet» производятся твердосплавные пластины серии 6000 и 8000, для чистовой обработки сталей могут применяться сплавы 6620 и 8816.

На основании анализа областей применения и рекомендованных производителями условий эксплуатации режущих пластин можно определить аналоги твердых сплавов, позволяющие выполнять высокопроизводительное чистовое фрезерование углеродистых и низколегированных сталей.

Таблица 3 – Сравнительная таблица областей применения сменных неперетачиваемых пластин зарубежных производителей

Фирма производитель	Марки сплавов	
Seco	TP1000/TP2000	CP200
Sandvik Coromant	GC 4020	GC 1025
Pramet	6620	8016

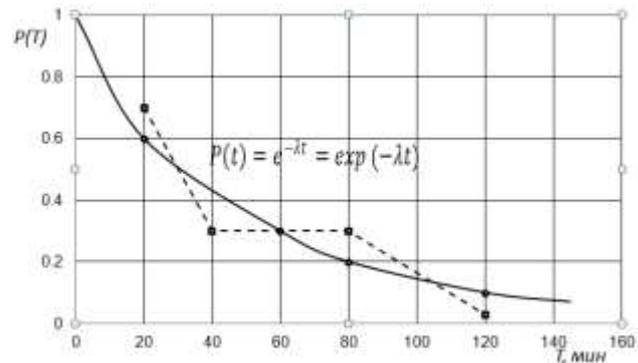


Рис. 3 – График зависимости надежности сборных фрез от периода их стойкости T

Проведенный анализ условий эксплуатации режущего инструмента при чистовом фрезеровании углеродистых и низколегированных сталей позволил определить параметры инструментального материала, обеспечивающие качественный поверхностный слой, высокую геометрическую точность, могут эксплуатироваться на высоких скоростях резания. Высокой твердостью, износостойкостью, температуростойкостью, теплопроводностью обладают двухкарбидные твердые сплавы марок T30K4, T60K6, T14K8, T15K6. Среди сплавов производства фирм «Seco», «Sandvik Coromant», «Pramet» для чистового фрезерования целесообразно применять сплавы марок TP1000, TP2000, CP200, GC4020, GC1025, 6620, 8016.

Выводы. 1. Разработана система свойств, составляющих качество эксплуатации инструмента для условий завода ПрАТ НКМЗ с применением квалитетического подхода.

2. Установлено, что наиболее важными свойствами качества эксплуатации сборного инструмента являются: правильность выбора режимов резания и конструкций инструмента, качество заготовок, шероховатость поверхности, надежность инструмента.

3. Показано, что отклонение подачи от нормативной существенно влияет на качество поверхности в соответствии с полученной зависимостью, связывающей подачу с уровнем шероховатости поверхности.

4. Уровень надежности сборной фрезы, определенный по критерию суммарных, обеспечивается стратегией, регламентированной заменой режущих пластин.

5. Для повышения надежности фрез сборной конструкции рекомендуется: применение износостойких покрытий, регламентированная замена инструмента, применять твердые сплавы марок TP1000, TP2000 фирмы «Seco», GC4020, GC1025 фирмы «Sandvik Coromant», 6620, 8016 фирмы «Pramet».

Список литературы

1. Клименко Г.П. Надежность сборных инструментов и процесса их обслуживания на тяжелых токарных станках. *Надійшла інструменту та оптимізація технологічних систем. Зб. статей.* Краматорськ: ДДМА, 2001. Вип. 10. с. 13-18.
2. Клименко Г.П., Андронов А.Ю. Повышение надежности технологической системы при механообработке на тяжелых токарных станках. *Сучасні технології в машинобудуванні: Зб. наукових праць.* Харків: НТУ «ХПІ», 2009. Вип. 3. с. 42-49.
3. Клименко Г.П. Обеспечение оптимального уровня надежности твердосплавных резцов для тяжелых станков. *Высокие технологии в машиностроении.* Харьков: ХГПУ, 1999. с. 48-49.
4. Клименко Г.П. Керування раціональною експлуатацією інструменту на важких верстатах. *Високі технології в машинобудуванні: Зб. наукових праць.* Харків: НТУ «ХПІ», 2003. Вип. 1(6). с. 59-64.
5. Klymenko G.P., Vasilchenko Y.V., Subotin O.V. Strategies on quality in heavy machinbuilding metalworking. *Strategy of Quality in industry and Education.* Vol.1. Днепр - Варна, 2018. с. 84-89.
6. Клименко Г.П., Я.В. Васильченко. Определение надежности обслуживания режущего инструмента. *Високі технології в машинобудуванні: Зб. наукових праць.* Харків: ХГПУ, 2000. с. 134-137.
7. Клименко Г.П. Технологічне управління якістю експлуатації інструменту для важких верстатів. *Современные вопросы*

производства и ремонта в промышленности и на транспорте. Брно - Киев: АТМ України, 2018. с. 97-100.

8. Клименко Г.П., Хоменко, К.С. Чабан. Определение надежности концевых фрез сборной конструкции. *Надійшла інструменту та оптимізація технологічних систем. Зб. статей.* Краматорськ, ДДМА, 2010. Вип. 26. с. 63-67.

References (transliterated)

1. Klymenko G.P. Nadezhnost sborniyh instrumentov i protsessa ih obsluzhivaniya na tyazhelyih tokarnyih stankah. [Reliability of prefabricated tools and the process of their maintenance on heavy lathes] *Nadiynist rizalnogo instrumentu ta optimizatsiya tehnologichnih sistem. Zb. statey.* [Reliability of the cutting tool and optimization of technological systems. Sat. articles]. Kramatorsk: DDMA Publ., 2001, Vol. 26, pp. 13-18.
2. Klymenko G.P., Andronov A.Yu. Povyishenie nadezhnosti tehnologicheskoy sistemy pri mehanoobrabotke na tyazhelyih tokarnyih stankah. [Improving the reliability of the technological system during machining on heavy lathes]. *Suchasni tehnologii v mashinobuduvanni: Zb. Naukovih prats.* [Modern technologies in mechanical engineering: Sat. sci. tr.]. Kharkov: NTU "KhPI" Publ., 2009, Vol. 3. pp. 42-49.
3. Klymenko G.P. Obespechenie optimalnogo urovnya nadezhnosti tverdospлавnyih reztsov dlya tyazhelyih stankov. [Providing the optimum level of reliability for carbide cutters for heavy machine tools] *Vysokie tehnologii v mashinostroenii.* [High technology in mechanical engineering]. Kharkov: HGPU Publ., 1999, pp. 48-49.
4. Klymenko G.P. Keruvannya ratsionalnoyu ekspluatatsiyeu instrumentu na vazhkykh verstatah. [Management of rational operation of the tool on heavy machine tools]. *Visokie tehnologii v mashinobuduvanni: Zb. naukovih prats.* [Modern technologies in mechanical engineering: Sat. sci. tr.]. Kharkov: NTU "KhPI" Publ., 2003, Vol. 1(6). pp. 59-64.
5. Klymenko G.P., Vasilchenko Y.V., Subotin O.V. Strategics on quality in heavy machinbuilding metalworking. *Strategy of Quality in industry and Education.* vol.1. Dnepr-Varna Publ., 2018, pp. 84-89.
6. Klymenko G.P., Ya.V. Vasilchenko. Opredelenie nadezhnosti obsluzhivaniya rezhushchego instrumenta. [Determination of the reliability of service cutting tools]. *Visokie tehnologii v mashinobuduvanni: Zb. naukovih prats.* [Modern technologies in mechanical engineering: Sat. sci. tr.]. Kharkov: HGPU Publ., 2000, pp. 134-137.
7. Klymenko G.P. Tehnologichne upravlinnya yakistyu ekspluatatsiyeu instrumentu dlya vazhkykh verstatv. [Technological quality management of the tool for heavy machine tools]. *Sovremnynye voprosyi proizvodstva i remonta v promyshlshdennosti i na transporte.* [Modern issues of production and repair in industry and transport]. Brno - Kiev: ATM Ukraine Publ., 2018, pp. 97-100.
8. Klymenko G.P., Homenko, K.S. Chaban. Opredelenie nadezhnosti kontsevyih frez sbornoy konstruktssii. [Determination of the reliability of end mills assembly team]. *Nadiynist instrumentu ta optimizatsiya tehnologichnih sistem.* [Reliability of the cutting tool and optimization of technological systems. Sat. articles]. Kramatorsk: DDMA Publ., 2010, Vol. 26. pp. 63-67.

Поступила (received) 30.10.2018

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Клименко Галина Петрівна (Клименко Галина Петровна, Klymenko Galina Petrovna) – доктор технічних наук, професор кафедри «Комп'ютеризованих мехатронних систем, інструментів та технологій», Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ, Україна, тел.: (050) 219-85-11, e-mail: wasilchenko.ua@gmail.com.

Васильченко Яна Василівна (Васильченко Яна Васильевна, Vasilchenko Yana Vasilievna) – доктор технічних наук, доцент, завідувач кафедри «Комп'ютеризованих мехатронних систем, інструментів та технологій», Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ, Україна, тел.: (050) 814-77-30, e-mail: wasilchenko.ua@gmail.com.

Шаповалов Максим Валерійович (Шаповалов Максим Валериевич, Shapovalov Maxim Valerievich) – асистент кафедри «Комп'ютеризованих мехатронних систем, інструментів та технологій», Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ, Україна, тел.: (066) 336 08 08; e mail: harleymax1979@gmail.com.

Г.И. КОСТЮК, О.Д. СЕМЕНЕНКО

ВЛИЯНИЯ СПОСОБА ЗАДАНИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ И ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТВЕРДОГО СПЛАВА ВЗ НА ХАРАКТЕР И ЭФФЕКТИВНОСТЬ ОБРАЗОВАНИЯ НАНОСТРУКТУР

На основе решения совместной задачи теплопроводности и термоупругости в зоне действия ионов (В+, С+, N+, Al+, V+, Cr+, Ni+, Y+, Zr+, Hf+ W+) на твердый сплав ВЗ при использовании стохастических значений, полученных квантово-механическим методом теплофизических и термомеханических характеристик, определялись максимальные температурные напряжения, объемы, зоны где реализуются наноструктурные и максимальные глубины их залегания. Показано, что для квантово - механического способа задания теплофизических и термомеханических характеристик всегда реализуется большее значение температурных напряжений, объема образования наноструктур. Тогда как объемы наноструктур для двух способов задания теплофизических и термомеханических характеристик фактически не отличаются.

Исследования показали, что с ростом массы иона величины температурных напряжений уменьшаются, объемы наноструктур снижаются незначительно и при действии иона гафния и вольфрама они снижаются больше чем на порядок. Максимальная глубина залегания наноструктуры также снижается и для малых энергий составляет 2-5 10^{-9} м. При чем наиболее существенно в случае задания стохастических значений теплофизических и термомеханических характеристик эти глубины уменьшаются с ростом массы иона. В результате исследования определены ионы, их заряды и сорта для которых необходимо проводить расчеты с использованием квантово-механического метода.

Ключевые слова: технологические параметры лазера, фемтосекундный лазер, твердый сплав «ВЗ», режущий инструмент, наноструктурные слои.

Г. І. КОСТЮК, О.Д. СЕМЕНЕНКО

ВПЛИВ СПОСОБУ ЗАВДАННЯ ТЕПЛОФІЗИЧНИХ І ТЕРМОМЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТВЕРДОГО СПЛАВА ВЗ НА ХАРАКТЕР І ЕФЕКТИВНІСТЬ СТВОРЕННЯ НАНОСТРУКТУР

На основі рішення спільної задачі теплопровідності і термопружності в зоні дії іонів (В +, С +, N +, Al +, V +, Cr +, Ni +, Y +, Zr +, Hf + W +) на твердий сплав ВЗ при використанні стохастичних значень, отриманих квантово - механічним методом теплофізичних і термомеханічних характеристик, визначалися максимальні температурні напруження, обсяги, зони де реалізуються наноструктурні і максимальні глибини їх залягання. Показано, що для квантово - механічного способу завдання теплофізичних і термомеханічних характеристик завжди реалізується більше значення температурних напружень, обсягу освіти наноструктур. Тоді як обсяги наноструктур для двох способів завдання теплофізичних і термомеханічних характеристик фактично не відрізняються.

Дослідження показали, що з ростом маси іона, величини температурних напружень зменшуються, обсяги наноструктур знижуються незначно і при дії іона гафнію і вольфраму вони знижуються більше ніж на порядок. Максимальна глибина залягання наноструктури також знижується і для малих енергій становить 2-5 10^{-9} м. При чому найбільш істотно в разі завдання стохастичних значень теплофізичних і термомеханічних характеристик ці глибини зменшуються з ростом маси іона. В результаті дослідження визначено іони, їх заряди і сорти для яких необхідно проводити розрахунки з використанням квантово- механічного методу.

Ключові слова: технологічні параметри лазера, фемтосекундний лазер, твердий сплав «ВЗ», ріжучий інструмент, наноструктурні шари.

G. I. KOSTYUK, O.D. SEMENENKO

INFLUENCE OF THE METHOD OF THE TASK OF THE THERMOPHYSICAL AND THERMOMECHANICAL CHARACTERISTICS OF SOLID B3 ALLOY ON THE CHARACTER AND EFFICIENCY OF FORMATION OF NANOSTRUCTURES

Based on the solution of the joint problem of heat conduction and thermoelasticity in the zone of action of ions (B +, C +, N +, Al +, V +, Cr +, Ni +, Y +, Zr +, Hf + W +) on hard alloy B3 using stochastic values and obtained quantum-mechanical by the method of thermophysical and thermomechanical characteristics, the maximum temperature stresses, volumes, zones where nanostructural and maximum depths of their occurrence were determined. It is shown that for the quantum mechanical method of specifying thermophysical and thermomechanical characteristics, a larger value of thermal stresses, the volume of formation of nanostructures is always realized. While the volumes of nanostructures for the two ways of specifying the thermophysical and thermomechanical characteristics are virtually no different.

Studies have shown that with an increase in the mass of an ion, the temperature stresses decrease, the volumes of nanostructures decrease slightly, and under the action of hafnium and tungsten ions they decrease more than an order of magnitude. The maximum depth of the nanostructure is also reduced and for low energies is 2-5 10^{-9} m. Moreover, in the case of setting stochastic values of thermophysical and thermomechanical characteristics, these depths decrease with increasing ion mass. As a result of the study, ions were determined, their charges and varieties for which it is necessary to carry out calculations using the quantum mechanical method.

Keywords: laser technological parameters, femtosecond laser, hard alloy «B3», cutting tool, nanostructured layers.

Введение. В настоящее время широко применяется твердые сплавы на основе Al_2O_3 особенно зарубежом, что требует более точного нахождения технологических параметров при которых могут быть образованы наноструктуры. Все это показывает, что необходимо провести исследование напряженного состояния, вероятного значения объема наноструктур и глубин его залегания для двух случаев задания теплофизических и термомеханических характеристик.

Работа выполнена в рамках программы Министерства образования и науки Украины «Новые и ресурсосберегающие технологии в энергетике, промышленности и агропромышленном комплексе» (подсекция 13 «Аэрокосмическая техника и транспорт») по темам: «Создание физико-технических основ повышения качества материалов аэрокосмических конструкций» и «Разработка технологических основ интегрированных технологий плазменно-ионной обработки деталей

© Г.И. Костюк, О.Д. Семененко, 2018

аэрокосмической техники» (подсекция 6 «Физико-технические проблемы материаловедения»), «Концепция создания наноструктур, нано- и традиционных покрытий с учётом влияния адгезии на эффективность и работоспособность деталей АТ, АД и РИ», «Экспериментально-теоретическое исследование получения наноструктур при действии ионных и светолучевых потоков на конструкционные материалы и РИ», хозяйственных работ и договоров о сотрудничестве.

Состояние вопроса. В настоящее время существует значительное число работ, которые рассматривают теоретические аспекты образования наноструктур [1-7], но они, к сожалению, не учитывают энергию затрачиваемую на образование нано зерна а также квантово-механический метод описания теплофизических и термомеханических характеристик. Поэтому, рассмотрение этих вопросов является актуальным и важным для оценки вероятности образования нано структур при действии потока ионов на твердый сплав ВЗ.

Постановка задачи исследования. Решалась совместная задача теплопроводности и термоупругости с разными теплофизическими и термомеханическими характеристиками твердого сплава, полученными с использованием стохастических значений и рассчитанных квантово-механическим методом.

Результаты и их обсуждение. Проводилось исследование максимальных температурных напряжений, максимальной глубины залегания нанокластера и объема нанокластера в зависимости от энергии ионов (B^+ , C^+ , N^+ , Al^+ , V^+ , Cr^+ , Ni^+ , Y^+ , Zr^+ , Hf^+ W^+)

При расчетных значениях теплофизических и термомеханических характеристик полученных квантово-механическим методом и их стохастическими значениями. Проводилось сравнение значений этих величин, что позволило определить те значения при которых наблюдается корреляция и когда они существенно отличаются. Для иона бора эти значения для зарядового числа 1,2 и 3 существенно отличаются, а также отличается их значение при разных способах задания теплофизических и термомеханических характеристик

Температурные напряжения обычно больше при квантово-механическом способе задания теплофизических и термомеханических характеристик в зоне твердого сплава ВЗ, (практически в 10 раз больше чем при использовании стохастических значений). Максимальные глубины залегания при энергиях до 2 кэВ практически не отличаются при разных способах задания теплофизических и термомеханических характеристик. Тогда как при больших энергиях использование их стохастических значений приводит к большим значениям максимальных глубин залегания

Для объема наноструктуры наблюдается, следующие условия для энергии порядка 2 кэВ реализуются одинаковые значение иона при обоих случаях, тогда как с дальнейшим ростом значений

энергии иона при стохастических значениях реализуются несколько большие величины объема зерна.

При переходе к ионам углерода (рис. 2) температурные напряжения для стохастических значений наблюдается более низкое значение ($1,5 \cdot 10^7$ Па/м²) тогда как при квантово-механическом способе задания получены значительно большие значения и достигают $4,2 \cdot 10^8$ Па/м².

Для случая действия иона азота (рис. 3) использования стохастических значений, приводит к тому, что максимальных напряжений практически близки для всех зарядовых чисел (1,2,3). Тогда как в случае учета квантово-механического эффекта эти значения существенно отличаются и превышают величины, полученные в первом случае. ($4 \cdot 10^7 - 1,2 \cdot 10^8$ Па/м²). Тогда как в первом случае они лежат вблизи $1 \cdot 10^7$.

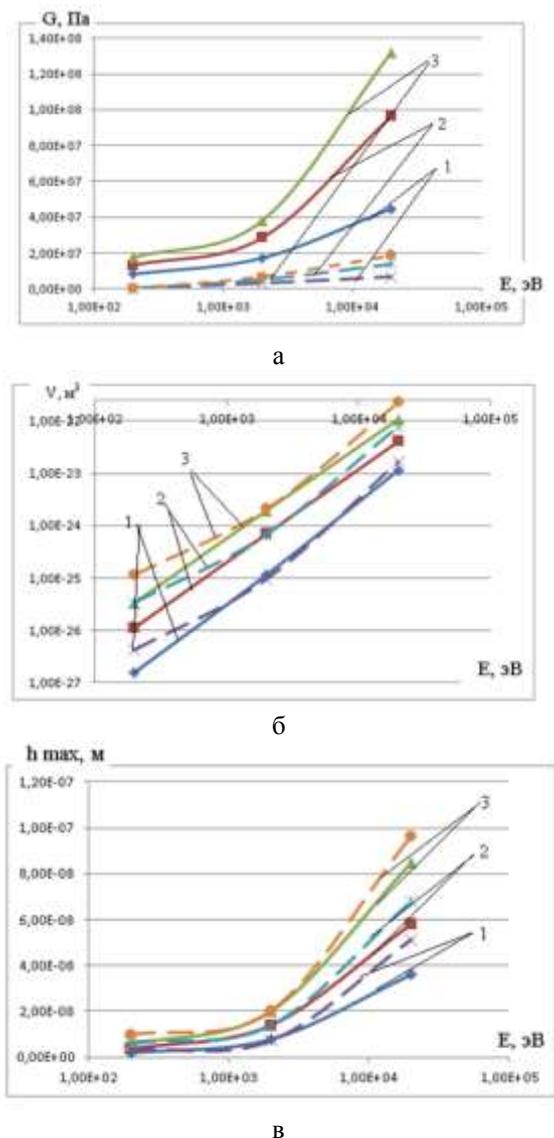
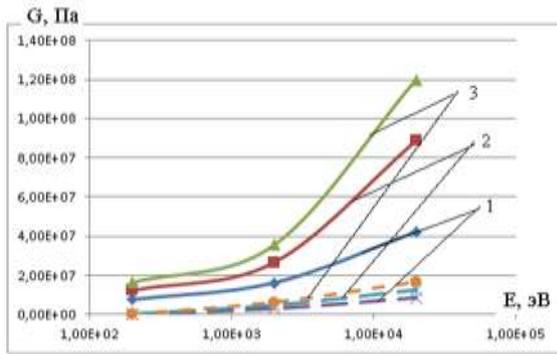
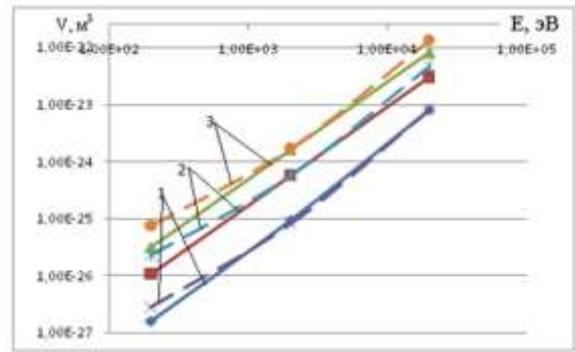


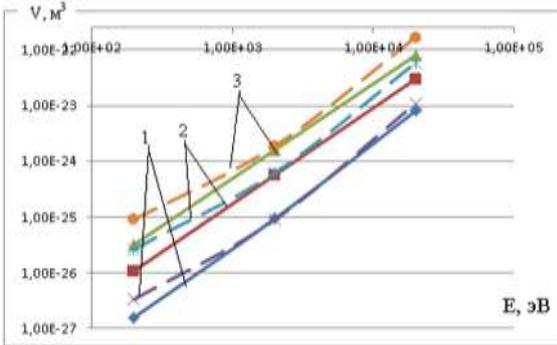
Рис. 1 - Зависимости максимальных температурных напряжений (а), объема зерна (б) и максимальной глубины залегания (в) в твердом сплаве ВЗ при действии от энергии иона бора с разным зарядовым числом (1 = 1, 2=2, 3=3)



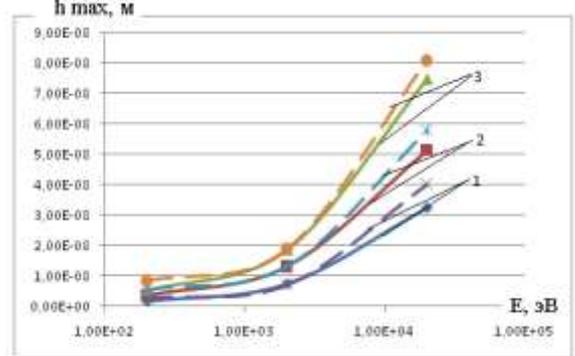
а



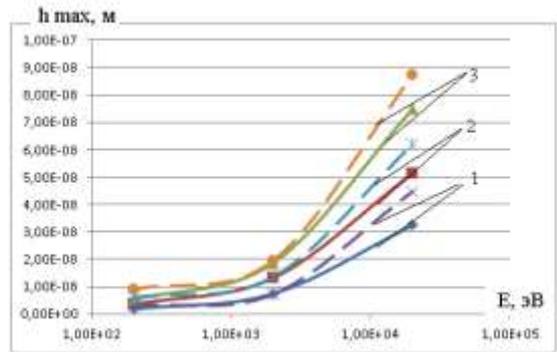
б



б



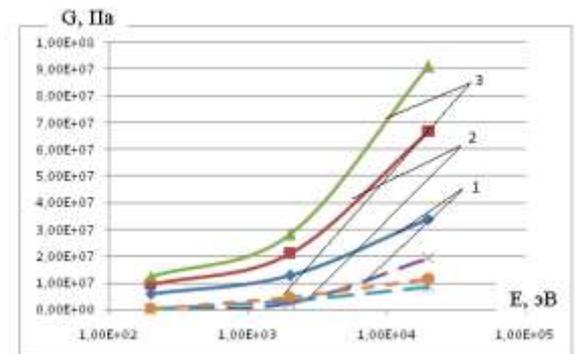
в



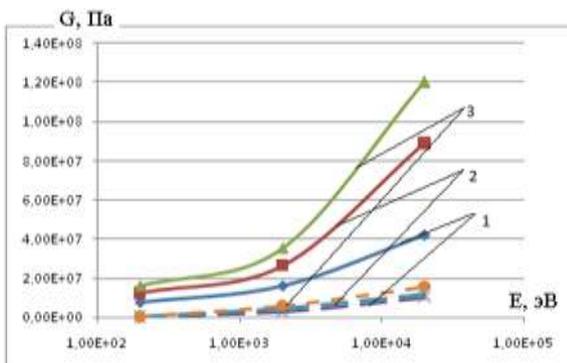
в

Рис. 3 - Зависимости максимальных температурных напряжений (а), объема зерна (б) и максимальной глубины залегания (в) в твердом сплаве ВЗ при действии от энергии иона азота с разным зарядовым числом (1 = 1, 2=2, 3=3)

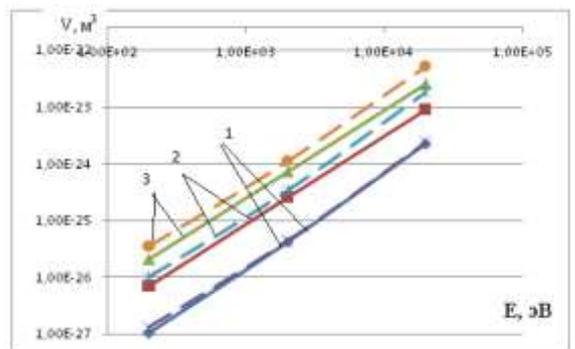
Рис. 2 - Зависимости максимальных температурных напряжений (а), объема зерна (б) и максимальной глубины залегания (в) в твердом сплаве ВЗ при действии от энергии иона углерода с разным зарядовым числом (1 = 1, 2=2, 3=3)



а



а



б

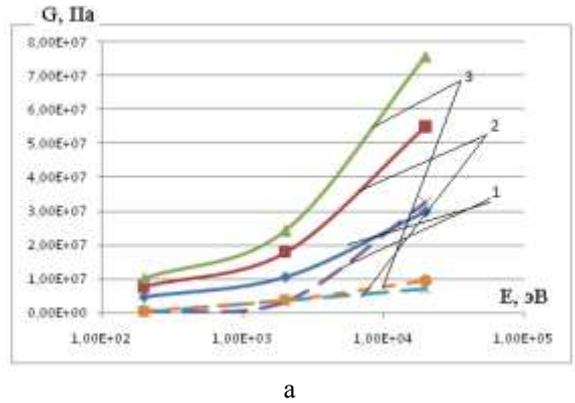
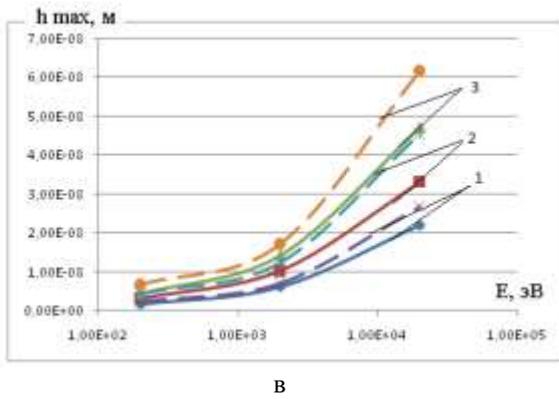


Рис. 4 - Зависимости максимальных температурных напряжений (а), объема зерна (б) и максимальной глубины залегания (в) в твердом сплаве ВЗ при действии от энергии иона алюминия с разным зарядовым числом (1 = 1, 2=2, 3=3)

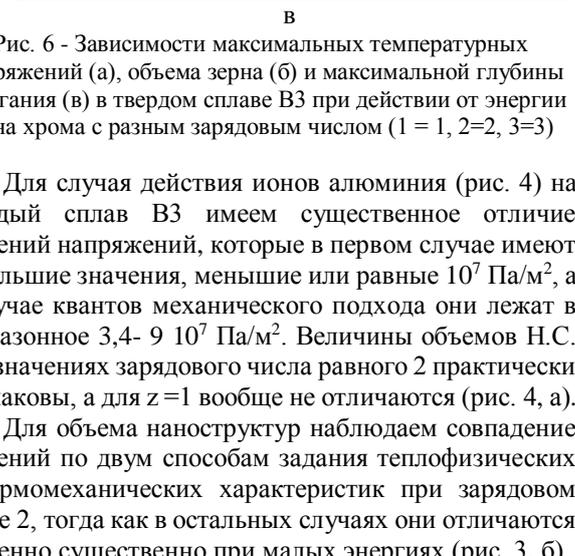
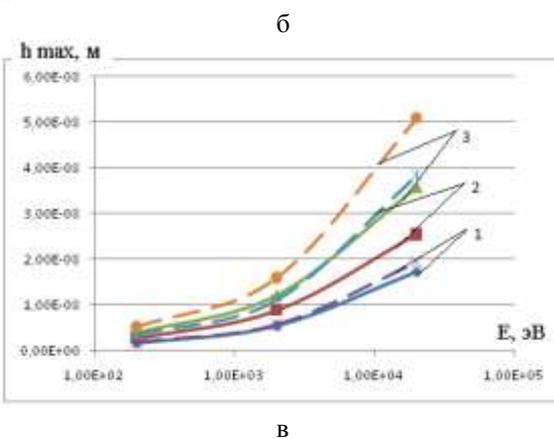
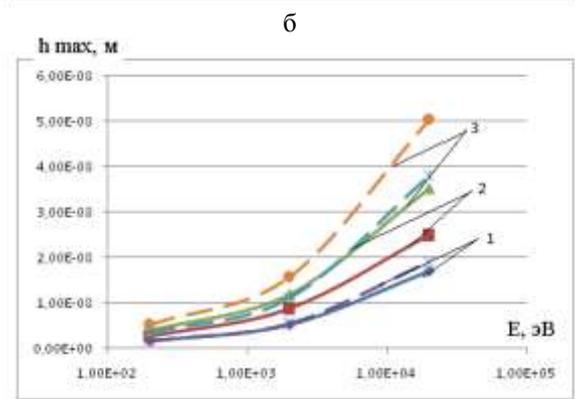
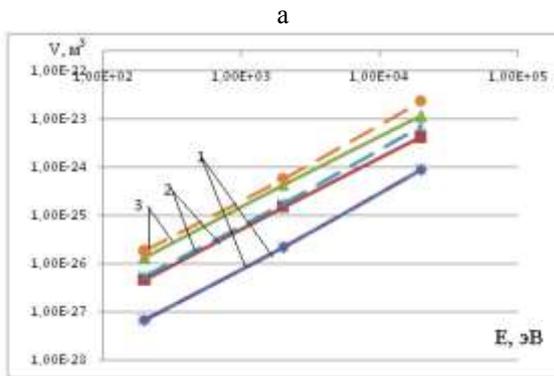
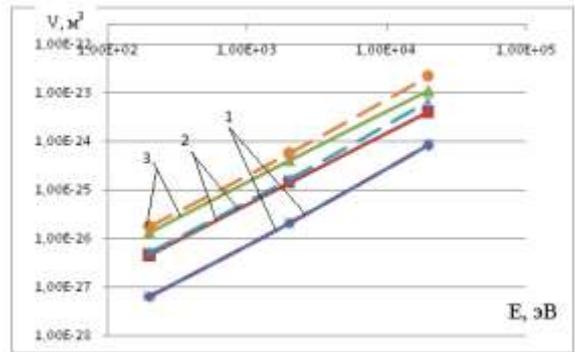
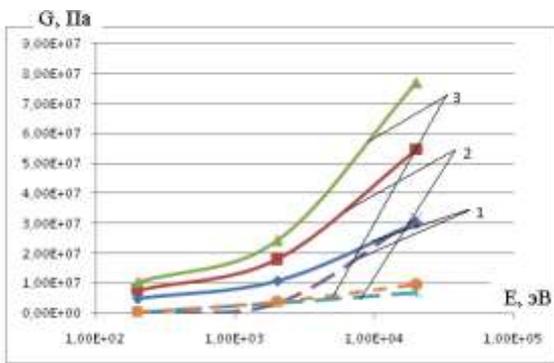


Рис. 5 - Зависимости максимальных температурных напряжений (а), объема зерна (б) и максимальной глубины залегания (в) в твердом сплаве ВЗ при действии от энергии иона ванадия с разным зарядовым числом (1 = 1, 2=2, 3=3)

Рис. 6 - Зависимости максимальных температурных напряжений (а), объема зерна (б) и максимальной глубины залегания (в) в твердом сплаве ВЗ при действии от энергии иона хрома с разным зарядовым числом (1 = 1, 2=2, 3=3)

Для случая действия ионов алюминия (рис. 4) на твердый сплав ВЗ имеем существенное отличие значений напряжений, которые в первом случае имеют небольшие значения, меньшие или равные 10^7 Па/м², а в случае квантов механического подхода они лежат в диапазонное 3,4- 9 10^7 Па/м². Величины объемов Н.С. при значениях зарядового числа равного 2 практически одинаковы, а для $z=1$ вообще не отличаются (рис. 4, а).

Для объема наноструктур наблюдаем совпадение значений по двум способам задания теплофизических и термомеханических характеристик при зарядовом числе 2, тогда как в остальных случаях они отличаются особенно существенно при малых энергиях (рис. 3, б).

Максимальная глубина залегания для обоих случаях отличается незначительно что говорит о том, что при оценке глубины залегания Н.С. можно не учитывать квантов механический эффект (рис. 3, в).

Максимальная глубина залегания Н.С. для ионов алюминия отличается для двух способов уже гораздо менее значительнее. Для случая использования стохастических значений она лежит в пределах от $2 \cdot 10^{-8}$ до $4,8 \cdot 10^{-8}$. Тогда как для использования квантово-механического подхода эти значения укладываются в диапазон $2,5 \cdot 10^{-8}$ до $6,1 \cdot 10^{-8}$ (рис. 4, в)

При использовании ионов ванадия и хрома (рис. 5-6) ситуация несколько изменилась. В этом случае максимальные температурные напряжения реализуются для квантово-механического способа задания теплофизических и термомеханических характеристик тогда как значения их существенно разнятся и лежат в диапазоне ($3 \cdot 10^7$ - $7,6 \cdot 10^7$). Для максимальных энергий объемы Н.С. также коррелируют, при чем для $Z=1$ они практически совпадают, при $Z=2$ они отличаются, а при $Z=3$ отличаются больше.

Для случая действия ионов никеля и иттрия (рис. 7-8) максимальные температурные напряжения также возрастают с ростом энергии, при чем для ионов иттрия даже несколько быстрее.

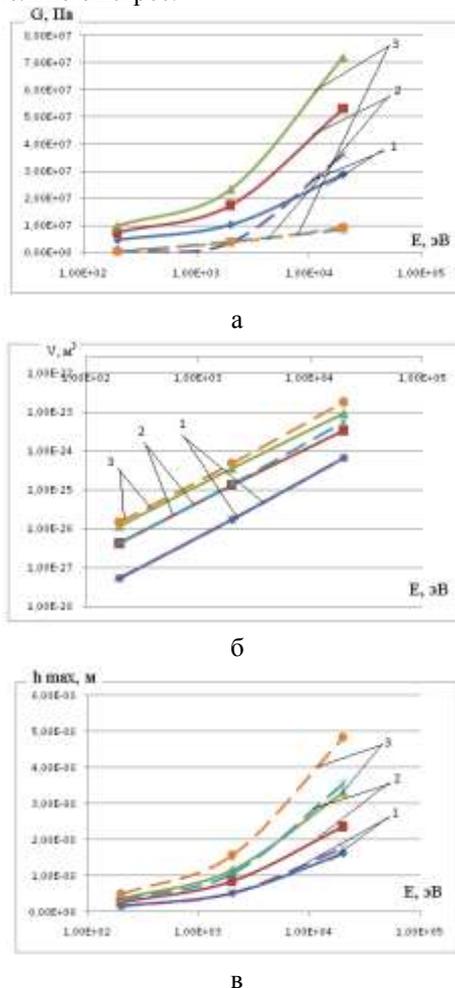


Рис. 7 - Зависимости максимальных температурных напряжений (а), объема зерна (б) и максимальной глубины залегания (в) в твердом сплаве ВЗ при действии от энергии иона никеля с разным зарядовым числом (1 = 1, 2=2, 3=3)

Хотя абсолютное значение меньше. В этом случае

также наибольшее напряжение реализуется при использовании характеристик полученных квантово-механическим методом. При чем для иттрия абсолютные значения ниже. Объемы наноструктур получаются практически одинаковы при двух способах задания теплофизических и термомеханических характеристик (рис.7, б и рис.8, б).

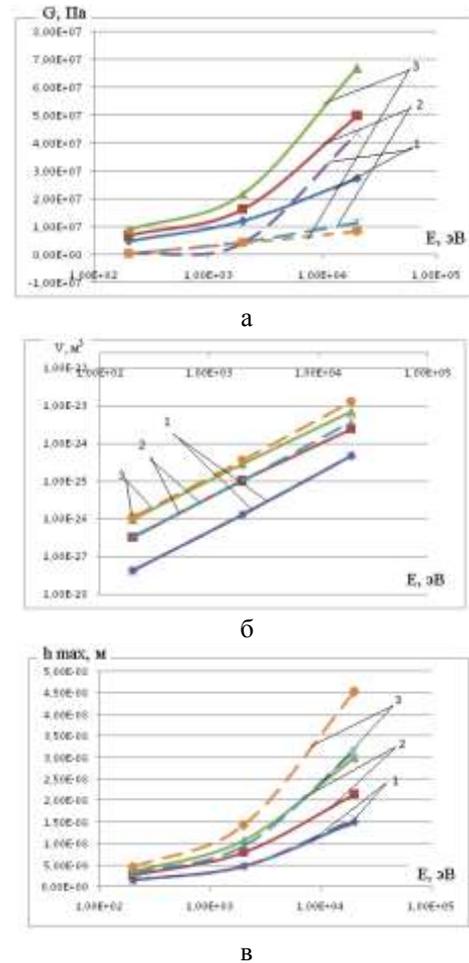


Рис. 8 - Зависимости максимальных температурных напряжений (а), объема зерна (б) и максимальной глубины залегания (в) в твердом сплаве ВЗ при действии от энергии иона иттрия с разным зарядовым числом (1 = 1, 2=2, 3=3)

Максимальные глубины залегания Н.С. минимальны для квантово-механического способа задания этих характеристик. Причем глубина для никеля несколько большая.

Для случая действия ионов циркония и гафния (рис. 9-10) на твердый сплав ВЗ максимальные температурные напряжения ведут себя практически одинаково только для циркония наблюдается большее значение температурных напряжений. В этом случае квантово-механический подход дает большие значения температур. На объемы создания наноструктур способ задания теплофизических и термомеханических характеристик практически не влияет. Наблюдается рост его от энергии иона. (рис. 9б, 10б). Для глубины залегания этого объема стохастические методы дают большее значение глубины тогда как квантово-механический метод снижают данную величину (рис.

9, в, рис. 10, в).

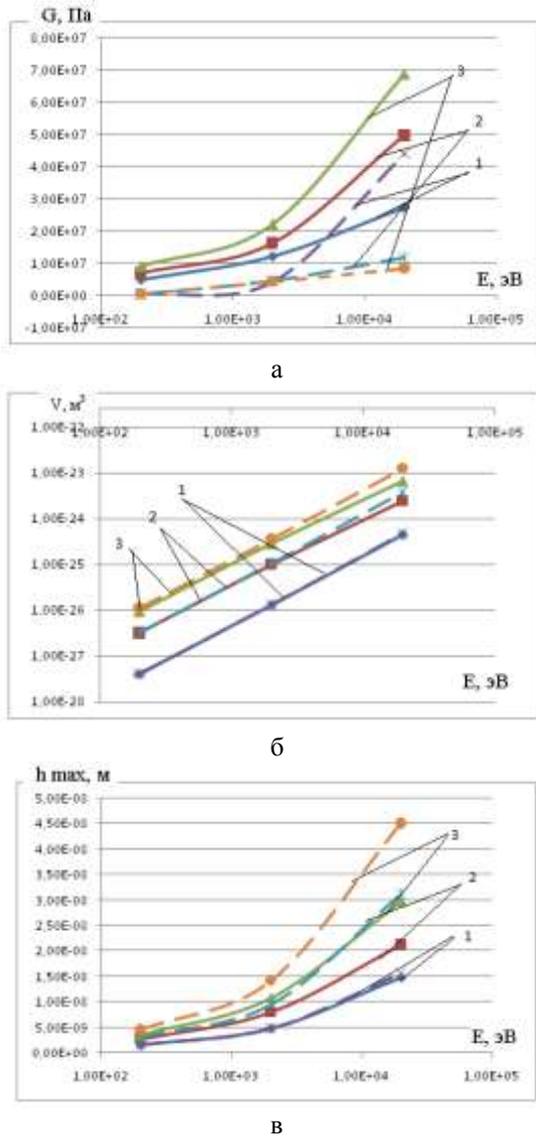


Рис. 9 - Зависимости максимальных температурных напряжений (а), объема зерна (б) и максимальной глубины залегания (в) в твердом сплаве ВЗ при действии от энергии иона циркония с разным зарядовым числом (1 = 1, 2=2, 3=3)

При действии иона вольфрама характер зависимостей сохраняется, объем Н.С одинаков для обоих способов (рис. 11, б). А глубина для стохастического метода значительно больше, чем для квантово-механического метода.

Проведенные исследования дают представления о важнейших характеристиках в зоне получения наноструктур. Картину температурных напряжений, которые могут влиять на скорость образования наноструктур, объем и глубину их залегания.

Все это позволяет утверждать о том, что проведенные исследования могут быть полезны при выборе технологических режимов образования наноструктур.

При действии иона вольфрама характер зависимостей сохраняется, объем Н.С одинаков для обоих способов (рис. 11, б). А глубина для стохастического метода значительно больше, чем для

квантово-механического метода.

Проведенные исследования дают представления о важнейших характеристиках в зоне получения наноструктур.

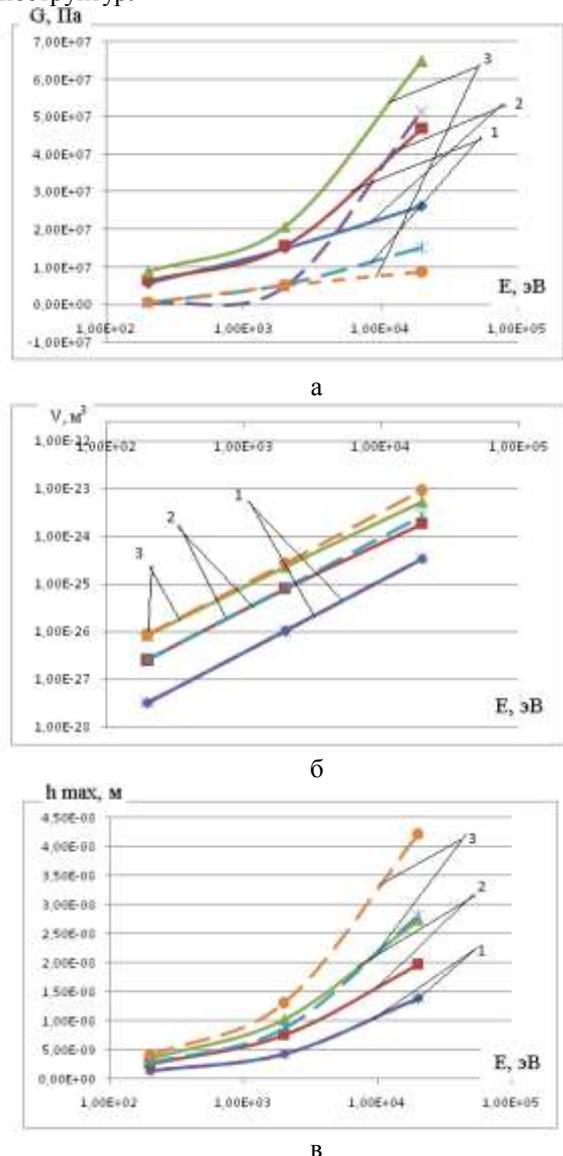


Рис. 10- Зависимости максимальных температурных напряжений (а), объема зерна (б) и максимальной глубины залегания (в) в твердом сплаве ВЗ при действии от энергии иона гафния с разным зарядовым числом (1 = 1, 2=2, 3=3)

Картину температурных напряжений, которые могут влиять на скорость образования наноструктур, объем и глубину их залегания.

Все это позволяет утверждать о том, что проведенные исследования могут быть полезны при выборе технологических режимов образования наноструктур.

Выводы. Определено влияние способа задания теплофизических и термомеханических характеристик на величины максимальных температурных напряжений, объема зерна и максимальные глубины его залегания.

Показано, что способ задания теплофизических и термомеханических характеристик практически не влияет на объем наноструктур.

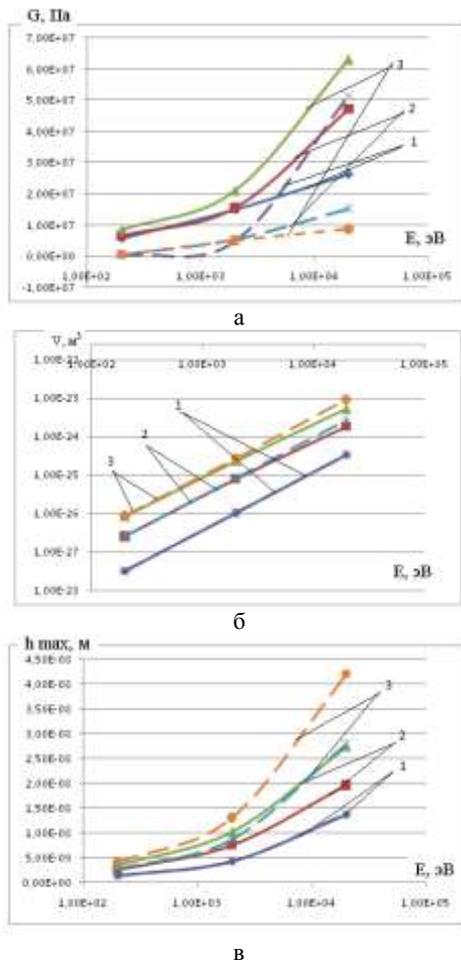


Рис. 11 - Зависимости максимальных температурных напряжений (а), объема зерна (б) и максимальной глубины залегания (в) в твердом сплаве ВЗ при действии от энергии иона вольфрам с разным зарядовым числом (1 = 1, 2=2, 3=3)

Для максимальных температурных напряжений и глубины залегания наблюдается существенное влияния способа задания теплофизических и термомеханических характеристик. Так для максимальных температурных напряжений их значение реализуется большее для квантово-механического метода, тоже для глубины залегания объема наноструктур больше значение соответствует квантово-механическому способу задания.

Проведенные исследования создают научную основу для выбора технологических параметров потоков ионов разных сортов, энергии и зарядов для выбора технологических параметров для получения наноструктур

Список литературы

1. Костюк Г. И. *Эффективный режущий инструмент с*

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Костюк Геннадій Ігорович (Костюк Геннадий Игоревич, Kostyuk Gennady Igorovich) – доктор технічних наук, професор, професор кафедри теоретичної механіки, машинознавства та роботомеханічних систем, Національний аерокосмічний університет ім. М.С. Жуковського «ХАІ», м. Харків, Україна, тел.: (057)-788-42-06, e-mail: gennadiykostyuk206@gmail.com.

Семененко Ольга Діонісівна (Семененко Ольга Дионисовна, Semenenko Olga Dionisovna) – аспірант, Національний аерокосмічний університет ім. М. С. Жуковського «ХАІ», м. Харків, Україна, тел.: (057)-788-42-06, e-mail: gennadiykostyuk206@gmail.com

нанопокриттями и наноструктурными модифицированными слоями: монография-справ. в 2 кн. Кн.1. Плазменно-ионные и ионно-лучевые технологии. Харьков: «Планета-Принт», 2016. 735 с.

2. Костюк Г. И. *Нанотехнологии: выбор технологических параметров и установок, производительность обработки, физико-механические характеристики наноструктур: монография.* Киев: Изд. центр Междунар. академии наук и инновац. технологий, 2014. 472 с.
3. Костюк Г. И. *Нанотехнологии: теория, эксперимент, техника, перспективы: монография.* Киев: Изд. центр Междунар. академии наук и инновац. технологий, 2012. 648 с.
4. Костюк Г. И. *Наноструктуры и нанопокртия: перспективы и реальность: учеб. пособ.* Харьков: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2009. 406 с.
5. Костюк Г. И. *Научные основы создания современных технологий: учеб. пособ.* Харьков: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2008. – 552 с.
6. Костюк Г. И. *Эффективный режущий инструмент с покрытием и упрочненным слоем: монография-справочник.* Харьков: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2007. 633 с.
7. Костюк Г. И. *Эффективный режущий инструмент с покрытием и упрочненным слоем: справочник.* Киев.: Вид-во АИНУ, 2003. 412 с.
8. Гречихин Л. И. *Физика наночастиц и нанотехнологий* Москва: УП «Технопринт», 2004. 397 с.
9. Аксенов И. И. *Вакуумная дуга в эрозионных источниках плазмы.* Харьков: Изд-во НИИ «ХФТИ», 2005211 с.
10. Гусев А. И. *Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии.* Москва: Физматлит, 2005. 416 с.

References (transliterated)

1. Kostyuk G. I. *Effective cutting tool with nanocoatings and nanoscale modified layers: monograph-reference.* in 2 books. Book 1. *Plasma-ion and ion-beam technologies.* Kharkov: "Planet-Print", 2016. 735 p
2. Kostyuk G. I. *Nanotechnologies: selection of technological parameters and installations, processing capacity, physical and mechanical characteristics of nanostructures: monograph.* Kiev: Publ. center of Intern. Academy of Sciences and Innovation. technologies, 2014. 472 p.
3. Kostyuk G. I. *Nanotechnology: theory, experiment, technology, perspectives: monograph.* Kiev: Publ. center of Intern. Academy of Sciences and Innovation. technologies, 2012. 648 p.
4. Kostyuk G. I. *Nanostructures and nanocoatings: perspectives and reality: Proc. Help. Kharkov: The national. aerospace. University of «Kharkov. aviats. in-t», 2009. 406 p.*
5. Kostyuk G. I. *Scientific foundations of the creation of modern technologies: Textbook. Help. Kharkov: Nats. aerospace. University of Kharkov. aviats. in-t », 2008. 552 p.*
6. Kostyuk G. I. *Effective cutting tool with a coating and a reinforced layer: a monograph-reference book.* Kharkov: Nats. aerospace. University of Kharkov. aviats. in-t », 2007. 633 p.
7. Kostyuk G. I. *Effective cutting tool with a coating and a reinforced layer: a reference book.* Kiev: View of AINU, 2003. 412 p.
8. Grechikhin L. I. *Physics of Nanoparticles and Nanotechnologies.* Moscow: UP "Technoprint", 2004. 397 p.
9. Aksenov I. I. *Vacuum arc in erosive plasma sources.* Kharkov: Publishing house of scientific research institute "Kharkov Institute of Physics and Technology ", 2005. 211 p.
10. Gusev A. I. *Nanomaterials, nanostructures, nanotechnologies.* Moscow: Fizmatlit, 2005. 416 p.

Поступила (received) 10.11.2018

Д. Г. МУЗИЧКА

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРАЦЕЗДАТНОСТІ ШЛІФУВАЛЬНИХ КРУГІВ ПРИ ОБРОБЦІ ТВЕРДИХ СПЛАВІВ

Одним з прогресивних методів чистової обробки твердих сплавів є шліфування алмазними кругами. Підвищення продуктивності алмазного шліфування при забезпеченні якості обробленої поверхні та збереженні високих показників працездатності кругів є важною задачею машинобудування. Розглянуто вплив режимів обробки на вихідні параметри плоского шліфування торцем круга твердих сплавів. Працездатність алмазних шліфувальних кругів на металевій та полімерній зв'язках оцінювалася показниками: відносною витратою надтвердих матеріалів, продуктивністю шліфування, параметрами шорсткості обробленої поверхні зразків, питомою собівартістю обробки. В основу проведення експериментів покладено метод одночасного варіювання параметрами режимів різання. Отримані комплексні залежності, які дозволяють розрахувати відносну витрату алмазів, питому собівартість обробки, параметри шорсткості від режимів різання. Установлено, що при обробці на чорнових режимах різання для забезпечення підвищеної продуктивності доцільно застосовувати шліфувальні круги на металевих зв'язках, а на чистових операціях для забезпечення потрібної шорсткості застосовувати круги на полімерних зв'язках.

Ключевые слова: тверді сплави; алмазний шліфувальний круг; зв'язка; працездатність; відносна витрата; продуктивність; шорсткість; собівартість.

Д. Г. МУЗИЧКА

ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ШЛИФОВАЛЬНЫХ КРУГОВ ПРИ ОБРАБОТКЕ ТВЕРДЫХ СПЛАВОВ

Одним из прогрессивных методов чистовой обработки твердых сплавов является шлифование алмазными кругами. Повышение производительности алмазного шлифования при обеспечении качества обрабатываемой поверхности и сохранении высоких показателей работоспособности кругов является важной задачей машиностроительного производства. Рассмотрено влияние режимов обработки на выходные параметры плоского шлифования торцом круга твердых сплавов. Работоспособность алмазных шлифовальных кругов на металлической и полимерной связках оценивалась показателями: относительным расходом сверхтвердых материалов, производительностью шлифования, параметрами шероховатости обрабатываемой поверхности образцов, удельной себестоимостью обработки. В основу проведения экспериментов положен метод одновременного варьирования параметрами режимов резания. Получены комплексные зависимости, позволяющие рассчитать относительный расход алмазов, удельную себестоимость обработки, параметры шероховатости от режимов резания. Установлено, при обработке на черновых режимах резания для обеспечения повышенной производительности целесообразно применять шлифовальные круги на металлических связках, а на чистовых операциях для обеспечения требуемой шероховатости применять круги на полимерных связках.

Ключові слова: твердые сплавы; алмазный шлифовальный круг; связка; работоспособность; относительный расход; производительность; шероховатость; себестоимость.

D. G. MUZYCHKA

PERFORMANCE RESEARCH OF GRINDING WHEELS IN CEMENTED CARBIDE COMPOSITIONS MACHINING

One of the progressive methods of cemented carbide compositions finishing of is grinding with diamond wheels. The productivity improvement of diamond grinding while ensuring the quality of the treated surface and high performance maintaining of wheels is an important task of machine-building production. The influence of machining modes on the output parameters of surface grinding with the wheel face of cemented carbide compositions has been considered. The performance of diamond grinding wheels on metal and polymer bonds was evaluated by the following indicators: specific consumption of superhard materials, grinding performance, roughness parameters of the machining sample surface and the specific cost of machining. The experiments were based on the method of simultaneous variation of the parameters of cutting conditions. Complex dependencies for calculation the relative consumption of diamonds, the specific cost of machining and roughness parameters of cutting conditions have been obtained. It was found that in machining on rough cutting conditions, it is advisable to use grinding wheels on metal bonds to ensure improved productivity, and to use the wheels on polymer bonds on finishing operations to ensure the required roughness.

Key words: cemented carbide compositions; diamond grinding wheel; bond; performance; specific consumption; operating efficiency; roughness; cost.

Введение. За останні десятиріччя обсяг різних типів інструментальних матеріалів для лезового інструменту, споживаного металообробними виробництвами технологічно розвинених країн, сильно змінився. Практично не використовуються для виготовлення лезового інструменту вуглецеві і леговані інструментальні сталі. Помітно знизилася споживання швидкорізальних сталей з 65–70 % до 35–40 %, у той час як обсяги використання твердих сплавів збільшилися з 30 до 55 % [1].

Застосування твердих сплавів в якості інструментального матеріалу дає великий економічний ефект. Маючи високу твердість, теплостійкість і зносостійкість, тверді сплави дозволили підвищити у

декілька разів швидкість різання при механічній обробці металів і неметалічних матеріалів, отримати високу чистоту оброблених поверхонь, тривалий час працювати без переточування. Проте внаслідок порівняно малої в'язкості і низької теплопровідності тверді сплави погано шліфуються, оскільки при їх обробці у результаті дії високих локальних температур на оброблюваній поверхні можлива поява мікротріщин, структурних і фазових перетворень, небажаної залишкової напруги та ін.

Застосування при шліфуванні твердих сплавів інструментів з традиційних абразивів недоцільно внаслідок швидкої втрати ними різальної здатності і, як результат, відносно низької продуктивності обробки.

© Д. Г. Музичка, 2018

Одним з прогресивних методів їх обробки є шліфування алмазними кругами, які знижують теплову напруженість процесу і забезпечують високу якість і точність оброблюваної поверхні. Маючи високу твердість і міцність, малі кути різання при вершинах, підвищену зносостійкість, ці інструменти дають можливість істотно підвищити якість і продуктивність процесів шліфування.

Ефективність експлуатації абразивних інструментів, особливо з надтвердих матеріалів, значною мірою визначаються витратами на інструмент, які залежать від інтенсивності зносу. Знос кругів безпосередньо впливає на вартість продукції, можливості автоматизації і темпи виробництва, а також визначає якість оброблених деталей. Тому вивченню механізму зносу шліфувальних кругів і виявленню шляхів його зниження присвячені численні дослідження, більшість яких носять емпіричний характер і спрямовані на практичне рішення конкретних технологічних завдань.

Найважливішим технологічним показником експлуатаційних властивостей шліфувального круга є відносна або питома витрата алмазів. Порівняльний аналіз відносної або питомої витрати алмазів при різних методах шліфування твердих сплавів [2–8] показав, що експериментальні дані суперечливі та залежать від умов експерименту.

У даному дослідженні розглянуто вплив режимів шліфування на вихідні параметри при шліфуванні твердих сплавів алмазними кругами.

Методика експериментальних досліджень. Працездатність шліфувальних кругів оцінювалася за наступними показниками: відносній витраті надтвердих матеріалів (НТМ) q_p , мг/г, продуктивності шліфування Q , мм³/хв., параметрам шорсткості обробленої поверхні зразків, питомої собівартості обробки C_v , грн./см³. Для оцінювання якості обробленої поверхні вибрані наступні показники шорсткості: середнє арифметичне відхилення профілю Ra , мкм; найбільша висота профілю R_{max} (Rt), мкм; середній крок мікронерівностей S_m , мкм; відносна опорна довжина профілю t_p , %.

Для встановлення взаємозв'язку параметрів режимів різання з одного боку і відносного зносу і показників шорсткості – з іншого, обробляли тверді сплави ВК6 та Т15К6 з розмірами перерізу 7×15 мм³.

Дослідження впливу режимів різання на показники працездатності алмазних кругів виконувалося при шліфуванні зразків твердих сплавів на універсально-заточувальному верстаті ЗД642Е. При цьому твердий сплав марки Т15К6 оброблявся

алмазним кругом 12А2-45° 150×32×10×3 АС6 125/100 100 % на полімерній зв'язці В2-01, а твердий сплав марки ВК6 – кругом 12А2-45° 125×32×10×3 АС4 200/160 100 % на металевій зв'язці М1-04. Обробка велася з охолодженням 5 %-вим розчином Na₂CO₃ з додаванням 0,5 % NaNO₂. Для зменшення впливу стану поверхні алмазовмісного шару на результати досліджень при переході на новий режим круги правилися.

Оскільки відносна витрата НТМ є одним з основних показників працездатності шліфування, то для розрахунку цього критерію застосовувався метод безпосереднього лінійного виміру зносу профілю круга до і після шліфування. Лінійний знос кругів вимірювався на спеціальному вимірювальному пристосуванні, сконструйованому на базі інструментального мікроскопа БМИ-1Ц та проєкційного вертикального вимірювача довжини ИЗВ-3. Вимірювання проводилися у шести рівнорозташованих радіальних перерізах. Вимір шорсткості обробленої поверхні проводився на профілометрі MITUTOYO SurfTest SJ-201.

В основу проведення експериментів покладено метод одночасного варіювання параметрами режимів різання: швидкості V , подовжньої подачі $S_{пр}$, поперечної подачі $S_{п}$ [9]. Функціональна залежність параметра A , який має функціональний зв'язок з режимами різання, описується формулою:

$$A = C \cdot V^n \cdot S_{пр}^y \cdot S_{п}^x \quad (1)$$

Коефіцієнти рівняння полінома І-го порядку визначалися за допомогою матричного апарату з використанням основної формули:

$$b = (X^T \cdot X)^{-1} \cdot X^T \cdot y \quad (2)$$

де X – матриця незалежних змінних $X(N \times k)$.

Інтервали варіювання, рівні та натуральні значення факторів наведено у табл. 1. Продуктивність обробки залежно від призначених режимів різання варіювалася в діапазоні 450–1500 мм³/хв.

Обробка результатів дослідження. Після обробки експериментальних даних отримані двох- і трьохфакторні залежності відносної витрати НТМ від режимів різання:

– для круга на металевій зв'язці М1-04:

$$q_{p1} = 10,252 \cdot S_{пр}^{0,657} \cdot S_{п}^{0,664}, \quad (3)$$

– для круга на полімерній зв'язці В2-01:

$$q_{p2} = 18,376 \cdot V^{-0,065} \cdot S_{пр}^{0,601} \cdot S_{п}^{0,6} \quad (4)$$

Таблиця 1 – Умови обробки, рівні та інтервали варіювання факторів

Рівень	Круг 12А2-45° 125×32×10×3 АС4 200/160 М1-04 100%; ВК6			Круг 12А2-45° 150×32×10×3 АС6 125/100 В2-01 100%; Т15К6		
	V , м/с	$S_{пр}$, м/хв.	$S_{п}$, мм/подв.хід	V , м/с	$S_{пр}$, м/хв.	$S_{п}$, мм/подв.хід
Верхній (+)	16,5	0,5	0,2	25	0,5	0,2
Середній (0)	16,5	0,4	0,15	20	0,4	0,15
Нижній (-)	16,5	0,3	0,1	15	0,3	0,1

Аналіз ступеневих залежностей відносного зносу показав, що найбільший вплив на показники працездатності алмазних кругів при обробці твердих сплавів мають поперечна і подовжня подачі: показники ступеню у формулах (3) та (4) знаходяться у межах 0,657–0,664 для металевій зв'язці і 0,6–0,601 – для полімерної. При цьому вплив поперечного і подовжнього подання практично рівнозначний, що дозволяє зробити висновок про залежність показників працездатності кругів від продуктивності процесу шліфування незалежно від поєднання значень подач. Вплив швидкості різання на показники працездатності алмазних кругів нижчий, ніж вплив продуктивності, про що свідчить показник ступеню при швидкості різання $n = -0,065$.

Аналіз впливу швидкості різання на питому витрату алмазів показав, що при шліфуванні пластин твердого сплаву Т15К6 кругами на полімерній зв'язці В2-01 у інтервалі швидкостей $V = 15\text{--}25$ м/с спостерігалось незначне зниження відносної витрати НТМ: від 2,85 до 2,75 мг/г. Збільшення швидкості різання зменшує відносну витрату алмазів (у досліджуваному діапазоні), оскільки при цьому зменшується товщина зрізаного шару, що доводиться на одне зерно, зростає кількість зерен, які беруть участь у зніманні матеріалу в одиницю часу. Отже, сили різання і теплонапруженість процесу обробки зменшуються.

При обробці твердого сплаву Т15К6 з однаковою продуктивністю, але при різних поєднаннях подовжньої і поперечної подач у межах 0,3–0,5 м/хв. та 0,1–0,2 мм/подв.хід відповідно, зі збільшенням швидкості різання відносна витрата також зменшувалася незначно і його величина при різних варіантах подач змінювалася не істотно.

Аналіз впливу поперечної і подовжньої подач на питому витрату алмазів показав, що в дослідженому діапазоні він зростає пропорційно зніманню: чим вище продуктивність обробки, тим більше витрата алмазів. Так, збільшення поперечної подачі у два рази (з 0,1 до 0,2 мм/подв.хід) при обробці твердих сплавів ВК6 і Т15К6 (при $V = 16,5$ м/с, $S_{пр} = 0,4$ м/хв.) збільшує відносну витрату алмазів у 1,58 рази для круга на металевій зв'язці М1-04 та у 1,52 рази – для круга на

полімерній В2-01. Збільшення подовжньої подачі з 0,3 до 0,5 м/хв. приводить до збільшення відносної витрати алмазів у 1,40 рази для круга на металевій зв'язці М1-04 та у 1,36 рази – для круга на полімерній В2-01 (при $V = 16,5$ м/с; $S_{пр} = 0,15$ мм/подв.хід).

Збільшення подовжньої або поперечної подач приводить до збільшення сил різання, оскільки середньовірогідна товщина шару, що зрізується одним зерном, a_z і глибина закладення зерна ε зростають. Круги на полімерній зв'язці зношуються інтенсивніше, ніж на металевій, що пояснюється фізико-механічними параметрами зв'язок (межа міцності зв'язки на стиск, теплопровідність, температуропровідність, коефіцієнт лінійного температурного розширення), а значить алмазоутриманням.

Збільшення подач пов'язано з підвищенням інтенсивності шліфування, і, отже, з підвищенням питомої витрати НТМ. Тому для виявлення оптимальних умов шліфування необхідно оцінювати питомі витрати. Один з основних критеріїв економічності процесу шліфування – питому собівартість обробки C_V – розраховували за методикою [10].

Основні технологічні витрати при обробці твердих сплавів алмазним шліфувальним інструментом складаються з витрат на алмазний шліфувальний інструмент і вартості робочої сили. На рис. 1 приведені витрати на робочий інструмент (крива C_a), віднесені до 1 см³ знятого матеріалу, витрати на оплату праці робочої сили (крива $C_{зп}$), і загальна питома собівартість видалення 1 см³ матеріалу (крива C_V) залежно від продуктивності шліфування Q .

Аналіз графіків (рис. 1, а) показав, що загальна питома собівартість обробки C_V , будучи функцією продуктивності, має чітко виражений мінімум. З підвищенням продуктивності обробки витрати на алмазний інструмент, віднесені до одиниці знятого твердого сплаву, зростають, а витрати, пов'язані з витратами на оплату праці робочої сили, зменшуються. Так, при обробці твердого сплаву ВК6 алмазним кругом 12А2-45° 125×32×10×3 АС4 200/160 200 % на металевій зв'язці М1-04 мінімальна питома собівартість досягається при продуктивності 450 мм³/хв. і відносній витраті алмазів 1,00 мг/г.

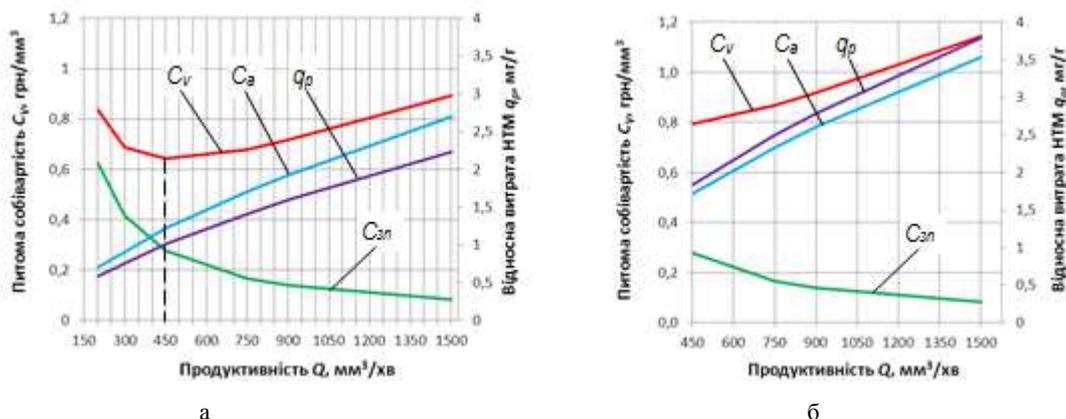


Рис. 1 – Залежність питомої собівартості обробки C_V , грн./мм³, і відносної витрати алмазів q_p , мг/г, від продуктивності Q , мм³/хв., при обробці: а – твердого сплаву ВК6; б – твердого сплаву Т15К6

Подальше збільшення продуктивності призводить до росту питомої собівартості обробки, оскільки витрати на алмазний інструмент вже не компенсуються підвищенням продуктивності обробки і зниженням витрат на оплату праці робочої сили. Отже, круги на металевій зв'язці доцільно застосовувати для забезпечення високої продуктивності при заданій якості оброблюваної поверхні.

При обробці твердого сплаву Т15К6 алмазним кругом 12А2-45° 150×32×10×3 АС6 125/100 100 % на полімерній зв'язці В2-01 у досліджуваному діапазоні мінімум кривий C_V не спостерігається внаслідок підвищеної витрати алмазів. В порівнянні з кругом на металевій зв'язці М1-04 у круга на полімерній зв'язці В2-01 при обробці твердих сплавів з однаковою продуктивністю спостерігається збільшення відносної витрати НТМ у 2,7–3,7 рази. Висока витрата алмазів і відсутність мінімальної питомої собівартості обробки твердих сплавів у вказаному діапазоні продуктивностей свідчить про неефективне використання кругів на полімерних зв'язках на продуктивніших операціях шліфування. Таким чином, рекомендована сфера застосування цих кругів – менш навантажені операції шліфування.

Двох- і трьохфакторні залежності показників якості оброблюваної поверхні від режимів різання, отримані після обробки експериментальних даних, мають вигляд:

а) середнє арифметичне відхилення профілю Ra :
– для круга на металевій зв'язці М1-04:

$$Ra_1 = 5,796 \cdot S_{np}^{1,258} \cdot S_n^{0,88}; \quad (5)$$

– для круга на полімерній зв'язці В2-01:

$$Ra_2 = 105,086 \cdot V^{-1,414} \cdot S_{np}^{0,755} \cdot S_n^{0,624}; \quad (6)$$

б) найбільша висота профілю R_{max} (Rt):
– для круга на металевій зв'язці М1-04:

$$R_{max_1} = 31,898 \cdot S_{np}^{1,205} \cdot S_n^{0,664}; \quad (7)$$

– для круга на полімерній зв'язці В2-01:

$$R_{max_2} = 763,912 \cdot V^{-0,967} \cdot S_{np}^{1,137} \cdot S_n^{0,971}; \quad (8)$$

в) середній крок мікронерівностей Sm :

– для круга на металевій зв'язці М1-04:

$$Sm_1 = 176,417 \cdot S_{np}^{0,441} \cdot S_n^{0,412}; \quad (9)$$

– для круга на полімерній зв'язці В2-01:

$$Sm_2 = 2086 \cdot V^{-0,627} \cdot S_{np}^{0,415} \cdot S_n^{0,397}; \quad (10)$$

г) відносна опорна довжина профілю t_p :

– для круга на металевій зв'язці М1-04:

$$t_{p_1} = 58,289 \cdot S_{np}^{-0,158} \cdot S_n^{-0,076}; \quad (11)$$

– для круга на полімерній зв'язці В2-01:

$$t_{p_2} = 61,045 \cdot V^{-0,143} \cdot S_{np}^{-0,263} \cdot S_n^{-0,166}. \quad (12)$$

Відомо, що між приведеними параметрами існує взаємозв'язок. Аналіз залежностей, проведений автором [11, 12], показав, що кожна з отриманих дослідниками формул відображає окремі випадки обробки різних матеріалів. Виконані в цій роботі дослідження дозволили встановити залежність параметрів Sm та t_p від Ra .

Після узагальнення експериментальних даних за визначенням параметрів шорсткості при шліфуванні твердих сплавів з різними режимами різання і проведення математичної обробки, отримані статистичні залежності апроксимувалися різними функціями. Оцінюючи відносну похибку апроксимації, з отриманих функцій вибирали оптимальну (табл. 2).

Аналіз отриманих залежностей показав, що з ростом параметра Ra крок мікронерівностей Sm збільшується і залежить від марки оброблюваного матеріалу: чим вище твердість, тим більше крок мікронерівностей. Зі зростанням параметра Ra відносна опорна довжина профілю t_{50} зменшується.

Найбільш суттєвий вплив на шорсткість оброблюваної поверхні робить швидкість різання. При збільшенні швидкості круга збільшується кількість зерен, які беруть участь у зніманні припуску в одиницю часу. При цьому зменшується товщина шару, яка знімається одним різальним зерном, і сила різання, що призводить до зниження шорсткості оброблюваної поверхні.

Таблиця 2 – Вид апроксимуючих функцій параметрів Sm і t_p від Ra

Характеристика інструменту	Оброблюваний матеріал	Параметр шорсткості	Вид функції	Похибка апроксимації R^2
12А2-45° 125×32×10×3 АС4 200/160 100% М1-04	ВК6	середній крок мікронерівностей $Sm = f(Ra)$	$24,629 + 103,5Ra - 54,148Ra^2$	0,9795
		відносна опорна довжина профілю $t_p = f(Ra)$	$91,696 - 53,81Ra + 39,233Ra^2$	0,9654
12А2-45° 150×32×10×3 АС6 125/100 100% В2-01	Т15К6	середній крок мікронерівностей $Sm = f(Ra)$	$27,07 + 382,84Ra - 250,02Ra^2$	0,9950
		відносна опорна довжина профілю $t_p = f(Ra)$	$105,74 - 216,96Ra + 260,58Ra^2$	0,9806

При обробці твердого сплаву Т15К6 з продуктивностями 450, 900 та 1500 мм³/хв. збільшення швидкості різання з 15 до 25 м/с зменшило показники шорсткості R_a і R_{max} у 2,06 та 1,64 рази відповідно для кожної зі вказаних продуктивностей.

Аналогічний вплив на параметри R_a і R_{max} має швидкість різання при обробці з однаковою продуктивністю, але з різним поєднанням подовжньої і поперечної подач: зі збільшенням швидкості круга висотні параметри шорсткості зменшуються, проте, для одного і того ж значення швидкості спостерігаються різні значення показників.

Аналіз отриманих залежностей як параметра R_a , так і R_{max} , показав, що, більшою мірою впливає подовжня подача, ніж поперечна, про що свідчить більше значення ступеневого показника у формулах (6) та (8).

Враховуючи, що при заточувальних і довідних операціях на поверхнях твердосплавного різального інструменту вимагається забезпечити шорсткість з параметром $R_a = 0,08-0,32$ мкм, для зниження шорсткості рекомендується збільшити швидкість різання або зменшити продуктивність обробки шляхом підбору значень подач, що забезпечують необхідну шорсткість і якість оброблюваної поверхні.

Вплив подовжньої і поперечної подач на показники шорсткості R_a та R_{max} носять однаковий якісний характер: зі збільшенням подовжньої або поперечної подачі значення висотного показника шорсткості зростає. При цьому, як було вказано раніше, вплив подовжньої подачі переважає над впливом поперечної подачі. При збільшенні поперечної подачі різальні зерна, що найбільш виступають, занурюються в оброблюваний матеріал на велику глибину і залишають на поверхні виробу глибші й ширші сліди. Збільшення подовжньої і/або поперечної подач приводить до збільшення перерізу зрізу, при цьому зростає сила різання і знижується зносостійкість шліфувального круга. Усе це веде до збільшення шорсткості незалежно від марки оброблюваного матеріалу.

Зі збільшенням подовжньої подачі у діапазоні від 0,3 до 0,5 м/хв. при обробці твердого сплаву ВК6 алмазним кругом на металевій зв'язці М1-04 середнє арифметичне відхилення профілю R_a зростає у 1,9 рази, а найбільша висота профілю R_{max} – у 1,85 рази; при обробці твердого сплаву Т15К6 кругом на полімерній зв'язці В2-01 збільшення тих же показників шорсткості складо: R_a – у 1,5 рази, R_{max} – у 1,8 рази.

Зі збільшенням поперечної подачі у діапазоні від 0,1 до 0,2 м/хв. при обробці твердого сплаву ВК6 алмазним кругом на металевій зв'язці М1-04 параметр R_a збільшився у 1,84 рази, а параметр R_{max} – у 1,58 рази; при обробці твердого сплаву Т15К6 кругом на полімерній зв'язці В2-01 збільшення складо: R_a – у 1,54 рази, R_{max} – у 1,96 рази.

Отже, для зниження шорсткості рекомендується зменшити значення подовжньої і/або поперечної подач, що приведе до зниження продуктивності

обробки, яка забезпечує необхідну шорсткість і якість оброблюваної поверхні.

Таким чином, обробка твердих сплавів кругом на полімерній зв'язці В2-01 дозволяє отримати поверхню з шорсткістю нижчою, ніж після обробки кругом на металевій зв'язці М1-04. Це пов'язано з наявністю у полімерних зв'язок деякої еластичності, що забезпечить меншу шорсткість обробленої поверхні.

Висновки. В результаті обробки експериментальних даних отримані комплексні залежності, що дозволяють розрахувати відносну витрату алмазів, питому собівартість обробки, параметри шорсткості від режимів обробки. При цьому встановлено, що вплив поперечної і подовжньої подач на відносний знос алмазів практично рівнозначний. Це дозволяє зробити висновок про залежність показників працездатності кругів від продуктивності процесу шліфування незалежно від поєднання значень подач.

Аналіз отриманих комплексних залежностей параметрів шорсткості оброблених поверхонь твердих сплавів від режимів обробки показав, що для зниження шорсткості необхідно збільшити швидкість різання або зменшити подовжню і/або поперечну подачі, проте їх зменшення приведе до зниження продуктивності обробки.

Для обробки на чорнових режимах різання, коли потрібно забезпечити підвищену продуктивність обробки, доцільно застосовувати шліфувальні круги на металевих зв'язках, а на чистових операціях, коли необхідно отримати задану шорсткість, – використовувати шліфувальні круги на полімерних зв'язках.

Список литературы

1. Верещака А. С., Кушнер В. С. *Резание материалов: Учебник*. Москва: Высшая школа, 2009. 535 с.
2. Петруха П. Г., Каленов В. Н., Ленский В. В. Алмазное шлифование вольфрамового сплава ВПМ. *Финишная обработка абразивно-алмазными инструментами*. 1973. С. 132–134.
3. Захаренко И. П. *Основы алмазной обработки твердосплавного инструмента*. Київ: Наукова думка, 1981. 300 с.
4. Галицкий А. Н., Курищук А. В., Муровский В. А. *Алмазно-абразивный инструмент на металлургических связках для обработки твердого сплава и стали*. Київ: Наукова думка, 1986. 144 с.
5. Захаренко И. П. *Алмазные инструменты и процессы обработки*. Київ: Техніка, 1980. 215 с.
6. Булошников В. С., Малевский Н. П., Попов С. А., Л. С. Сенченкова. Глубинное шлифование многогранных пластинок из твердого сплава. *Труды Московского высшего технического училища им. Н. Э. Баумана*. Москва, 1974. С.119–129.
7. Захаренко И. П., Савченко Ю. А., Лавриненко В. И., Дегтяренко С. М. *Прогрессивные методы абразивной обработки металлов*. Київ: Техніка, 1990. 152 с.
8. Попов С. А., Малевский Н. П., Терещенко Л. М. *Алмазно-абразивная обработка металлов и твердых сплавов*. Москва: Машиностроение, 1977. 314 с.
9. Маргулес А. У. *Резание металлов керметами*. Москва: Машиностроение, 1980. 160 с.
10. Захаренко И. П., Савченко Ю. Я. *Алмазно-электролитическая обработка инструмента*. Київ: Наукова думка, 1978. 224 с.
11. Лавриненко В. И. *Электрошлифование инструментальных материалов*. Київ: Наукова думка, 1993. 156 с.
12. Лавриненко В. И., Лещук И. В., Смоквина В. В., Солод В. Ю., Музыка Д. Г., Орленко С. А. Особенности формирования шероховатости обработанной поверхности при многопроходном и глубинном торцовом шлифовании кругами из СТМ с использованием опорных элементов в виде компактов из КНБ.

Современные проблемы производства и ремонта в промышленности и на транспорте: Матер. 12-го Межд. науч.-техн. семинара (20–24 февраля 2012 г., Свалыва). Киев: АТМ України, 2012. С. 143–145

References (transliterated)

1. Vereshhaka A. S., Kushner V. S. *Rezanie materialov: Uchebnik. [Cutting of materials: textbook]*. Moscow, Vysshaja shkola Publ., 2009. 535 p.
2. Petruha P. G., Kalenov V. N., Lenskij V. V. *Almaznoe shlifovanie vol'framovogo splava VPM [Diamond grinding of tungsten alloy VPM]. Finishnaja obrabotka abrazivno-almaznymi instrumentami*, 1973, pp. 132–134.
3. Zaharenko I. P. *Osnovy almaznoj obrabotki tverdosplavnogo instrumenta [Fundamentals of diamond machining of carbide tools]*. Kyiv: Naukova dumka Publ., 1981. 300 p.
4. Galickij A. N., Kurishhuk A. V., Murovskij V. A. *Almazno-abrazivnyj instrument na metallicheskih svyazkah dlja obrabotki tverdogo splava i stali [Diamond abrasive tool with metal bonds for machining of cemented-carbide composition and steel]*. Kyiv: Naukova dumka Publ., 1986. 144 p.
5. Zaharenko I. P. *Almaznye instrumenty i processy obrabotki [Diamond tools and machining processes]*. Kyiv: Tehnika Publ., 1980. 215 p.
6. Buloshnikov V. S., Malevskij N. P., Popov S. A., L. S. Senchenkova. *Glubinnoe shlifovanie mnogogrannyh plastinok iz tverdogo splava [Deep grinding of throwaway sintered-carbide inserts]. Trudy Moskovskogo vysshego tehničeskogo uchilishha im. N. Je. Baumana*. Moscow, 1974, pp.119–129.
7. Zaharenko I. P., Savchenko Ju. A., Lavrinenko V. I., Degtjarenko S. M. *Progressivnye metody abrazivnoj obrabotki metallov [Progressive methods of abrasive machining of metals]*. Kyiv: Tehnika Publ., 1990. 152 p.
8. Popov S. A., Malevskij N. P., Tereshhenko L. M. *Almazno-abrazivnaja obrabotka metallov i tverdyh splavov [Diamond abrasive machining of metals and cemented-carbide compositions]*. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1977. 314 p.
9. Margules A. U. *Rezanie metallov kermetami [Cutting of metals by]*. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1980. 160 p.
10. Zaharenko I. P., Savchenko Ju. Ja. *Almazno-jelektroliticheskaja obrabotka instrumenta [Diamond electrolytic machining of tool]*. Kyiv: Naukova dumka Publ., 1978. 224 p.
11. Lavrinenko V. I. *Jelektroshlifovanie instrumental'nyh materialov [Electrical grinding of tool materials]*. Kyiv: Naukova dumka Publ., 1993. 156 p.
12. Lavrinenko V. I., Leshhuk I. V., Smokvina V. V., Solod V. Ju., Muzychka D. G., Orlenko S. A. *Osobennosti formirovanija sferohovatosti obrabotannoj poverhnosti pri mnogoprohodnom i glubinnom torcovom shlifovanii krugami iz STM s ispol'zovaniem opornyh jelementov v vide kompaktoz iz KNB [Features of the formation of the treated surface roughness with multistep and deep face grinding with wheels from SHM using reference elements in the form of compacts from CBN]. Sovremennye problemy proizvodstva i remonta v promyshlennosti i na transporte: Mater. 12-go Mezhd. nauch.-tehn. seminara (20–24 fevralja 2012 g., Svaljava). [Modern problems of production and repair in industry and transport: Proc. 12th Int. Sci.-Tech. Seminar (20–24 February 2012, Svalyava)]. Kyiv: AMET of Ukraine, 2012. Pp. 143–145.*

Поступила (received) 23.11.2018

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Музичка Діана Геннадіївна (Музычка Диана Геннадьевна, Muzychka Diana Gennadyivna) – кандидат технічних наук, Дніпровський державний технічний університет, доцент кафедри технології машинобудування; м. Кам'янське, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2914-9672>; e-mail: muzichka@ua.fm

О. Ф. ЄНИКЄВ, Ф. М. ЄВСЮКОВА, О. Ю. ПРИХОДЬКО, О. В. НАБОКА

АНАЛІЗ ЧАСТОТНИХ ХАРАКТЕРИСТИК СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ПРОДУКТИВНІСТЮ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ АЛМАЗНОГО ШЛІФУВАННЯ

Запропоновано технологію безперервного оброблення поверхні деталі на основі поєднання технологічних процесів алмазного та алмазно-іскрового шліфування. Розроблено структурну схему системи автоматичного керування параметрами технологічних процесів з використанням принципу керування за відхиленням. Побудовано математичні моделі компонент системи керування та в результаті аналізу її структурної схеми отримано передавальну функцію. На основі мінімізації квадратичного критерію якості із застосуванням еталонної моделі синтезовано пристрій оброблення входних сигналів. Побудовано схему комп'ютерного моделювання у середовищі Matlab процесів перетворення входної інформації апаратними засобами системи автоматичного керування параметрами технологічних процесів. У результаті комп'ютерного моделювання встановлено, що апаратні засоби забезпечують потрібну продуктивність та точність оброблення входних сигналів.

Ключові слова: апаратні засоби, продуктивність, математичне та комп'ютерне моделювання.

А. Ф. ЕНИКЕЕВ, Ф. М. ЕВСЮКОВА, О. Ю. ПРИХОДЬКО., Е. В. НАБОКА

АНАЛИЗ ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬЮ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА АЛМАЗНОГО ШЛИФОВАНИЯ

Предложена технология непрерывной обработки поверхности детали на основе объединения технологических процессов алмазного и алмазно-искрового шлифования. Разработана структурная схема системы автоматического параметрами технологических процессов с использованием принципа управления по отклонению. Построены математические модели компонент системы управления и в результате анализа структурной схемы получена передаточная функция. На основе минимизации квадратичного критерия качества с использованием эталонной модели синтезировано устройство обработки входных сигналов. Построено схему компьютерного моделирования в среде Matlab процессов преобразования входной информации аппаратными средствами системы автоматического управления параметрами технологических процессов. В результате компьютерного моделирования установлено, что аппаратные средства обеспечивают нужную производительность и точность обработки входных сигналов.

Ключевые слова: аппаратные средства, производительность, математическое и компьютерное моделирование.

A. YENIKIEIEV, F. YEVSUKOVA, O. PRIHODKO., O. NABOKA

ANALYSIS OF THE FREQUENCY CHARACTERISTICS OF THE PERFORMANCE MANAGEMENT SYSTEM OF THE DIAMOND GRINDING PROCESS

The technology of continuous surface treatment of parts based on the combination of technological processes of diamond and diamond-spark grinding is proposed. A block diagram of the system of automatic parameters of technological processes was developed using the principle of deviation control. Mathematical models of the control system components have been built and the transfer function has been obtained as a result of the analysis of the structural scheme. Based on the minimization of the quadratic quality criterion using the reference model, an input signal processing device was synthesized. A scheme of computer simulation in the Matlab environment of the processes of input information conversion by the hardware of the automatic control system of the technological process parameters has been built. As a result of computer simulation, it was found that the hardware provides the necessary performance and accuracy of processing input signals.

Keywords: hardware, performance, mathematical and computer modeling.

Вступ. Програмне керування рухами апаратних засобів верстату скорочує час оброблення деталі та забезпечує задану шорсткість поверхні [1]. Технологія безперервного оброблення поверхні деталі поєднує у собі процеси алмазного (АШ) та алмазно-іскрового шліфування (АІШ), що забезпечує підвищення продуктивності.

Постановка проблеми. Інформаційний зв'язок між процесом АШ та апаратними засобами забезпечують сигнали струму та напруги приводу головного руху верстату, а також сигнал швидкості обертання круга. На основі допускового контролю та непрямих вимірювань різальної властивості шліфувального круга вони реалізують технологію безперервного оброблення поверхні деталі. Інформаційний зв'язок між апаратними засобами та процесом АІШ забезпечує сигнал правки круга.

Розв'язування задачі. Методика розроблення апаратних засобів із відповідними метрологічними характеристиками й продуктивністю для систем керування параметрами технологічних процесів складається з таких процедур:

- розробляємо математичні моделі компонент із використанням перетворення Лапласа;
- на основі інформаційного підходу визначаємо смугу нечутливості первинного перетворювача входного сигналу навколо номінальної характеристики перетворення;
- визначаємо передавальну функцію в результаті перетворень її структурної схеми;
- розраховуємо частотні характеристики системи автоматичного керування (САК). Спрощення математичної моделі забезпечується за рахунок погашення коренів чисельника та знаменника передатної функції, а також у відкиданні коренів другого порядку малості;
- моделюємо завади компонент та за допомогою методики підсумовування випадкових складових встановлюємо смугу невизначеності вихідного сигналу;
- синтез пристрою оброблення входного сигналу виконуємо на основі мінімізації квадратичного критерію якості із застосуванням еталонної моделі;

- встановлюємо математичну модель вхідного сигналу та визначаємо його частотне подання;

- за допомогою теореми про згортку визначаємо вихідний сигнал, який використовуємо в якості прогнозованого при аналізі ефективності апаратних засобів оброблення інформації;

- будуємо схему комп'ютерного моделювання процесів перетворення інформації. У результаті аналізу вихідного сигналу робимо висновок про продуктивність та точність апаратних засобів оброблення вхідної інформації.

Структурну схему апаратних засобів, які організують технологію безперервного оброблення поверхні деталі, наведено на рис. 1. Функціонально САК складається з таких компонент: вимірювальний перетворювач потужності (ВПП), пристрій оцінювання шпаруватості (ПОШ), пристрій 5 цифрового оброблення сигналів, пристрій управління шпаруватістю (ПУШ) та генератор типу ШГІ. Виконаємо розроблення математичних моделей компонент та в результаті аналізу структурної схеми САК отримаємо вираз для передавальної функції.

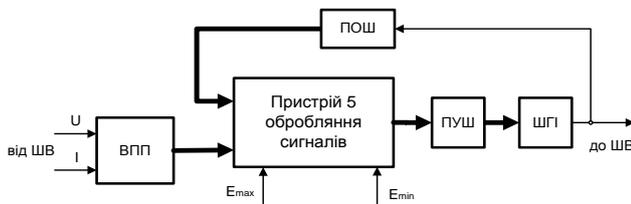


Рис. 1 – Структурна схема САК

Функцію цифрового задавання шпаруватості вихідного сигналу генератора ШГІ реалізує пристрій 5 оброблення сигналів, який при цьому також виконує лінійні обчислювальні операції. Отже, цей компонент подаємо лінійним імпульсним фільтром із такою функцією передачі [3]

$$W_1(p) = \frac{1 - e^{-p\tau_r}}{\tau_r}, \quad (1)$$

де τ_r – запізнення.

Специфіка роботи блоку ВПП у складі САК дозволяє подати його імпульсним елементом, який має наступну передавальну функцію [61]

$$W_2(p) = \frac{1 - e^{-pT_{np}}}{p}, \quad (2)$$

де T_{np} – час перетворення інформації ВПП.

Генератор ШГІ подаємо пропорційною ланкою, яка має коефіцієнт перетворення K_{III} та відповідно таку передавальну функцію [3]

$$W_3(p) = K_{III}. \quad (3)$$

Будемо також вважати, що пристрій 5 виконує підсумовування вихідних сигналів компонент ПОС та ВПП. На підставі вище викладеного отримаємо таку структурну схему математичної моделі апаратних засобів, які організують технологію безперервного оброблення поверхні деталі (рис. 2).

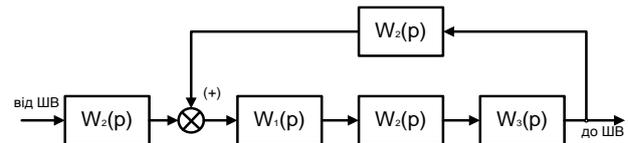


Рис. 2 – Структурна схема моделі апаратних засобів

Виконаємо аналіз структурної схеми з метою отримання передавальної функції. При перетворенні структурної схеми будемо вважати вузол ШВ пропорційною ланкою із коефіцієнтом передачі K_{OV} . Тоді, відповідно до правил перетворення структурних схем, маємо такий вираз для передавальної функції

$$W_4(p) = \frac{1}{p} \left[1 - e^{-pT_z} + K_{OV} \left(1 - e^{-pT_{np}} \right) \right], \quad (4)$$

де T_z – період вихідного сигналу генератора ШГІ.

Компоненти ПОС та ВПП мають підвищену швидкодію. Відповідно, цілком коректна така заміна експоненційних функцій

$$e^{-pT_z} \approx 1 - pT_z. \quad (5)$$

Із урахуванням цього маємо наступне рівняння

$$W_5(p) = T_z + T_{np} K_{OV}. \quad (6)$$

Передавальна функція розімкненого контуру, дорівнює добутку передавальних функцій окремих компонент

$$W_6(p) = K_{III} (T_z + K_{OV} T_{np}) \frac{(1 - e^{-p\tau_r}) (1 - e^{-pT_z})}{\tau_r p}. \quad (7)$$

Останній вираз приведемо до наступного вигляду

$$W_6(p) = K_{III} (T_z + K_{OV} T_{np}) \frac{(e^{p\tau_r} - 1) (e^{pT_z} - 1)}{\tau_r e^{p\tau_r} p e^{pT_z}}. \quad (8)$$

Виконаємо заміну експоненційних функцій обмеженим ступеневим рядом (5). Після перетворень передатна функція розімкненого контуру набуває такого вигляду

$$W_6(p) = \frac{K_{III} p T_z (T_z + K_{OV} T_{np})}{(1 + \tau_r p) (1 + T_z p)}. \quad (9)$$

Звідси передавальна функція апаратних засобів програмного задавання шпаруватості сигналу генератора ШГІ виходить у вигляді

$$W_7(p) = \frac{K_{III} p T_z (T_z + K_{OV} T_{np})}{\tau_r T_z p^2 + [\tau_r + T_z + K_{III} T_z (T_z + K_{OV} T_{np})] p + 1}. \quad (10)$$

Пошук полюсів дозволяє подати передавальну функцію апаратних засобів програмного задавання параметрів АШ у вигляді послідовного з'єднання елементарних ланок

$$W_8(p) = \frac{K_{III} p T_z (T_z + K_{OV} T_{np})}{(T_{16} p + 1) (T_{17} p + 1)}. \quad (11)$$

Для обчислень інтеграла Дюамеля застосуємо зворотне перетворення Лапласа до рівняння (11). Після перетворень отримаємо

$$W_9(t) = B_{11}e^{-\frac{t}{T_{16}}} + B_{12}e^{-\frac{t}{T_{17}}}, \quad (12)$$

$$B_{11} = \frac{K_{III}T_z(T_z + K_{OV}T_{np})}{T_{16}(T_{17} - T_{16})}, \quad B_{12} = \frac{K_{III}T_z(T_z + K_{OV}T_{np})}{T_{17}(T_{16} - T_{17})}$$

де Вхідний сигнал апаратних засобів програмного задавання параметрів АПШ подаємо у вигляді одиничної функції. Інтеграл згортки на основі виразу (12) дав рівняння, яке описує динаміку вихідного сигналу

$$y(t) = 1(t) + \frac{B_{12}T_{17}}{T_{17} + 1}e^{-\frac{T_{17}t}{T_{17} + 1}} - \frac{B_{11}T_{16}}{T_{16} + 1}e^{-\frac{T_{16}t}{T_{16} + 1}} \quad (13)$$

Цей вираз описує прогнозований вихідний сигнал, який буде використано в подальшому при аналізі продуктивності апаратних засобів. Отримаємо дискретну передавальну функцію апаратних засобів програмного задавання параметрів АПШ. Для цього розкладаємо вираз $W_{11}(p)/p$ на прості дроби

$$\frac{W_{11}(p)}{p} = k_{III}T_z(T_z + K_{OV}T_{np}) \left[\frac{T_{18}T_{16}}{(T_{17} - T_{16})(T_{17}p + 1)} - \frac{T_{18}T_{16}}{(T_{17} - T_{16})(T_{16}p + 1)} \right],$$

де $T_{18} = \tau_r$.

Відповідно до таблиці z-перетворень знаходимо вираз для передатної функції апаратних засобів програмного задавання параметрів АПШ

$$W_{45}(z) = k_{III}T_z(T_z + K_{OV}T_{np}) \left[\frac{T_{18}z}{(T_{17} - T_{16}) \left(z - e^{-\frac{T_0}{T_{17}}} \right)} - \frac{T_{18}z}{(T_{17} - T_{16}) \left(z - e^{-\frac{T_0}{T_{16}}} \right)} \right]$$

Після перетворень подаємо останній вираз у вигляді відносини ступеневих поліномів

$$W(z^{-1}) = \frac{k_{III}T_z(T_z + K_{OV}T_{np}) \frac{T_{18}}{T_{17} - T_{16}} \left(e^{-\frac{T_0}{T_{17}}} + e^{-\frac{T_0}{T_{16}}} \right) z^{-1}}{1 - \left(e^{-\frac{T_0}{T_{16}}} + e^{-\frac{T_0}{T_{17}}} \right) z^{-1} + e^{-\frac{T_0}{T_{17}}} e^{-\frac{T_0}{T_{16}}} z^{-2}} \quad (14)$$

Кінцево-різницеве рівняння, яке описує динаміку роботи апаратних засобів програмного задавання параметрів АПШ, використовує наступні оператори зсуву

$$z^{-2}y[nT_0] = y_{n-2} \quad z^{-1}y[nT_0] = y_{n-1}$$

на їхній основі рівняння (10) прийме такий вигляд

$$y_n + a_1y_{n-1} + a_2y_{n-2} = b_1u_{n-1}, \quad (15)$$

$$a_1 = - \left(e^{-\frac{T_0}{T_{16}}} + e^{-\frac{T_0}{T_{17}}} \right), \quad a_2 = e^{-\frac{T_0}{T_{16}}} e^{-\frac{T_0}{T_{17}}};$$

$$b_1 = k_{III}T_z(T_z + K_{OV}T_{np}) \frac{\tau_r}{T_{17} - T_{18}} \left(e^{-\frac{T_0}{T_{17}}} + e^{-\frac{T_0}{T_{16}}} \right)$$

Із врахуванням подання вхідного сигналу апаратних засобів програмного задавання параметрів АПШ у вигляді функції Хевісайда передавальна функція пристрою 5 оброблення сигналів запишеться так [4]

$$W(z) = \frac{k_{III}T_z(T_z + K_{OV}T_{np}) \frac{\tau_r}{T_{17} - T_{16}} \left[z^2 + \left(e^{-\frac{T_0}{T_{17}}} + e^{-\frac{T_0}{T_{16}}} \right) z \right]}{e^{-\frac{T_0}{T_{17}}} e^{-\frac{T_0}{T_{16}}} z^2 - \left(e^{-\frac{T_0}{T_{17}}} + e^{-\frac{T_0}{T_{16}}} \right) z + 1} \quad (16)$$

На основі виразів (14) та (16) за допомогою методик роботи [2] побудовано схему комп'ютерного моделювання процесу перетворення інформації апаратними засобами програмного задавання параметрів АПШ (рис. 3). В результаті комп'ютерного моделювання встановлено, що апаратні засоби задовольняють вимогам за швидкодією (рис. 4).

Час відпрацювання вхідного сигналу у вигляді стрибка величиною 0.043 склав 0.12мс. Для отримання передавальної функції похибки виконаємо аналіз структурної схеми апаратних засобів. За умови наявності в їхньому складі замкненого контуру, який володіє одиничною негативним зворотнім зв'язком, в результаті перетворень отримаємо таке операторне рівняння

$$G_2(p) = \frac{(T_{16}p + 1)(T_{17}p + 1)}{(T_{16}p + 1)(T_{17}p + 1) + K_{III}pT_z(T_z + K_{OV}T_{np})} \quad (17)$$

Перехід в частотну область дає наступне рівняння похибки

$$\delta = \sqrt{\frac{(1 - T_{16}T_{17}\Omega^2)^2 + (T_{16} + T_{17})^2\Omega^2}{(1 - T_{16}T_{17}\Omega^2)^2 + [T_{16} + T_{17} + K_{III}T_z(T_z + K_{OV}T_{np})]^2\Omega^2}} \quad (18)$$

Результати розрахунку похибки, які отримано за допомогою останнього рівняння, задовільно узгоджуються із аналізом метрологічних характеристик окремих компонент. Величина відносної похибки склала 0.03%. Отже, апаратні засоби задовольняють вимогам за точністю.

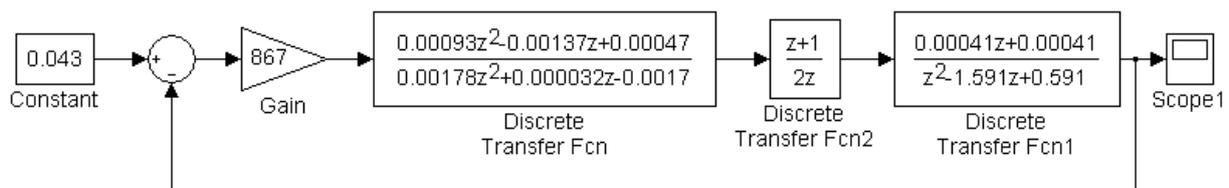


Рис. 3 – Структурна схема комп'ютерного моделювання процесу перетворення інформації

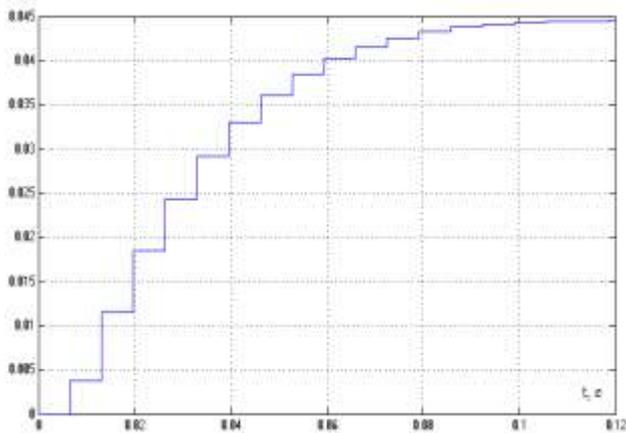


Рис. 4 – Результати комп'ютерного моделювання

Висновок. На основі поєднання технологічних процесів алмазного та алмазно-іскрового шліфування запропоновано нову технологію безперервного оброблення поверхні деталі. Із використанням принципу керування за відхиленням розроблено структурну схему системи автоматичного керування параметрами технологічних процесів. Побудовано математичні моделі компонент та в результаті аналізу структурної схеми системи керування отримано передавальну функцію. На основі мінімізації квадратичного критерію якості із застосуванням еталонної моделі синтезовано пристрій оброблення вхідних сигналів. Встановлено, що апаратні засоби забезпечують потрібну продуктивність та точність оброблення вхідних сигналів.

Список літератури

1. Еникеев А.Ф. Оптимальное управление технологическим процессом алмазного шлифования.–Краматорск: ДГМА, 2001. – 160 с.
2. Лазарев Ю.П. Моделирование процессов и систем в Matlab: Учебный курс. – С.Пб.: Питер; К.: Изд. группа BHV, 2005. – 512 с.
3. Анализ эффективности аппаратных средств управления поперечной подачей шлифовального круга / А.Ф. Еникеев, Ф.М. Євсюкова, Л.А. Шищенко// Вестник национального технического университета «ХПИ». – 2015. – № 4. – С. 132 – 137.
4. Синтез цифрового регулятора поперечной передачи шлифовального круга /Єнікєєв О.Ф., Зиков І.С./ Вестник Национального технического университета «ХПИ». – Харьков: №57, 2008.– С. 87–93.

References (transliterated)

1. Yenkiceiev A.F. *Optimalnoe upravlenie tehnologicheskim processom almaznogo shlifovaniya*. [Optimal management by the technological process of the diamond polishing.] Kramatorsk: DGMA, 2001. 160 p.
2. Lazarev Yu.P. *Modelirovanie processsov i sistem v Matlab: Training course*. [Modeling of processes and systems in Matlab]- S.Pb.: Peter; K.: Publ. group BHV, 2005. - 512 p.
3. Yenkiceiev A.F., Yevsiukova F.M., Shushenko L.A. *Analiz effektivnosti apparatnih sredstv upravleniya poperechnoj podachej shlifovalnogo kruga* [The analysis of the efficiency of hardware control of the longitudinal feed of the grinding wheel] Vestnik natsionalnogo tekhnicheskogo universiteta «KhPI». – Kharkov. – No 4, 2015. pp. 132 – 137.
4. Yenkiceiev O.F., Zikov I.S. *Sintez tsyfrovoho rehuliyatora poperechnoi peredachi shlifovalnogo kruga* [Synthesis of digital regulator of transversal transmission of the grinding circle] / Vestnik national nogo tekhnicheskogo universiteta «KhPI». Kharkov. no 57, 2008. pp. 87 – 93..

Надійшла (received) 28.11.2018

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Єнікєєв Олександр Фанилович (Еникеев Александр Фанилович, Yenkiceiev Oleksandr)– доктор технічних наук, доцент, Донбаська державна машинобудівна академія, завідувач кафедри інтелектуальних систем прийняття рішень, м. Краматорськ, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8633-3233>, тел.: (050)-194-33-57, (096)-245-32-83, (063)-205-93-97, e-mail: Al_enikeev@bigmir.net

Євсюкова Фатима Магомєтбїєвна (Евсюкова Фатима Магомєтбиевна, Yevsiukova Fatyma) – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», старший викладач кафедри технології машинобудування та металорізальних верстатів, м.Харків, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9764-4106>, тел.: (057)-720-66-25, моб. +380979412299; e-mail: evsyukova_fatima@mail.ru

Приходько Ольга Юрїєвна (Приходько Ольга Юрьевна, Prihodko Olga) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри технології машинобудування та металорізальних верстатів, м.Харків, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6452-0465>, тел.: (057)-720-66-25, e-mail: olmurakami@mail.ru

Набока Елена Володимирівна (Набока Елена Владимировна, Naboka Olena) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри технології машинобудування та металорізальних верстатів, м.Харків, Україна, тел.: (057)-720-66-25, e-mail: namirauza@gmail.com

Г.И. КОСТЮК, А.В. ЕВСЕЕНКОВА

ЭФФЕКТИВНОЕ ФРЕЗЕРОВАНИЕ ТИТАНОВОГО СПЛАВА VT22 РЕЖУЩИМ ИНСТРУМЕНТОМ ИЗ МОДИФИЦИРОВАННОГО ТВЁРДОГО СПЛАВА BK10 С ПОКРЫТИЕМ 0,18HFNT0,82ZRN

На основе исследования размера зерна и состава покрытия 0,18HfNt0,82ZrN до и после обработки, нанесённых при напряжении на подложке 200 и 250В, были проведены исследования износа, стойкости РИ с покрытием и без. Получены зависимости снимаемого объёма материала за период стойкости от износа пластин по задней поверхности. Показано, что эффективность (снимаемый объём материала за период стойкости) выше для пластин с покрытием, которые обрабатывались при напряжении на подложке 250В – 2,5 (1,54 раза) как при 200В – 1,46 (1,21 раза) эта величина меньше для полустойковой и черновой обработки (необработанные пластины), это связано с размером зерна, который в первом случае составляет 93,9 нм, т.е. реализуются наноструктуры, тогда как для второго размер зерна выше за счёт более длительного нанесения покрытия (30 мин вместо 25 мин в первом случае), которое с ростом температуры растёт.

Ключові слова: фрезерование, покрытие, режущие пластины, снимаемый объём материала за период стойкости, наноструктуры.

Г.І. КОСТЮК, А.В. ЄВСЄЄНКОВА

ЭФФЕКТИВНЕ ФРЕЗЕРУВАННЯ ТИТАНОВОГО СПЛАВУ VT22 РІЖУЧИМ ІНСТРУМЕНТОМ З МОДИФІКОВАНОГО ТВЕРДОГО СПЛАВУ BK10 З ПОКРИТТЯМ 0,18HFNT0,82ZRN

На основі дослідження розмірів зерна та складу 0,18HfNt0,82ZrN до і після обробки, нанесених при напрузі на підложці 200 і 250В, були проведені дослідження зносу, стійкості РІ з покриттям і без. Отримані залежності знятого об'єму матеріалу за період стійкості від зносу пластин по задній поверхні. Показано, що ефективність (знятий об'єм матеріалу за період стійкості) вище для пластин з покриттям, які обробляються при напрузі на підкладці 250В - 2,5 (1,54 раза) як при 200В - 1,46 (1,21 раз) ця величина менше для полустойковой та черновой обробкою (не оброблені пластины), це пов'язано з розміром зерна, який в першому випадку становить 93,9 нм, тобто реалізуються наноструктури, тоді як для другого розміру зерна вище за рахунок більш тривалого нанесення покриттів (30 хвилин замість 25 мін в першому випадку), що зі зростанням температури зростає.

Ключевые слова: фрезерування, покриття, ріжучі пластины, що знімається обсяг матеріалу за період стійкості, наноструктури.

G. I. KOSTYUK, A. V. EVSEENKOVA

EFFECTIVE MILLING OF TITANIUM ALLOY VT22 WITH A CUTTING TOOL FROM A MODIFIED CARBIDE BK10 WITH A COATING OF 0.18HFNT0.82ZRN

Based on the study of the grain size and coating composition 0.18HfNt0.82ZrN before and after the treatment applied on the substrate 200 and 250V stress, the wear, durability and durability studies of RI with and without coating were performed. The dependencies of the volume of the material taken during the period of resistance from the wear of the plates on the back surface are obtained. It is shown that the efficiency (the volume of material removed during the period of resistance) is higher for plates coated that were processed at a voltage on the substrate 250V - 2.5 (1.54 times) as at 200V - 1.46 (1.21 times), this value is lower for gutter and rough processing (unprocessed plates), this is due to the grain size, which in the first case amounts to 93.9 nm, i.e. Nanostructures are realized, whereas for the second grain size it is higher due to the longer coating (30 minutes instead of 25 minutes in the first case), which increases with increasing temperature.

Keywords: milling, coating, cutting plates, removable volume of material for a period of durability, nanostructures.

Вступ. В настоящее время в авиастроении всё ещё остаётся открытым вопрос обработки титановых сплавов, применение уже ставшего традиционным покрытия TiN не даст эффекта из-за высокой адгезии к титановому сплаву. Поэтому необходимо искать покрытия имеющие минимальную адгезию к титану, кроме обеспечения минимальной адгезии необходимо создать покрытие с малым износом, что может быть реализовано за счёт образования наноструктур в поверхностном слое покрытия на режущем инструменте. Всё это говорит о важности исследования эффективности и работоспособности режущего инструмента с покрытием.

Состояние вопроса. К сожалению в литературе [1-10] очень мало сведений по обработке титановых сплавов особенно их фрезерованию. В наших монографиях и справочниках [1-2] есть работы по точению титановых сплавов, но фрезерование их не рассматривалось, что говорит о важности и своевременности исследования эффективности и работоспособности твердосплавных пластин с покрытием для составных фрез.

Методы исследований и их аппаратное обеспечение. Износ режущего инструмента измерялся на инструментальном микроскопе по которому определялась стойкость РИ при чистой (износ по задней поверхности $h_3 \leq 0,25$ мм), полустойковой ($h_3 \leq 0,4$ мм) и черновой ($h_3 \leq 0,6$ мм). Контрольное испытание РИ по стойкости проводилось с применением оптического микроскопа. Пример измерений представлен на рис.1.

Размер зерна определялся на растровом электронном микроскопе РЭМ 106, состав определялся на анализаторе ДРОН-3М, измерения проводились на РИ без покрытия, с покрытием до обработки и после обработки – фрезерования титанового сплава VT-22. Основные характеристики которого представлены в таблице 1 и 2.

Учитывая высокую адгезию к титановому сплаву большинства покрытий, то были проведены расчёты адгезионных характеристик по нашей работе [3] и покрытие имеет рейтинг 7 и 9 в случае контакта с титановым сплавом.

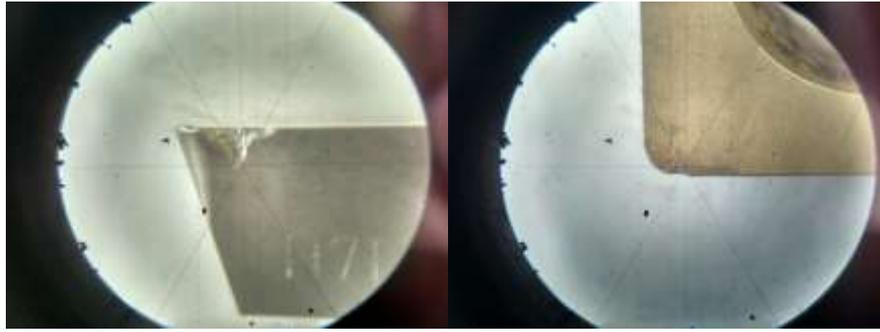


Рис.1 – Микрофотографии разрушения (термоупругое скалывание) режущей кромки ПИ с покрытием

Таблица 1 – Механические свойства при T=20°C материала ВТ22

Сортамент	σ_B	σ_T	σ_B	δ_5	ψ	КСУ	Термообр.
-		МПа	МПа	%	%	кДж/м ²	-
Пруток, ГОСТ 26492-85		1030		6-8	14-20	200-250	Отжиг
Пруток, повышенн. качество, ГОСТ 26492-85		1080-1280		7-10	17-30	250-300	Отжиг
Пруток, повышенн. качество, ГОСТ 26492-85		1280		6-7	16-18	180-200	Закалка и старение

Таблица 2 – Физические свойства материала ВТ22

T	A10 ⁶	λ	ρ	C
Град	1/Град	Вт/(м·град)	кг/м ³	Дж/(кг·град)
20		8.32	4620	
100	8	9.21		
200	8.2	10.5		0.565
300	8.4	11.7		0.586
400	8.6	13.4		0.649
500	8.8	14.6		0.712
600		15.9		

Покрyтия наносились на модернизированной установке Булат-6, позволяющей получать равнотолщинные покрытия при потенциалах на подложке 200 и 250В и времени нанесения покрытия 30-25 минут соответственно при давлении азота в камере $5 \cdot 10^{-3}$ мм.рт.ст. (ТОР).

Результаты и их обсуждение. Проводились исследования размера зерна на не работающей и работающей пластине (РЭМ-106) спектрограмма и состав поверхностного слоя в рабочей и не рабочей зоне пластины. Такие исследования были проведены для твердосплавных пластин из модифицированного твердого сплава ВК10 с покрытием 0,2HfN+0,8ZrN.

Так на рис. 2 и 3 представлены спектрограмма (а), состав покрытия (б), микрофотография размера зерна до обработки (в) и после фрезерования сплава ВТ22 (2). Анализ этих рисунков показал, что в процессе работы доля циркония (нитрида циркония) уменьшается, увеличивается доля гафния и нитрида гафния, а размер зерна в результате теплового воздействия увеличивается для всех трёх исследованных пластин с 93,9 до 169 Нм, 332 до 373 Нм. Тепловое воздействие на материал покрытия (нагрев за счёт высоких температур в зоне резания) приводит к росту зерна и

ухудшению режущих свойств покрытия за счёт снижения микротвердости, что связано с переходом структуры от нано до субмикроструктурной.

Рассмотрено влияние режимов нанесения многокомпонентного покрытия 0.2HfN+0.8ZrN на возможность его применения при чистовой обработке (износ по задней поверхности не более $h_3=0,25$ мм) при получистовой ($h_3 \leq 0,4$ мм) и черновой обработке ($h_3 \leq 0,6$ мм). При двух режимах нанесения покрытия: первый – напряжение на подложке составляет 200В, а время $\tau_{\text{нап}} = 30$ мин. Второй – $U_n = 250$ В, а $\tau_{\text{нап}} = 25$ мин.

Ионная очистка проводилась $U_n = 1,2$ кВ и $\tau_{\text{нап}} = 5$ мин. Были получены зависимости снимаемого объёма материала за период стойкости от износа по задней поверхности, что позволило найти как снимаемый объём материала при черновой, получистовой и чистовой обработке при разных скоростях: 1,07; 1,63 и 2,2 м/с при использовании покрытий, нанесённых в режиме $U_n = 250$ В, а $\tau_{\text{нап}} = 25$ мин; второй – $U_n = 200$ В, а $\tau_{\text{нап}} = 30$ мин. Так для скорости резания 1,07 м/с (рис.1) есть возможность повышения снимаемого объёма материала за период стойкости более чем 2,5 раза, тогда как для скорости резания 2,2 м/с позволяют увеличить его только в 2,1 раза.

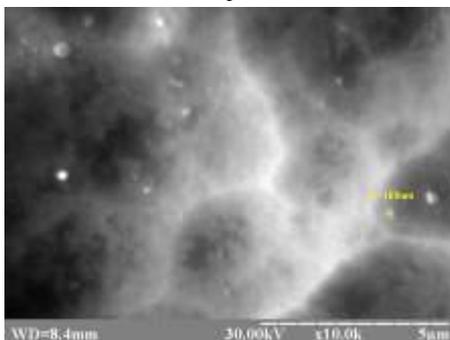
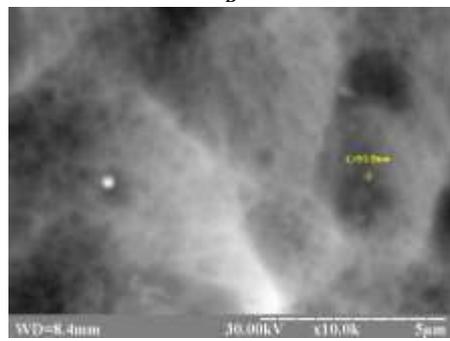
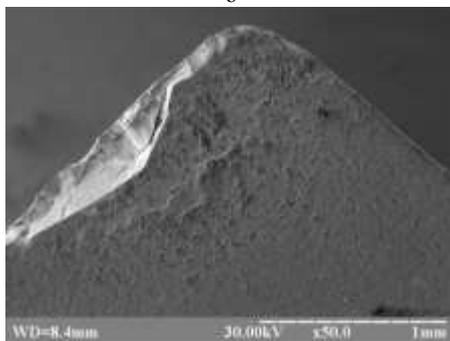
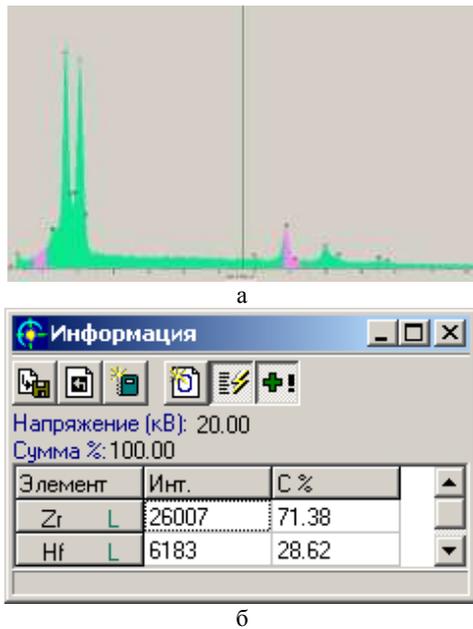


Рис.2 – Спектрограмма рабочей области (а), состав (б), микрофотография зоны разрушения (в) и микрофотография модифицированных твёрдых сплавов ВК10 с покрытием 0,2HfN+0.8ZrN на работавшей пластины (г) – а = 93,9 и отработавшей (д) – а = 169 нм

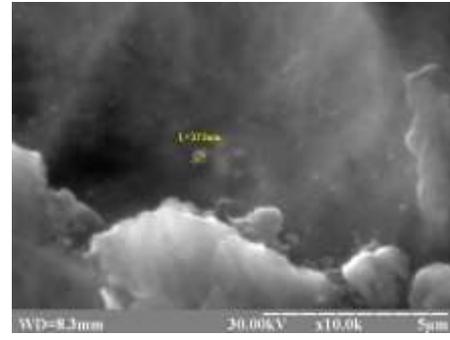
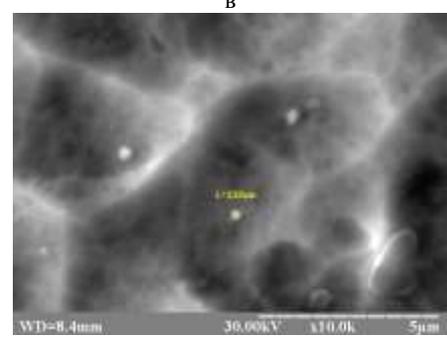
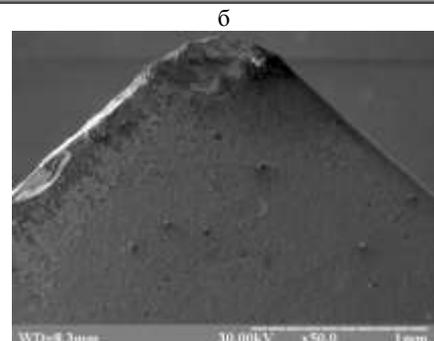
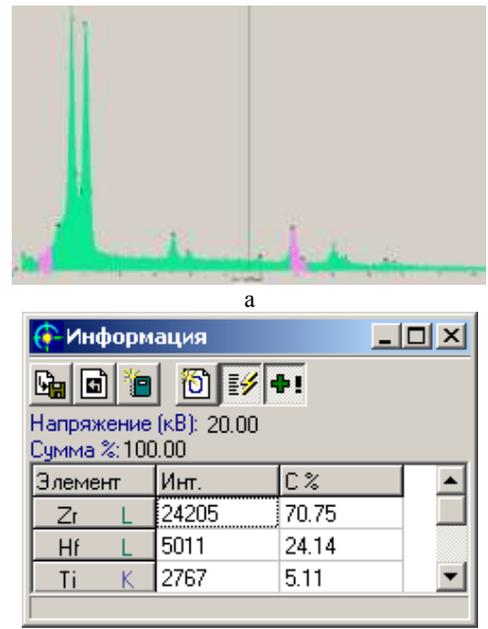


Рис.3 – Спектрограмма рабочей области (а), состав (б), микрофотография зоны разрушения (в) и микрофотография модифицированных твёрдых сплавов ВК10 с покрытием 0,2HfN+0.8ZrN на работавшей пластины (г) – а = 332 и отработавшей (д) – а = 378нм

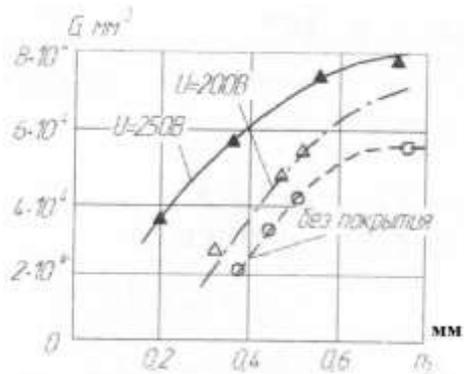


Рис.4 – Зависимости снимаемого объема материала за период стойкости РИ из ВК10 с покрытием $0,2\text{HfN}+0,8\text{ZrN}$ ($U_n=250\text{ В}$ - \blacktriangle), ($U_n=200\text{ В}$ - \triangle) и без покрытия - \circ при скорости резания $1,07\text{ м/с}$ от износа задней поверхности

Меньшее значение снимаемого объема при 200 В можно связать с большей длительностью плазменно-ионной обработки пластины (30 мин вместо 25 мин), приводящей к повышению средней температуры и росту размера зерна, а следовательно и к снижению физико-механических характеристик покрытия.

В первую очередь микротвердость покрытия снижается, а следовательно и абразивный износ растёт, который особенно существенен при малых скоростях резания.

Проведено исследование влияния скорости резания на величину снимаемого объема материала за период стойкости при получистовом фрезеровании (Рис.5). Показано, что при скорости резания 205 м/мин реализуется максимум этого значения, что позволяет использовать этот режим для эффективной обработки титанового сплава ВТ-22.

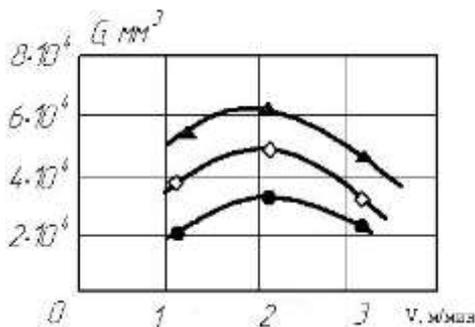


Рис. 5 – Зависимости снимаемого объема материала за период стойкости при получистовой обработке от величины оборотов фрезы в минуту для пластин ВК10 (модифицированных) с покрытием $0,2\text{HfN}+0,8\text{ZrN}$ при потенциале подложки $U_n=250\text{ В}$ - \blacktriangle ($t=25\text{ мин}$), при $U_n=200\text{ В}$ - \blacklozenge ($t=30\text{ мин}$) и для пластин без покрытия

Висновки. Исследование фрезерования титанового сплава ВТ-22 показало, что наиболее эффективно работают пластины с наноструктурами, но в тоже время в процессе работы фрезы наблюдается рост зерна от наноструктурного к субмикроструктурному, при этом снижается доля нитрида циркония в покрытии а увеличивается доля нитрида гафния, что связано с большим испарением нитрида циркония по сравнению с нитридом гафния. В

результате исследования влияния износа по задней поверхности пластины из модифицированного твёрдого сплава ВК-10 (модифицирован нитридами алюминия и хрома) на снимаемый объём материала за период стойкости при фрезеровании обнаружено: - при энергии ионов 250 В и времени их действия 25 мин реализуются максимальные значения снимаемого объёма материала за период стойкости, - при энергии 200 В и времени действия 30 мин реализуются меньшие значения, что связано с ростом температуры при более длительной обработке. Это связано с ростом зерна при повышении температуры. Проведенные исследования позволяют выбрать наиболее эффективные режимы обработки для чистовой, получистовой и черновой обработки. Показано, что при 205 об/мин реализуется максимум этого значения, что позволяет использовать это значение для эффективной обработки титанового сплава ВТ-22.

Список літератури

1. Костюк Г. И. *Эффективный режущий инструмент с нанопокрытиями и наноструктурными модифицированными слоями*: монография-справ. в 2 кн. Кн.1. Плазменно-ионные и ионно-лучевые технологии. Харьков: «Планета-Принт», 2016. 735 с.
2. Костюк Г. И. *Нанотехнологии: выбор технологических параметров и установок, производительность обработки, физико-механические характеристики наноструктур*: монография. Киев: Изд. центр Междунар. академии наук и инновац. технологий, 2014. 472 с.
3. Костюк Г. И. *Нанотехнологии: теория, эксперимент, техника, перспективы*: монография. Киев: Изд. центр Междунар. академии наук и инновац. технологий, 2012. 648 с.
4. Костюк Г. И. *Наноструктуры и нанопокртия: перспективы и реальность*: учеб. пособ. Харьков: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2009. 406 с.
5. Костюк Г. И. *Научные основы создания современных технологий*: учеб. пособ. Харьков: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2008. 552 с.
6. Костюк Г. И. *Эффективный режущий инструмент с покрытием и упрочненным слоем*: монография-справочник. Харьков: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2007. 633 с.
7. Костюк Г. И. *Эффективный режущий инструмент с покрытием и упрочненным слоем*: справочник. Киев.: Вид-во АНУ, 2003. 412 с.
8. Гречихин Л. И. *Физика наночастиц и нанотехнологий*. Москва: УП «Технопринт», 2004. 397 с.
9. Джулий Д. Ю., Майборода В. С., Ткачук И. В., Гейчук В. М. Аксенов И. И. *Вакуумная дуга в эрозионных источниках плазмы*. Харьков: Изд-во НИИ «ХФТИ», 2005. 211 с..
10. Гусев А. И. *Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии*. Москва: Физматлит, 2005. 416 с.

References (transliterated)

1. Kostyuk, G. I. *Effektivnyy rezhushchiy instrument s pokrytiyem i uprochnennym sloyem*. sprav. K.: Vid-vo «Planeta print», 2016. 735 p.
2. Kostyuk, G. I. *Nanotekhnologii: vybor tekhnologicheskikh parametrov i ustanovok, proizvoditel'nost' obrabotki, fiziko-mekhanicheskiye kharakteristiki nanostruktur*. monogr. K.: Izd. tsentr Mezhdunar. akademii nauk i innovats. tekhnologiy, 2014. 472p.
3. Kostyuk, G. I. *Nanotekhnologii: teoriya, eksperiment, tekhnika, perspektivy*: monogr. K.: Izd. tsentr Mezhdunar. akademii nauk i innovats. tekhnologiy, 2012. 648 p.
4. Kostyuk, G. I. *Nanostrukturny i nanopokrytiya: perspektivy i real'nost'*: ucheb.posobiye. KH.: Nats. aerokosm. un-t «Khar'k. aviats. in-t», 2009. 406 p.
5. Kostyuk, G. I. *Nauchnyye osnovy sozdaniya sovremennykh tekhnologiy: ucheb.posobiye*. KH.: Nats. aerokosm. un-t «Khar'k. aviats. in-t», 2008. 552 p.

6. Kostyuk, G. I. *Effektivnyy rezhushchiy instrument s pokrytiyem i uprochnennym sloyem*: monogr.-sprav. KH.: Nats. aerokosm. un-t «Khar'k. aviats. in-t», 2007. 633 p.
7. Kostyuk, G. I. *Effektivnyy rezhushchiy instrument s pokrytiyem i uprochnennym sloyem*: sprav. K.: Vid-vo AINU, 2003. 412 p.
8. Grechikhin, L. I. *Fizika nanochastits i nanotekhnologiy*. M.: UP «Tekhnoprint», 2004. 397 p.
9. Aksenov, I. I. *Vakuumnaya duga v erozionnykh istochnikakh plazmy*. KH.: Izd-vo NII «KHFTI», 2005. 211 p.
10. Gusev, A. I. *Nanomaterialy, nanostruktury, nanotekhnologii*. M.: Fizmatlit, 2005. 416 p.

Надійшла (received) 22.11.2018

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Костюк Геннадій Ігорович (Костюк Геннадий Игоревич, Kostyuk Gennady Igorovich) – доктор технічних наук, професор, професор кафедри теоретичної механіки, машинознавства та роботомеханічних систем, Національний аерокосмічний університет ім. М.С. Жуковського «ХАІ», м. Харків, Україна, тел.: (057)-788-42-06, e-mail: gennadiykostyuk206@gmail.com.

Євсеєнкова Анна Володимирівна (Євсеєнкова Ганна Володимирівна, Evseenkova Anna Vladimirovna) – студент магистратури, Національний аерокосмічний університет ім. М. С. Жуковського «ХАІ», м. Харків, Україна, тел.: (057)-788-42-06, e-mail: gennadiykostyuk206@gmail.com.

М.С. СТЕПАНОВ, М.С. ИВАНОВА, Е.В. БАСОВА, С.Е. СЛИПЧЕНКО, А.В. КОТЛЯР

ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ ОТВЕРСТИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ КОМБИНИРОВАННОГО ОСЕВОГО ИНСТРУМЕНТА

Одним из способов повышения производительности обработки отверстий является обработка комбинированным осевым инструментом. Ввиду того, что такой инструмент является, как правило, специальным, его применение на производстве связано с повышенными экономическими затратами. В связи с этим рассмотрены вопросы обеспечения экономической эффективности применения комбинированного осевого инструмента по критериям: минимальной технологической себестоимости; максимальной производительности; максимального ресурса. Приведены математические зависимости, позволяющие определить экономию денежных средств от снижения затрат на изготовление и эксплуатацию инструмента; снижения технологической себестоимости обработки изделия по предложенной технологии; затрат на электроэнергию за счет сокращения затрат на силовую электроэнергию, затрат мощности на обработку, затрат электроэнергии на мощность привода подач. Отмечено, что в условиях нестабильных экономических показателей оценку экономической эффективности новой техники целесообразно проводить в рамках концепции Industry 4.0.

Ключевые слова: производительность; технологическая себестоимость; время обработки; затраты; обработка отверстий; комбинированный осевой инструмент.

М.С. СТЕПАНОВ, М.С. ИВАНОВА, Е.В. БАСОВА, С.Е. СЛИПЧЕНКО, О.В. КОТЛЯ

ТЕХНИКО-ЕКОНОМІЧНІ ПОКАЗНИКИ ЕФЕКТИВНОСТІ ТЕХНОЛОГІЇ ОБРОБКИ ОТВОРІВ З ВИКОРИСТАННЯМ КОМБІНОВАНОГО ОСЬОВОГО ІНСТРУМЕНТУ

Одним зі способів підвищення продуктивності обробки отворів є обробка комбінованим осьовим інструментом. З огляду на те, що такий інструмент є, як правило, спеціальним, його застосування на виробництві пов'язано з підвищеними економічними витратами. У зв'язку з цим розглянуто питання забезпечення економічної ефективності застосування комбінованого осьового інструменту за критеріями: мінімальної технологічної собівартості; максимальної продуктивності; максимального ресурсу. Наведено математичні залежності, що дозволяють визначити економію коштів від зниження витрат на виготовлення і експлуатацію інструменту; зниження технологічної собівартості обробки виробу за запропонованою технологією; витрат на електроенергію за рахунок скорочення витрат на силову електроенергію, витрат потужності на обробку, витрат електроенергії на потужність приводу подач. Відзначено, що в умовах нестабільних економічних показників оцінку економічної ефективності нової техніки доцільно проводити в рамках концепції Industry 4.0.

Ключевые слова: продуктивність; технологічна собівартість; час обробки; витрати; обробка отворів; комбінований осьовий інструмент.

M. STEPANOV, M. IVANOVA, YE. BASOVA, S. SLIPCHENKO, A. KOTLIAR

TECHNICAL AND ECONOMIC INDICATORS OF THE EFFICIENCY OF THE TECHNOLOGY OF HOLE-MAKING PROCESSES BY A COMBINED AXIAL TOOL

One way to improve a hole machining is machining with a combined axial tool. Due to the fact that such tool is, as a rule, a special tool, its use in production is associated with increased economic costs. In this regard, the issues of ensuring the economic efficiency of the use of the combined axial tool are considered according to the criteria: minimum technological cost; maximum productivity; maximum life time. Mathematical dependences to determine the cost savings from reducing the cost of manufacturing and operating the tool; reduce the technological cost of processing products for the proposed technology; the cost of electricity by reducing the cost of power electricity, the cost of processing power, the cost of electricity for drive power are given. It is noted that in the conditions of unstable economic indicators, it is advisable to carry out an assessment of the economic efficiency of new equipment within the framework of the concept of Industry 4.0.

Keywords: productivity; prime cost; machining time; inputs; hole machining; combined axial tool.

Введение. Высокие темпы развития техники, сокращение сроков ее эксплуатации из-за быстрого морального старения, постоянный рост конкуренции в условиях рыночной экономики требуют от производителей сокращения времени на технологическую подготовку и производство изделий, уменьшение их себестоимости с одновременным обеспечением качества. Это приводит к постоянному поиску новых технологических решений, разработке более эффективного и производительного оборудования и инструментов.

Для обоснования целесообразности внедрения новой техники или технологии выполняют технико-экономический анализ изменений в технологической системе и экономической целесообразности проектирования, производства и эксплуатации новых технологических решений [1, 2]. При этом

эффективность мероприятий по внедрению новой техники и технологий в значительной степени обусловлена точностью соответствующих расчетов, особенно в условиях технологической модернизации и высокой изменчивости рынка [3].

Кроме того, важным фактором является также обеспечение минимальных сроков окупаемости технологического оборудования, что достигается оптимальным выбором средств технологического оснащения (режущего и вспомогательного инструмента; станочных приспособлений), которые составляют относительно небольшую долю производственных затрат на новое оборудование, но в случае рационального выбора позволяют существенно повысить производительность обработки [4, 5, 6].

Применение комбинированных осевых инструментов (КОИ) при обработке отверстий,

особенно ступенчатых, является одним из способов повышения производительности.

Наибольшее развитие применения КОИ получило в 70-80-е гг. XX ст. в массовом производстве для повышения производительности за счет концентрации технологических переходов на агрегатных станках и автоматических линиях. Обычно КОИ применяют для последовательной обработки одного сквозного отверстия или ступенчатых соосных поверхностей [7, 8, 9]. Причем считается, что с уменьшением серийности экономическая эффективность применения КОИ уменьшается.

Цель работы. Разработка методики оценки и исследование технико-экономических показателей эффективности обработки отверстий с применением КОИ.

Методика оценки технико-экономических показателей. Техничко-экономическая эффективность технологии с использованием КОИ оценивается путем ее сопоставления с технологией обработки стандартным осевым инструментом, которая имеет место в действующем производстве с учетом показателей, характеризующих качество и производительность обработки, стоимость инструмента, производительность обработки и т.д.

Источниками технико-экономической эффективности применения КОИ служат: сокращение номенклатуры и количества режущего инструмента; сокращение длительности производственного процесса; повышение производительности обработки; повышение точности обработки отверстия; увеличение периода стойкости инструмента; уменьшение затрат на электроэнергию.

Повышение производительности обработки заданной номенклатуры отверстий при использовании КОИ по сравнению с обработкой набором стандартных инструментов возможно обеспечить путем уменьшения составляющих времени цикла работа станка по программе (для станков с ЧПУ); уменьшения основного времени обработки за счет совмещения переходов; интенсификации режимов резания; сокращения производственного цикла за счет совершенствования технологического маршрута заготовок и т.д.

Кроме того, применение КОИ при обработке гладкого сквозного отверстия с целью распределения общего припуска между его ступенями позволяет уменьшить суммарные силовые нагрузки на инструмент и деталь, что приводит к снижению мощности, затрачиваемой на обработку, повышению точности обработки и возможности обрабатывать менее жесткие детали.

Распределение глубины резания между ступенями КОИ также дает возможность при неизменном периоде стойкости режущего инструмента интенсифицировать режимы резания, уменьшить силу (при заданных режимах резания повышать стойкость режущего инструмента, сокращать энергетические затраты путем уменьшения мощности резания, повышать точность и улучшать качество отверстия).

Экономическими критериями эффективности применения инструмента нового качества, в нашем случае – КОИ, являются: минимальная технологическая себестоимость; максимальная производительность; максимальный ресурс.

Производительность обработки определяется через штучное время $T_{шт}$:

$$P = \frac{1}{T_{шт}} \quad (1)$$

Штучное время определяется в соответствии с формулой

$$T_{шт} = (T_{ц.а} + T_{в}) \cdot \left(1 + \frac{a_{тех} + a_{огр} + a_{отл}}{100} \right), \quad (2)$$

где $T_{ц.а}$ – время цикла автоматической работы станка, мин.; $T_{в}$ – вспомогательное время на установку и снятие детали, вспомогательное время, связанное с переходом и время на измерение обработанной поверхности, мин.; $a_{тех}, a_{огр}, a_{отл}$ – время на техническое и организационное обслуживание рабочего места, а также на отдых и личные надобности, мин.

Время цикла работы станка по программе:

$$T_{ц.а} = \sum T_o + \sum T_{м.в} \quad (3)$$

где $T_{м.в}$ – машинно-вспомогательное время, мин.; T_o – основное время обработки, мин.

Основное время обработки

$$T_o = \frac{L_{px}}{n \cdot S_o} \quad (4)$$

К машинно-вспомогательному времени относятся время на выполнение автоматических вспомогательных ходов $T_{м.в.х}$ и время на автоматическую смену инструмента $T_{м.в.см}$

$$T_{м.в} = T_{м.в.х} + T_{м.в.см} \quad (5)$$

Ресурс инструмента, выраженный в количестве заданной номенклатуры отверстий, обработанный за период стойкости

$$Q_{pu} = \frac{T}{T_o} \quad (6)$$

где T – период стойкости инструмента, мин.

Технологическая себестоимость при работе одним инструментом определяется по формуле [10].

$$C_{mex} = T_o \cdot E + \frac{T_c}{Q_{pu}} E + \frac{Z_u}{Q_{pu}}, \quad (7)$$

где T_c – время, затрачиваемое на снятие затупившегося инструмента, установку переточенного и подналадку станка, то есть время простоя станка в связи с заменой инструмента, мин; E – себестоимость 1-ой мин работы станка и станочника, грн.; Z_u – затраты, связанные с эксплуатацией инструмента за его период стойкости, грн.

Затраты, связанные с эксплуатацией инструмента за его период стойкости

$$Z_u = T_c \cdot E_n + C_{зам} + \frac{(C_{ин} - C_{отх}) \cdot K_y}{(i+1)}, \quad (8)$$

где E_n – номинальная заработная плата наладчика в 1 мин; $C_{зам}$ – стоимость заточки затупившегося инструмента, грн.; $C_{ин}$ – первоначальная стоимость инструмента, грн.; $C_{отх}$ – стоимость отходов инструмента, грн.; K_y – коэффициент, учитывающий случайную убыль инструмента; i – число переточек, допускаемых инструментом до его полуполного износа, шт.

Экономия затрат на инструмент

$$\mathcal{E}_u = \sum Z_u^{\bar{}} \cdot N_u - Z_u^H \cdot N_u, \quad (9)$$

где $Z_u^{\bar{}}$, Z_u^H – затраты на инструмент, соответственно, старого и нового наименования, грн.; N_u – необходимое количество комплектов инструментов для обработки партии деталей, шт.

Экономия от снижения технологической себестоимости

$$\mathcal{E}_c = (C_{mex}^{\bar{}} - C_{mex}^H) \cdot N_{дет}, \quad (10)$$

где $C_{mex}^{\bar{}}$, C_{mex}^H – технологическая себестоимость обработки одной детали инструментами, соответственно, старого и нового наименования, грн.;

$N_{дет}$ – количество деталей в партии, шт.

Экономия затрат на электроэнергию достигается за счет:

- уменьшения мощности резания:

$$\begin{aligned} N_{эф.p} &= f(P_o, M_{кр}) \\ P_o^{KOI} &< P_o^{cm}; \\ M_{кр}^{KOI} &< M_{кр}^{cm}; \end{aligned} \quad (11)$$

- сокращения затрат электроэнергии на перемещение и смену инструмента.

Экономия за счет снижения затрат на силовую электроэнергию

$$\mathcal{E}_э = (N_{эл}^{\bar{}} - N_{эл}^H) \cdot B_{эл}, \quad (12)$$

где $N_{эл}^{\bar{}}$, $N_{эл}^H$ – суммарные затраты мощности при обработке отверстий, соответственно, стандартным инструментом и КОИ; $B_{эл}$ – стоимость одного киловатт часа электроэнергии.

Затраты мощности, необходимой для обработки отверстий, представляют собой

$$N_{эл}^{\bar{},H} = N_{эф.p} + N_{пр.л} + N_{пер}, \quad (13)$$

где $N_{эф.p}$ – затраты на эффективную мощность резания, кВт.; $N_{пр.л}$ – затраты на мощность привода подачи, кВт.; $N_{пер}$ – затраты на перемещение инструмента, например, в инструментальном магазине или револьверной головке, кВт.

Эффективная мощность резания определяется по формуле

$$N_{эф.p} = \frac{M_{кр}^{\bar{},H} \cdot n}{9750}, \quad (14)$$

где $M_{кр}^{\bar{},H}$ – крутящий момент, Нм; n – частота вращения инструмента, об/мин.

Затраты электроэнергии на мощность привода подачи

$$N_{пр.л} = N_{рх} + N_{бх}, \quad (15)$$

где $N_{рх}$ – затраты электроэнергии на мощность привода подачи для рабочего хода; $N_{бх}$ – затраты электроэнергии на мощность привода подачи для быстрых перемещения.

Обработка результатов исследования.

Проведем технико-экономический анализ эффективности обработки заданной номенклатуры отверстий с применением КОИ для изготовления на примере детали «Крышка» (рис. 1).

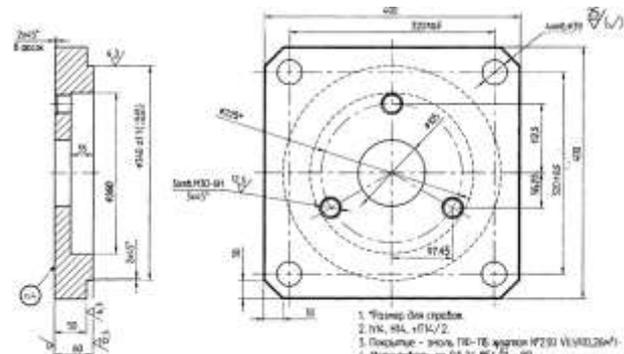
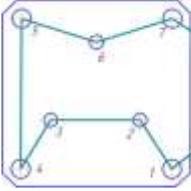
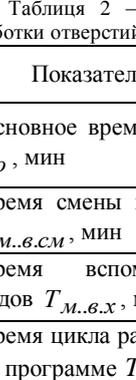
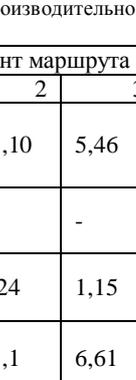


Рис. 1 – Деталь «Крышка»

Выполним сравнение трех вариантов маршрутов обработки отверстий данной детали (табл. 1):

Таблица 1 – Варианты обработки отверстий детали «Крышка»

Вариант маршрута	Содержание перехода и схема перемещений инструмента	Параметры отверстия		Параметры инструмента/ступени	
		Диаметр, мм	Длина, мм	Диаметр, мм	Длина, мм
29	 <p>Сверлить 7 отверстий Ø 29</p>	9	0	9	75
		9	5		
	 <p>Расверлить 4 отверстия Ø 39</p>	9	0	9	00
	 <p>Зенковать 3 фаски под резьбу</p>			5	65
	 <p>Обработать трехступенчатым сверлом Ø29/39</p>	9	0	9	5
				9	35
		9	5	9	5
				9	35
	 <p>Обработать трехступенчатым сверлом Ø29/39</p>	9	0	9	0
				9	70
		9	5	9	0
				9	70

- 1) последовательная обработка набором стандартных инструментов;
- 2) обработка двухступенчатым сверлом Ø29/39 с последовательной работой ступеней;
- 3) обработка двухступенчатым сверлом Ø29/39 с последовательно-параллельной работой ступеней.

Таблица 2 – Показатели повышения производительности обработки отверстий в детали «Крышка»

Показатель	Вариант маршрута		
	1	2	3
Основное время обработки T_o , мин	4,86 1,94 0,29	11,10	5,46
Время смены инструмента $T_{м.в.см}$, мин	0,06 0,06	-	-
Время вспомогательных ходов $T_{м.в.х}$, мин	2,9	1,24	1,15
Время цикла работы станка по программе $T_{ц.а}$, мин	10,11	11,1	6,61
Производительность P , мин ⁻¹	0,10	0,09	0,15

Для рассматриваемой детали и предложенных вариантов, применение КОИ с последовательной работой ступеней не позволяет повысить производительность. Это объясняется большой длиной рабочего хода. Таким образом, при проектировании маршрутной технологии обработки системы отверстий с применением КОИ с целью повышения производительности длина инструмента и, зависящая от него, длина рабочего хода являются ограничивающим фактором. Кроме того, она также влияет и на жесткость инструмента, и, как следствие, на точность обрабатываемого отверстия.

С другой стороны, следует принимать во внимание, что расходы на приобретение и обслуживание КОИ могут превышать расходы на приобретение комплекта стандартных инструментов, необходимых для обработки того же количества деталей. То есть, экономия затрат – переменная величина, зависящая от необходимого количества комплектов инструментов для обработки заданной номенклатуры отверстий, которая зависит от текущих рыночных цен. При этом, затраты на инструмент покрываются за счет экономии затрат на электроэнергию и снижения технологической себестоимости обработки.

Экономия затрат на электроэнергию зависит от технических характеристик электродвигателей, применяемых в конкретном металлорежущем станке и стоимости электроэнергии.

Вывод. Экономическая эффективность применения КОИ зависит от технологической себестоимости обработки, затрат на изготовления и эксплуатацию инструмента, затрат на потребляемую электроэнергию. Причем, т.к. эти величины напрямую зависят от текущих рыночных цен на материал, инструмент, электроэнергию и т.п, то величина экономической эффективности применения нового инструмента не постоянна во времени, и может

стремительно меняться. В связи с этим целесообразно сокращать время, затрачиваемое на технологическую подготовку производства, сокращать сроки выполнения технического задания, а также искать пути ускорения выполнения оценки технико-экономических показателей, например, за счет разработки соответствующего программного обеспечения, позволяющего выполнять расчеты в режиме реального времени. Что может быть реализовано в рамках концепции Industry 4.0, JavaMashCluster.

Список литературы

1. Макаренко С. И. Технично-економический анализ целесообразности внедрения новых технологических решений. *Системы управления, связи и безопасности*. №1. 2016. С. 278 – 287.
2. Гончаров, В. В. *Адаптация промышленных предприятий к научно-техническим новшествам*. Киев: Техника, 1992. 132 с
3. Зиядуллаев Н.С., Попов Р.А. Оценка эффективности научно-технических новаций в промышленности и капитальном строительстве в условиях волатильности экономической среды. *Экономика строительства*. № 4 (34). 2015. С. 17-23.
4. Карпусь В.Е. Иванова М.С., Котляр А.В. Влияние технологической оснастки на производительность механообработки. *Вісник СевНТУ. Вип. 107: Машиноприладобудування та транспорт: зб. наук. пр. Севастополь: Вид-во СевНТУ, 2010. С. 87 – 90.*
5. Карпусь В. Е., Котляр А. В. Система критериев оценки технологических решений. *Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут"*. Харків : НТУ «ХПИ». 2008. № 23. С. 79–86.
6. Иноземцев Г.Г. *Проектирование металлорежущих инструментов: Учебн. пособие для вузов по специальности «Технология машиностроения, металлорежущие станки и инструменты»*. М.: Машиностроение. 1984. 272 с.
7. Кожевников Д.В., Гречишников В.А., Кирсанов С.В., Кокарев В.И., Схиртладзе А.Г. *Режущий инструмент: Учебник для вузов*. М.: Машиностроение. 2005. 528 с.
8. Родин П.Р. *Металлорежущие инструменты*. К.: Издательское объединение «Вища школа». 1974. 399 с.
9. Бобров В. Ф. *Основы теории резания металлов* М.: Машиностроение. 1975. – 344 с.
10. Карпусь В.Е. Миненко Д.А., Фуников А.А. Выбор режимов максимальной производительности обработки на многоцелевых

станках. *Вісник НТУ «ХПИ»*. Харків: НТУ «ХПИ». 2006. №18. С. 107 – 115.

References (transliterated)

1. Makarenko S. I. Tehniko-ekonomicheskij analiz celesoobraznosti vnedrenija novyh tehnologicheskikh reshenij. [Technical and economic analysis of the feasibility of introducing new technological solutions]. *Sistemy upravlenija, svjazi i bezopasnosti*. №1. 2016. pp. 278 – 287.
2. Goncharov, V. V. *Adaptacija promyshlennyh predpriyatij k nauchno-tehnicheskim novshestvam*. [Adaptation of industrial enterprises to scientific and technical innovations]. Kiev: Tehnika, 1992. 132 p.
3. Zijadullaev N.S., Popov R.A. Ocenka jeffektivnosti nauchno-tehnicheskikh novacij v promyshlennosti i kapital'nom stroitel'stve v uslovijah volatil'nosti jekonomicheskoy sredy. [Evaluation of the effectiveness of scientific and technical innovations in industry and capital construction in the context of the volatility of the economic environment]. *Ekonomika stroitel'stva*. № 4 (34). 2015. pp. 17-23.
4. Karpus' V.E. Ivanova M.S., Kotljars' A.V. Vlijanie tehnologicheskij osnastki na proizvoditel'nost' mehanooobrabotki. [The impact of tooling on the performance of machining]. *Visnik SevNTU. Vip. 107: Mashinoprikladobuduvannja ta transport: zb. nauk. pr. Sevastopol': Vid-vo SevNTU, 2010. pp. 87 – 90.*
5. Karpus' V. E., Kotljars' A. V. Sistema kriteriev ocenki tehnologicheskikh reshenij. [The system of criteria for evaluating technological solutions]. *Visnyk Nacional'nogo tehničnogo universitetu "Kharkivs'kij politehničnij instytut"*. Kharkiv : NTU «HPI». 2008. № 23. pp. 79–86.
6. Inozemcev G.G. *Proektirovanie metallorезhushchih instrumentov: Uchebn. posobie dlja vtuzov po special'nosti «Tehnologija mashinostroenija, metallorезhushchie stanki i instrumenty»*. [Design of metal-cutting tools]. М.: Mashinostroenie. 1984. 272 p.
7. Kozhevnikov D.V., Grechishnikov V.A., Kirsanov S.V., Kokarev V.I., Shirladze A.G. *Rezhushchij instrument: Uchebnik dlja vuzov.* [Cutting tool] М.: Mashinostroenie. 2005. 528 p.
8. Rodin P.R. *Metallorезhushchije instrumenty*. [Metal-cutting tools]. К.: Izdatel'skoe ob'edinenie «Vishha shkola». 1974. 399 p.
9. Bobrov V. F. *Osnovy teorii rezanija metallov*. [Fundamentals of the theory of cutting metals]. М.: Mashinostroenie. 1975. – 344 p.
10. Karpus' V.E. Minenko D.A., Funikov A.A. *Vybor rezhimov maksimal'noj proizvoditel'nosti obrabotki na mnogocelevykh stankah.* [Selection of modes for maximum processing performance on multi-purpose machines]. *Visnik NTU «HPI»*. Harkiv: NTU «HPI». 2006. №18. pp. 107 – 115.

Поступила (received) 23.11.2018

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Степанов Михайло Сергійович (Степанов Михаил Сергеевич, Mykhailo Stepanov) – доктор технічних наук, професор. професор кафедри технологія машинобудування і металорізальні верстати Національного технічного університету «Харківський політехнічний університет», м. Харків; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2224-6509>; тел.: (057) 720-66-25.

Іванова Марина Сергіївна (Іванова Марина Сергеевна, Maryna Ivanova) – кандидат технічних наук, доц. кафедри Технології машиностроєння і металорезущих станків, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», г. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0848-6805>; тел.: (057) 720-66-25; e-mail: ivanovamaryna1@gmail.com.

Басова Євгенія Володимирівна (Басова Евгения Владимировна, Yevheniia Basova) – кандидат технічних наук, доц. кафедри Технології машиностроєння і металорезущих станків, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», г. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8549-4788>; тел.: (057) 720-66-25; e-mail: e.v.basova.khpi@gmail.com.

Сліпченко Сергій Євгенович (Слипченко Сергей Евгеньевич, Slipchenko Serhii Yevgenovych) – старший викладач Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; тел.: (057)-720-66-25, м. Харків, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0593-3750>, e-mail: serg.slip@gmail.com.

Котляр Олексій Віталійович (Котляр Алексей Витальевич, Alexey Kotliar) – кандидат технічних наук, доц. кафедри Технології машиностроєння і металорезущих станків, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», г. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7664-0395>, (057) 720-66-25; e-mail: Alexeykotliar@gmail.com.

А.Н. ШЕЛКОВОЙ, А.А. ПЕРМЯКОВ, А.А. КЛОЧКО, Е.В. БАСОВА, Е.В. ПЕРМИНОВ

ГЛОБАЛЬНЫЙ МЕТОД ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ И КОНИЧЕСКИХ ЗУБЧАТЫХ ПЕРЕДАЧ

Недостатком существующих цилиндрических и конических зубчатых передач является отсутствие полного взаимного контактирования всех зубьев друг с другом. Каждый зуб шестерни входит в контакт или контактирует только с одним и тем же зубом колеса или с группой одних и тех же зубьев зацепляемого зубчатого колеса в определенной последовательности. В процессе приработки и эксплуатации все погрешности, отклонения зуба шестерни будут проявляться при контактировании с погрешностями и отклонениями с сопрягаемым зубом колеса. Возникает циклическая составляющая динамической нагрузки и как следствие: повышенный шум, вибрации. С целью снижения негативных факторов необходимо повышать степень точности цилиндрических зубчатых передач, что значительно увеличивает затраты на их изготовление и не снимает полностью вопросы снижения шума, вибраций, плавности зацепления. В результате исследования эксплуатационных характеристик зубчатых зацеплений предложена методика расчёта повышения износостойкости, долговечности и повышения плавности работы за счёт создания и прогнозирования определённых передаточных чисел, которые определяют некрatность зацепления и обеспечивают работу зубьев ведущего зубчатого колеса со всеми зубьями ведомого зубчатого колеса. Для уменьшения образования микропиттинга, необходимо использовать зубчатые пары с некрatным передаточным отношением, что будет обеспечивать участие всех зубьев в работе и, как следствие, равномерное изнашивание, а также выбрать смазочный материал, предназначенный для предотвращения микропиттинга. Некратность зубчатого зацепления характеризуется контактированием каждого зуба шестерни с каждым зубом зацепляемого зубчатого колеса в определенной последовательности и обеспечивает ускоренную равномерную прирабатываемость сопрягаемых зубчатых колес, исправление дефектов при изготовлении и сборки зубчатых передач, уменьшение вибраций, шума, повышение износостойкости и повышения плавности работы зубчатых колес, долговечности.

Ключевые слова: глобальный метод, эффективность, эксплуатация, цилиндрические и конические колеса, зубчатые передачи, полное контактирование всех зубьев друг с другом, уменьшение образования микропиттинга, исправление дефектов при изготовлении и сборки зубчатых передач, уменьшение вибраций, шума, повышение износостойкости, плавности, долговечности зубчатых колес.

О.М. ШЕЛКОВИЙ, О.А. ПЕРМЯКОВ, О.О. КЛОЧКО, Є.В. БАСОВА, Є.В. ПЕРМІНОВ ГЛОБАЛЬНИЙ МЕТОД ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ЦИЛИНДРИЧНИХ І КОНИЧНИХ ЗУБЧАСТИХ ПЕРЕДАЧ

Недоліком існуючих циліндричних і конічних зубчастих передач є відсутність повної взаємної контактування всіх зубів один з одним. Кожен зуб шестерні входить в контакт або контактує тільки з одним і тим же зубом колеса або з груп-співай одних і тих же зубів зачіпляються зубчастого колеса в певній послідовності. В процесі підробітки і експлуатації всі похибки, відхилення зуба шестерні будуть проявлятися при контактуванні з похибками і відхиленнями з сполучаються зубом колеса. Виникає циклічна складова динамічного навантаження і як наслідок: підвищений шум, вібрації. З метою зниження негативних факторів необхідно підвищувати ступінь точності циліндричних зубчастих передач, що значно збільшує витрати на їх виготовлення і не знімає повністю питання зниження шуму, вібрацій, плавності зацеплення. В результаті дослідження експлуатаційно-ційних характеристик зубчастих зачеплень запропонована методика розрахунку підвищення зносостійкості, довговічності і підвищення плавності роботи за рахунок створення і прогнозування певних передавальних чисел, які визначають некрatними зачеплення і забезпечують роботу зубів ведучого зубчастого колеса з усіма зубами веденого зубчастого колеса. Для зменшення освіти мікро-пінтінга, необхідно використовувати зубчасті пари з некрatними передавальним відношенням, що буде забезпечувати участь усіх зубів в роботі і, як наслідок, рівномірне зношування, а також вибрати мастильний матеріал, призначений для запобігання мікропінтінга. Некратними зубчастого зачеплення характеризується контактуванням кожного зуба шестерні з кожним зубом зачіпляються зубчастого колеса в певній послідовності і забезпечує прискорену рівномірну прирабатываемость сполучених зубчастих коліс, виправлення дефектів при виготовленні і збірці зубчастих передач, зменшення вібрацій, шуму, підвищення зносостійкості і підвищення плавності роботи зубчастих коліс, довговічності.

Ключові слова: глобальний метод, ефективність, експлуатація, циліндричні і конічні колеса, зубчасті передачі, повне контактування усіх зубів один з одним, зменшення освіти мікропінтінга, виправлення дефектів при виготовленні і збірці зубчастих передач, зменшення вібрацій, шуму, підвищення зносостійкості, плавності, довговічності зубчастих коліс.

A.N. SHELKOVY, A.A. PERMYAKOV, A.A. KLOCHKO, Ye. BASOVA, E.V. PERMINOV GLOBAL METHOD TO IMPROVE OPERATIONAL EFFICIENCY CYLINDRICAL AND CONICAL GEARS

The disadvantage of the existing cylindrical and bevel gears is the absence of complete mutual contact of all teeth with each other. Each gear tooth comes into contact or comes into contact only with the same tooth of the wheel or with the group of the same teeth of the gear wheel a certain sequence. In the process of running-in and operation all the errors, deviations of the gear tooth will appear when contacted with errors and deviations with the mating tooth of the wheel. There is a cyclic component of the dynamic load and as a consequence: increased noise, vibration. In order to reduce negative factors, it is necessary to increase the degree of accuracy of cylindrical gears, which significantly increases the cost of their manufacture and does not completely eliminate the issues of noise reduction, vibration, and smoothness of engagement. As a result of the study of the operational characteristics of gearing, a method was proposed for calculating the increase in wear resistance, durability and increase smoothness of work by creating and predicting certain gear ratios that determine the non-multiplicity of engagement and ensure the operation of the teeth of the driving gear with all the teeth of the driven gear. To reduce the formation of micro-pitting, it is necessary to use gear pairs with a non-multiple gear ratio, which will ensure the participation of all teeth in the work and, as a result, uniform wear, as well as choose a lubricant designed to prevent micropitting. Incomplete gearing is characterized by contacting each gear tooth with each tooth of the gear wheel in sequence and ensures accelerated uniform workability of the mating gears, correction of defects in the manufacture and assembly of gears, reduction of vibrations, noise, increased wear resistance and improved smoothness of gears, durability.

Key words: global method, efficiency, operation, cylindrical and bevel wheels, gears, full contact of all teeth with each other, reduction of micro-molding, correction of defects in the manufacture and assembly of gears, reduction of vibrations, noise, increased durability, smoothness, durability of gear wheels.

© А.Н. Шелковой, А.А. Пермяков, А.А. Клочко, Е.В. Басова, Е.В. Перминов, 2018

Введение. В машиностроении и станкостроении принято малое зубчатое колесо называть шестерней, а большое – колесом. Зубчатые колёса обычно используются парами с разным числом зубьев с целью преобразования вращающего момента и числа оборотов валов на входе и выходе. Колесо, к которому вращающий момент подводится извне, называется ведущим, а колесо, с которого момент снимается – ведомым [1, 2]. Если диаметр ведущего колеса меньше, то вращающий момент ведомого колеса увеличивается за счёт пропорционального уменьшения скорости вращения, и наоборот. В соответствии с передаточным отношением, увеличение крутящего момента будет вызывать пропорциональное уменьшение угловой скорости вращения ведомой шестерни, а их произведение – механическая мощность – останется неизменным. Данное соотношение справедливо лишь для идеального случая, не учитывающего потери на трение и другие эффекты, характерные для реальных устройств.

Анализ последних исследований и публикаций. Недостатком существующего зубчатого зацепления есть то, что каждый зуб шестерни входит в контакт или контактирует только с одним и тем же зубом колеса или с группой одних и тех же зубьев зацепляемого зубчатого колеса в определенной последовательности.

Например: зубчатая передача с $i=1.0$, число зубьев $z_{1,2}=20/20$, каждый зуб шестерни будет контактировать только с одним зубом колеса

В процессе приработки и эксплуатации все погрешности, отклонения зуба шестерни будут проявляться при контактировании с погрешностями и отклонениями с сопрягаемым зубом колеса [2, 3, 4]. Возникает циклическая составляющая динамической нагрузки и как следствие: повышенный шум, вибрации.

Цель исследования. С целью снижения негативных факторов необходимо повышать степень точности цилиндрических зубчатых передач, что значительно увеличивает затраты на их изготовление и не снимает полностью вопросы снижения шума, вибраций, плавности зацепления.

Посредством изучения основных геометрических и кинематических параметров скоростных и высокоточных зубчатых передач установлено, что зубчатые колеса подвергаются неравномерному изнашиванию (рис. 1), вследствие чего имеют низкую плавность и долговечность.

При больших скоростях скольжения возможность заедания определяется соотношением времени, необходимого для взаимодействия смазочной среды с микроучастками чистого металла, и среднего времени прохождения микроучастков, одновременно обнажаемых на поверхности трения, между последовательными актами их контактирования с микроучастками сопряженной поверхности [5, 7]. Поэтому превышение критических для конкретного случая тяжело нагруженного контакта значений нагрузки, скорости или температуры всегда вызывает недопустимо интенсивное изнашивание и заедание из-за отсутствия равномерного износа.

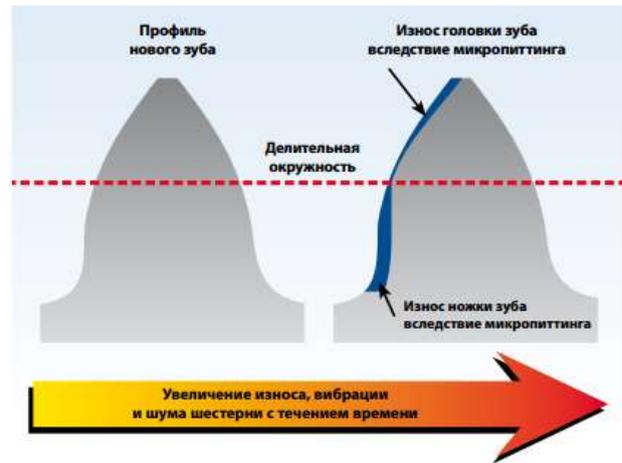


Рис. 1 – Прогрессирование неравномерности износа зуба шестерни вследствие микропиттинга из-за увеличенной вибрации и шума

Основным объектом исследования избрали цилиндрические и конические зубчатые пары средних типоразмеров (рис.2), т.к. это наиболее массовый вид высших кинематических пар.



а



б

Рис. 2 – Эвольвентные зубчатые пары: а – цилиндрические; б – конические

Анализ основных видов отказов зубчатых колес. Разрушения зубчатых колес зачастую происходят в связи с неравномерным изнашиванием зубьев вследствие применения стандартных передаточных отношений. Для обеспечения долговечности, повышения

износостойкости и повышения плавности работы зубчатых колес необходимо создать такие условия их контактирования, при которых каждый зуб ведущего колеса в процессе работы входил бы в зацепление с каждым зубом ведомого колеса в определенной последовательности.

После изучения материалов (табл. 1), применяемых для изготовления зубчатых колес ответственных узлов машин и станков было выявлено, что для обеспечения стабильной работы зубчатых пар необходимо при изготовлении зубчатых колес использовать стали с твердостью рабочих поверхностей $HB \geq 350$ [1, 8, 10].

Стали с такой твердостью обеспечивают высокую приработку зубьев, в результате чего погрешности, допущенные при нарезании зубьев и сборке передачи, частично устраняются в процессе равномерной приработки, что невозможно достичь кратным числом зубчатых передач.

Изложение основного материала. Т.к. зубчатые колеса имеют передаточные числа с кратностью целых чисел, то на высоких окружных скоростях определённые группы зубьев ведущего колеса контактируют только с определёнными группами зубьев зацепляемого ведомого колеса. В силу технологических причин, зубчатые колеса имеют отклонения от параметров точности, эти погрешности передаются на сопрягаемые ведомые зубчатые колеса с определённым циклом вращения, который соответствует передаточному числу. Погрешности не распространяются на остальные зубья, т.е. группа зубьев ведущего колеса постоянно зацепляется с определённым количеством зубьев ведомого колеса. Такое зацепление зубчатых колёс создаёт

неравномерный износ всех зубьев (рис. 3) и вызывает увеличение динамических нагрузок, связанных со снижением плавности и повышением шумовых характеристик, что в конечном итоге приводит к созданию микротрещин, макротрещин и к отказам зубчатых колёс [3, 10].

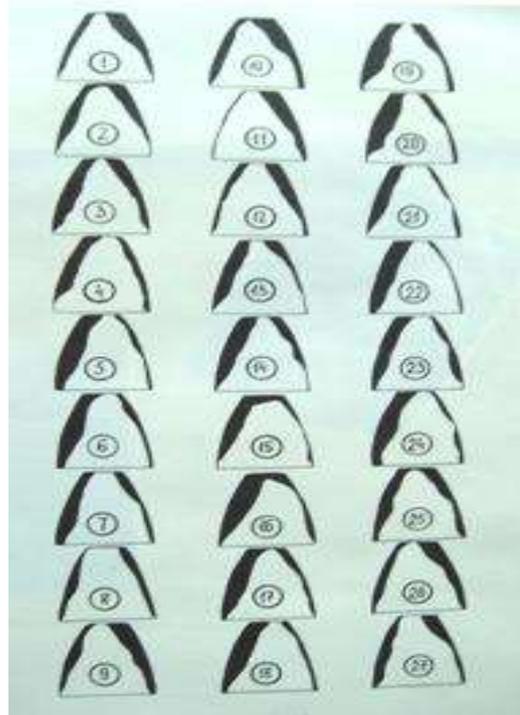


Рис. 3 – Профили изношенных зубьев передачи с передаточным отношением $u = 2$

Таблица 1 – Механические свойства наиболее часто употребляемых сталей для производства высокоскоростных зубчатых колес

Марка стали	Диаметр заготовки, мм	Ширина заготовки, мм	Термическая обработка	σ_b	σ_m	HB	HRC
20X	600	160	Цементация и закалка	800	650	200–220	58
38ХМЮА	900	230	Азотирование с предварительной закалкой	1000	850	280	60
38ХВФ10	800	160	Двухступенчатое азотирование с предварительной закалкой	1000	850	280	62
12ХН3	500	100	Цементация с закалкой	800 900	850	280	58–63
20ХН3	650	130	Цементация с закалкой	800 900	850	280	58–63
18Х2Н4ВА	850	160	Цементация с закалкой	1400	1200	300	58–63
12ХН3А	460	160	Цементация с закалкой	920	700	250	56–63

В результате исследования была предложена методика расчёта повышения износостойкости, долговечности и повышения плавности работы за счёт создания и прогнозирования определённых передаточных чисел, которые определяют некратность зацепления и обеспечивают работу зубьев ведущего зубчатого колеса со всеми зубьями ведомого зубчатого колеса [7, 11].

1. Определяется по максимально допустимому (принятому) числу зубьев колеса Z_{kmax} и минимальному допустимому (принятому) числу зубьев шестерни Z_{shmin} , передаточному отношению $i > 1$ и допустимой погрешности передаточного отношения ω , обеспечивающих все множество допустимых сочетаний передачи массив Z .

$$Z_{kmax} := 100 \quad Z_{shmin} := 12 \quad \omega := 0.05 \quad j := 2.5$$

```
Z(Zkmax, Zshmin, j, ω) :=
  i ← 0
  Zk ← Zkmax
  Zshi ← floor( Zk / j )
  Zsha ← ceil( Zk / (j * (1 - ω)) )
  Zi,0 ← Zk
  Zi,1 ← Zshi
  Zi,2 ← Zi,0 / Zi,1
  Zi,3 ← j * (1 - ω)
  Zi,4 ← j
  Za ← Zi,1
  while Zshi ≥ Zshmin
    while Za < Zsha
      if Zk / Za ≤ j
        i ← i + 1
        Zi,0 ← Zk
        Zi,1 ← Za
        Zi,2 ← Zi,0 / Zi,1
        Zi,3 ← j * (1 - ω)
        Zi,4 ← j
        Za ← Za + 1
      Zk ← Zk - 1
    Zshi ← floor( Zk / j )
    Zsha ← ceil( Zk / (j * (1 - ω)) )
    Za ← Zshi
  Z
```

2. Для каждой строки массива Z определяются номера зубьев колеса (массива S_{ovp}), которые встретятся с 1 зубом шестерни в процессе их обката S_{ovp} .

$$Z(Zkmax, Zshmin, j, \omega) =$$

	0	1	2	3	4
0	100	40	2.5	2.375	2.5
1	100	40	2.5	2.375	2.5
2	100	41	2.439	2.375	2.5
3	100	42	2.381	2.375	2.5
4	99	40	2.475	2.375	2.5
5	99	41	2.415	2.375	2.5
6	98	40	2.45	2.375	2.5
7	98	41	2.39	2.375	2.5
8	97	39	2.487	2.375	2.5
9	97	40	2.425	2.375	2.5
10	96	39	2.462	2.375	2.5
11	96	40	2.4	2.375	2.5
12	95	38	2.5	2.375	2.5
13	95	39	2.436	2.375	2.5
14	94	38	2.474	2.375	2.5
15	94	39	2.41	2.375	2.5
16	93	38	2.447	2.375	2.5
17	93	39	2.385	2.375	2.5
18	92	37	2.486	2.375	2.5
19	92	38	2.421	2.375	2.5
20	91	37	2.459	2.375	2.5
21	91	38	2.395	2.375	2.5
22	90	36	2.5	2.375	2.5
23	90	37	2.432	2.375	2.5
24	89	36	2.472	2.375	2.5
25	89	37	2.405	2.375	2.5
26	88	36	2.444	2.375	2.5
27	88	37	2.378	2.375	2.5
28	87	35	2.486	2.375	2.5
29	87	36	2.417	2.375	2.5
30	86	35	2.457	2.375	2.5
31	86	36	2.389	2.375	2.5
32	85	34	2.5	2.375	2.5
33	85	35	2.429	2.375	2.5
34	84	34	2.471	2.375	2.5
35	84	35	2.4	2.375	...

3. Команда выхода, проверка заканчивается тогда, когда возникает цикличность вступления зубьев в контакт либо когда количество строк в массиве становится больше количества зубьев шестерни, т.е. все зубья шестерни гарантированно не встретятся с контактировавшими до этого зубьями колеса $brak$.

4. Все множество допустимых сочетаний передач, обеспечивающих передаточное отношение в этом массиве массив Z ; массив – для каждой строки массива Z определяются номера зубьев колеса (массива S_{ovp}), которые встретятся с 1 зубом шестерни в процессе их обката S_{ovp} .

5. Вычисляется коэффициент неповторения контакта зубьев – отношение номера строки после которой произошло повторение к количеству зубьев шестерни.

6. Определяется ранжирование массива Z – определяется по погрешности передаточного отношения и коэффициента неповторения контаката зубьев; $S_{ovp}(Z_k, Z_{sh})$ – погрешность передаточного отношения; $Z(Z_{kmax}, Z_{shmin}, j, \omega)$ – максимальная погрешность передаточного отношения; $Z1 := csoit(Z(Z_{kmax}, Z_{shmin}, j, \omega)2)$ – сортировка передаточного отношения массива Z для различных значений Z_k и Z_{sh} при заданной допустимой погрешности передаточного отношения ω :

```

Zk := 100  Zsh := 40
Sovp(Zk, Zsh) :=
  j ← 1
  i ← 1
  m1 ← 1
  Zk1 ← Zk
  for i e 1..Zk1
    j ← j + Zsh
    j ← j - Zk1 if j > Zk1
    flag ← 0
    for k e 1..i
      if mk = j
        flag ← 1
        break
    break if i ≥ Zsh ∨ flag = 1
    i ← i + 1
    m1 ← j
  i ← i + 1
  m0 ←  $\frac{i-1}{Zsh}$ 
  m
  
```

Sovp(Zk, Zsh) =

0.125
1
41
81
21
61

```

Z(Zkmax, Zshmin, j, ω) :=
  i ← 0
  Zk ← Zkmax
  Zshi ← floor( $\frac{Zk}{j}$ )
  Zsha ← ceil( $\frac{Zk}{j \cdot (1 - \omega)}$ )
  Za ← Zshi
  while Zshi ≥ Zshmin
    while Za < Zsha
      if  $\frac{Zk}{Za} \leq j \wedge Sovp(Zk, Za)_0 = 1$ 
        Zi,4 ← j
        Zi,0 ← Zk
        Zi,1 ← Za
        Zi,2 ←  $\frac{Z_{i,0}}{Z_{i,1}}$ 
        Zi,3 ← j · (1 - ω)
        i ← i + 1
        Za ← Za + 1
      Zk ← Zk - 1
      Zshi ← floor( $\frac{Zk}{j}$ )
      Zsha ← ceil( $\frac{Zk}{j \cdot (1 - \omega)}$ )
      Za ← Zshi
  Z
  
```

Z(Z_{kmax}, Z_{shmin}, j, ω) =

	0	1	2	3	4
0	10	41	2,439	2,375	2.5
1	10	42	2,381	2,375	2.5
2	99	40	2,475	2,375	2.5
3	99	41	2,415	2,375	2.5
4	98	40	2,45	2,375	2.5
5	98	41	2,39	2,375	2.5
6	97	39	2,487	2,375	2.5
7	97	40	2,425	2,375	2.5
8	95	39;	2,438	2,375	2.5
9	94	33	2,474	2,375	2.5
10	94	39	2,41	2,375	2.5
11	93	38	2,475	2,375	2.5
12	92	37	2,475	2,375	2.5
13	92	38	2,447	2,375	2.5
14	91	37	2,475	2,375	2.5
15	91	33	2,475	2,375	2.5

Z1 := csort (Z (Z_{kmax}, Z_{shmin}, j, ω), 2)
 тогда Z1 =

	0	1	2	3	4
7	84	34	2,471	2,375	2.5
8	42	17	2,471	2,375	2.5
9	89	36	2,472	2,375	2.5
10	47	19	2,474	2,375	2.5
11	94	33;	2,474	2,375	2.5
12	99	40	2,475	2,375	2.5
13	52	21	2,476	2,375	2.5
14	57	23	2,478	2,375	2.5
15	62	25	2,48	2,375	2.5
16	67	27	2,481	2,375	2.5
17	72	29	2,483	2,375	2.5
18	77	31	2,484	2,375	2.5
19	82	33;	2,485	2,375/	2.5
20	87	35	2,486	2,375	2.5
21	92	37	2,486	2,375	2.5
22	97	39	2,487	2,375	2.5

Для разъяснения алгоритма расчёта повышения износостойкости, долговечности и повышения плавности работы за счёт создания и прогнозирования передаточных чисел, которые определяют некратность зацепления и обеспечивают последовательность зацепления зубьев ведущего зубчатого колеса со всеми зубьями ведомого зубчатого колеса приведем расшифровки всех обозначений: Z_k – число зубьев колеса; Z_{kmax} – максимальное допустимое (принятое) число зубьев колеса; Z_{sh} – число зубьев шестерни; Z_{shmin} – минимальное допустимое (принятое) число зубьев шестерни; j ≥ 1 – текущее число зубьев колеса; m_i, i – текущее число зубьев шестерни; ω – допустимая погрешность передаточного отношения ; m₀ – первоначальное число зубьев колеса; m_k – сохраняемое число зубьев колеса; flag – обозначение, стремящееся к равенству команды о том, что найдено передаточное отношение; break – команда выхода, проверка заканчивается тогда, когда возникает цикличность вступления зубьев в контакт либо когда количество строк в массиве становится больше количества зубьев

шестерни, т.е. все зубья шестерни гарантированно не встретятся с контактировавшими до этого зубьями колеса; *массив Z* – все множество допустимых сочетаний передач, обеспечивающих передаточное отношение в этом массиве; *массив S_{овр}* – для каждой строки массива *Z* определяются номера зубьев колеса (массива *S_{овр}*), которые встретятся с 1 зубом шестерни в процессе их обката; коэффициент неповторения контакта зубьев – отношение номера строки после которой произошло повторение к количеству зубьев шестерни; ранжирование массива *Z* – определяется по погрешности передаточного отношения и коэффициента неповторения контакта зубьев; *S_{овр}(Z_k, Z_{sh})* – погрешность передаточного отношения; *Z(Z_{kmax}, Z_{shmin}, j, ω)* – массив передаточных отношений для всех передач от *Z_{kmax}, Z_{shmin}* до *Z_{kmin}, Z_{shmax}*, обеспечивающих значение передаточного отношения *j* с максимальной заданной погрешностью ω ; *Z1:=csoit(Z(Z_{kmax}, Z_{shmin}, j, ω)2)* – сортировка передаточного отношения массива *Z* для различных значений *Z_k* и *Z_{sh}* при заданной допустимой погрешности передаточного отношения ω ; *i* – счетчик текущего элемента массива зубьев шестерен; *Z_{shi}* – текущее значение числа зубьев шестерни в диапазоне от мин. к макс.; *Z_a* – текущее сохраненное число зубьев шестерни, удовлетворяющее *j* и ω при заданном *Z_k*; *Z_{sha}* – сохраненное число зубьев при котором достигается минимальная погрешность ω при заданных *j*; *Z_{i,0}* – изменяющееся число зубьев шестерни; *Z_{i,1}* – изменяющееся число зубьев шестерни; *Z_{i,2}* – изменяющееся число зубьев шестерни; *Z_{i,3}* – изменяющееся число зубьев шестерни; *Z_{i,4}* – изменяющееся число зубьев шестерни. Номера столбцов в таблицах: 1 столбец – номер по порядку; 2 столбец – изменяющееся число зубьев колеса; 3 столбец – изменяющееся число зубьев шестерни; 4 столбец – фактическое передаточное число; 5 столбец – минимальное передаточное число; 6 столбец – максимальное передаточное число.

Исследуя основные виды отказов зубчатых колес, выяснили, что для обеспечения долговечности, повышения износостойкости и повышения плавности работы зубчатых колес необходимо создать такие условия их контактирования, при которых каждый зуб ведущего колеса в процессе работы входил бы в зацепление с каждым зубом ведомого колеса в определенной последовательности (рис. 4) [7, 9].

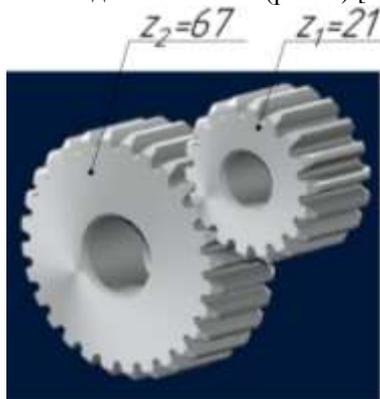


Рис. 4 – Профили изношенных зубьев передачи с передаточным отношением

При кратном зубчатом зацеплении (когда в

передаче крутящего момента участвуют только определенные пары зубьев) очень часто возникает микропиттинг поверхностей зубчатых колес (рис. 5). Микропиттинг – это явление поверхностной усталости, в основном наблюдающееся на контактирующих поверхностях зубьев шестерен. Микропиттинг приводит к разрушающему износу, который может начаться уже в первые несколько часов работы.

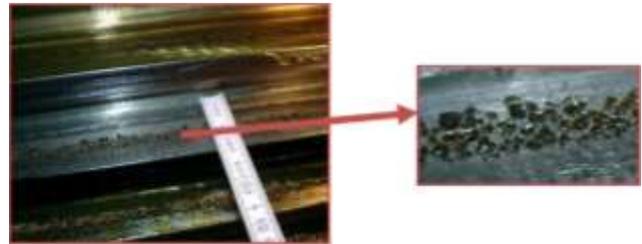
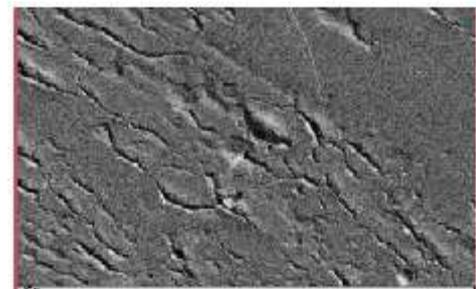
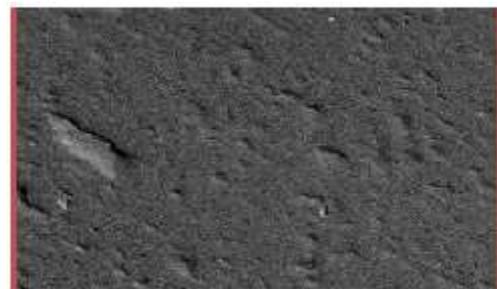


Рис. 5 – Кратные зубчатые колеса, поврежденные микропиттингом

Для того, чтобы избежать образования микропиттинга, необходимо использовать зубчатые пары с некрatным передаточным отношением, что будет обеспечивать участие всех зубьев в работе и, как следствие, равномерное изнашивание, а также выбрать смазочный материал, предназначенный для предотвращения микропиттинга (рис. 6).



а



б

Рис. 6 – Контактная поверхность зубчатых колес, подверженных питтингу, привода главного движения: а – с кратным передаточным отношением; б – после замены на некрatную пару

На рис. 6, б показан результат внедрения зубчатой пары с некрatным зацеплением, срок службы которой на момент исследования составил 12 месяцев. Как можно заметить, микропиттинг распространяется с гораздо меньшей скоростью, чем при кратном зацеплении. В следствие чего обеспечивается также и высокая плавность зацепления, т. к. контактирующие

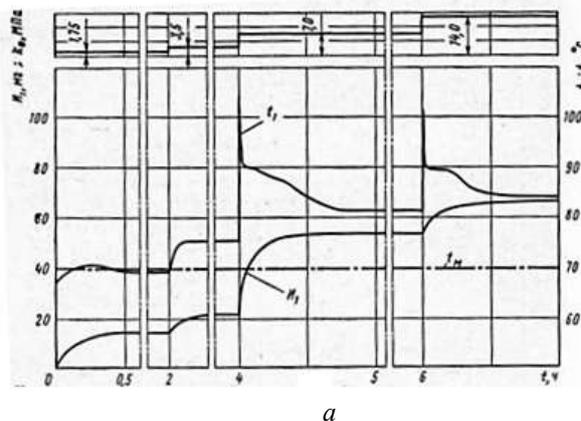
поверхности зубьев изнашиваются меньше благодаря равномерному распределению нагрузки.

Испытания зубчатых пар с некротным зацеплением в условиях кратковременных перегрузок (рис. 7) особенно ярко продемонстрировали исключительную роль первых минут работы или первых циклов нагружения неприработанных зубчатых колес (при замене кратных колес на некротные), в течение которых реализуется подавляющая доля приработочного износа и устанавливается характерная шероховатость рабочих поверхностей зубьев.

Шестерни и колеса зубчатых пар были изготовлены из стали 12ХНЗА с цементованными на глубину 0,8—1,2 мм и закаленными зубьями, твердость рабочих поверхностей зубьев шестерен после объемной закалки HRC 52—58, колес после закалки с нагревом т. в. ч. HRC 50—55. Профиль головки зубьев модифицирован согласно ГОСТ 13755—81: глубина модификации зубьев шестерен 0,02 мм, колес 0,05 мм. После шлифования точность зубчатых колес соответствовала степеням 6 и 7 по ГОСТ 1643—81, шероховатость – 7-му классу по ГОСТ 2789—73, $Ra = 0,8 \dots 1,2$ мкм. Длительность каждой перегрузки $t_{II} = 18$ с близка к граничной, ниже которой рекомендуется [1] исключать перегрузки из расчета.

Поскольку в течение действия первых перегрузок реализуется 80—90% приработочного износа, а после пяти—семи перегрузок отделение металла прекращается, такие режимы можно использовать для ускорения приработки (обкатки) новых редукторов. Роль кратковременных перегрузок в условиях проведенных испытаний оказалась благоприятной с точки зрения результативности приработочного изнашивания зубьев. Благодаря их действию уже в течение первых 300—600 оборотов шестерен изнашивались участки рабочих поверхностей зубьев с локальной концентрацией нагрузки, вызванной погрешностями их формы или кромочным контактированием. Быстрое сглаживание рабочих поверхностей обеспечивало установление безыносного режима работы при меньшей величине приработочного износа, по сравнению со случаем действия постоянной нагрузки того же уровня.

Спроектирована некротная зубчатая передача с



передаточным отношением $u=2,346$, удовлетворяющая требованиям, которые предъявляются к высокоскоростным передачам, а именно: обеспечение максимально возможных нагрузок, которые могут быть переданы при безыносной работе зубчатых колес (рис. 8).

На рис. 9 и 10 четко видно, что концентрация изгибных напряжений в зубе при некротном зацеплении сосредоточена на переходных радиусах от эвольвенты к диаметру впадин, причем, в нижней точке активного модуля приведенные изгибные напряжения минимальны. Если использовать кратное зацепление, износ поверхностей зубьев наступает значительно быстрее, при этом концентратором напряжений становится нижняя точка активного профиля зуба, и в опасном сечении напряжения, как говорилось выше, увеличиваются незначительно (на рисунках эти области темные) [1, 3, 4].

Модификация профиля также существенно снижает динамическую нагрузку; в худшем случае, если в эксплуатации модифицированные участки зубьев изнашиваются, динамическая нагрузка расти не будет, так как скажется положительное влияние приработочного износа и уменьшение действующих погрешностей.

Характер приведенных на рис. 11 кривых $L_1 = f(k_2)$ и $L_2 = f(k_2)$ подтверждает резкую зависимость долговечности зубчатых колес от степени концентрации нагрузки по ширине венца. Реальному диапазону $k_2 = 1,1 \dots 2,4$, имеющему место в этих передачах, соответствует изменение долговечности шестерен и колес в 2,7 и в 2,2 раза соответственно.

Проведено сравнение кривых износа шестерен, которое показывает более благоприятный характер изнашивания и меньший интегральный износ некротных шестерен с модификацией зубьев, чем не имеющих модификации (рис. 12). Однако при статистическом усреднении $n_{Iкр}$ для обоих типов передач эти величины оказались в пределах наблюдавшегося разброса, поскольку значения $n_{Iкр}$ устанавливались только по скорости изнашивания, возникающей после очередного прироста частоты вращения, без учета ранее наблюдавшихся скоростей изнашивания и достигнутого интегрального износа.

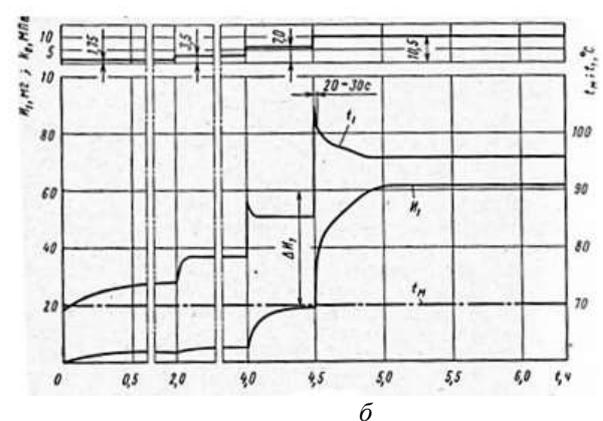


Рисунок 7 – Характерные кривые износа шестерен и изменения температуры их зубьев при резких повышениях постоянной нагрузки: а и б – при различной интенсивности приработочного изнашивания



Рис. 8 – Принятое некратное зубчатое зацепление: $z_1 = 26, z_2 = 61$

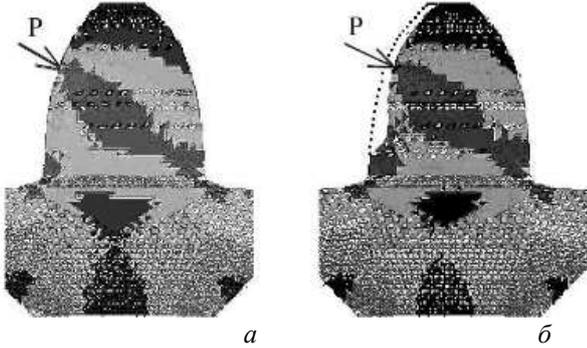


Рис. 9 – Распределение приведенных напряжений в нормальном сечении зуба шестерни при $m=10$ мм, $z=26$: а – при некратном зацеплении с колесом; б – при кратном зацеплении, износ зуба составляет 20% по делительному диаметру

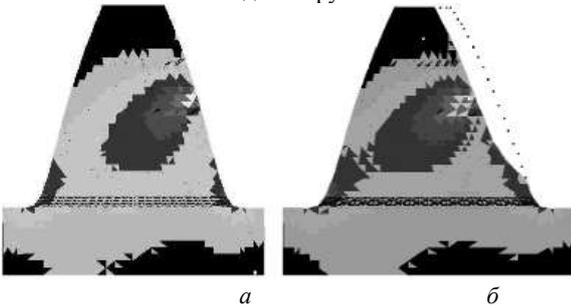


Рис. 10 – Распределение приведенных напряжений в нормальном сечении зуба колеса при $m=10$ мм, $z=61$: а – зуб при некратном зацеплении; б – при кратном зацеплении зуб изношен 20% по делительному диаметру

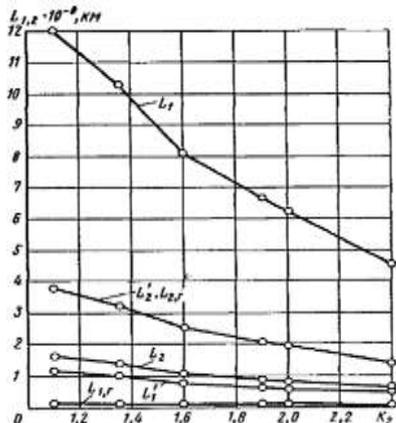
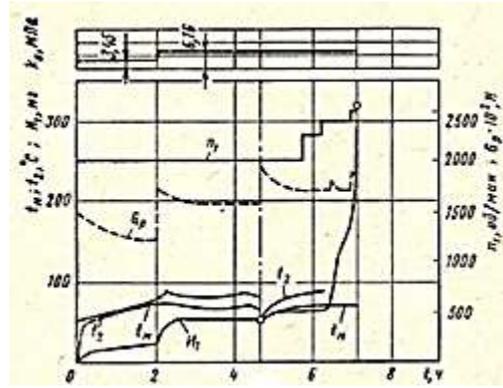
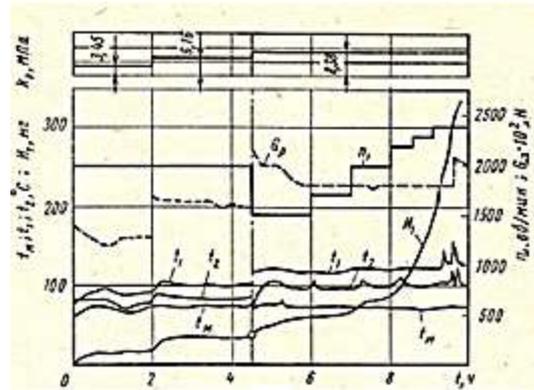


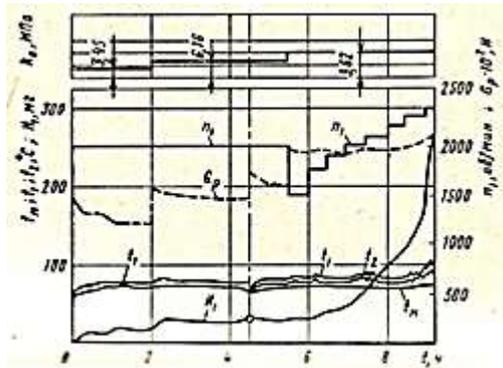
Рис. 11 – Кривые зависимости расчетной долговечности зубчатых колес от коэффициента концентрации нагрузки по длине контактных линий



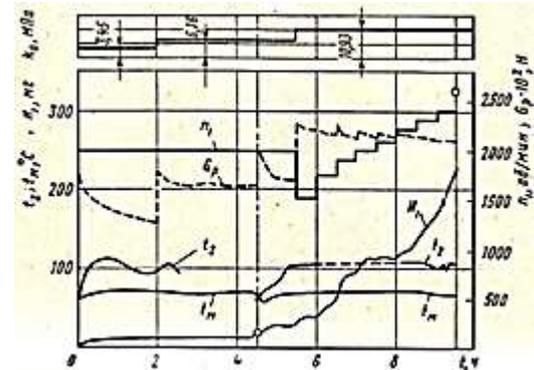
а



б



в



г

Рис. 12 – Результаты испытаний зубчатых колес (с модификацией профиля головок зубьев) методом ступенчатого повышения частоты вращения: а, б, в, г – характерные процессы изнашивания при основных нагрузках, соответствующих $k_0 = 6,16; 8,39; 9,62; 10,93$ МПа

В целом можно считать, что особенности метода ступенчатого повышения частоты вращения не привели к завышенной оценке несущей способности зубчатых пар. Благодаря такому подходу резко уменьшилась возможность достижения критических ситуаций, вызванных влиянием побочных факторов, а не только частоты вращения, и соответственно тепловых явлений в контакте зубьев. После работы при этих режимах, к началу основного испытания значение интегрального износа шестерен не превышало пределов, характерных для этого типоразмера зубчатых пар, но качество рабочей поверхности зубьев было намного хуже, чем после приработки при меньших частотах вращения и постепенно нарастающих нагрузках (отсутствовал зеркальный блеск, на головках и ножках зубьев наблюдались грубые следы начального заедания).

Выводы. Некратность зубчатого зацепления характеризуется контактированием каждого зуба шестерни с каждым зубом зацепляемого зубчатого колеса в определенной последовательности и обеспечивает: Ускоренную равномерную приработываемость сопрягаемых зубчатых колес; исправление дефектов при изготовлении и сборки зубчатых передач; уменьшение вибраций, шума; повышение плавности работы зубчатых передач.

При больших скоростях скольжения возможность заедания определяется соотношением времени, необходимого для взаимодействия смазочной среды с микроучастками чистого металла, и среднего времени прохождения микроучастков, одновременно обнажаемых на поверхности трения, между последовательными актами их контактирования с микроучастками сопряженной поверхности. Поэтому превышение критических для конкретного случая тяжело нагруженного контакта значений нагрузки, скорости или температуры всегда вызывает недопустимо интенсивное изнашивание и заедание из-за отсутствия равномерно износа.

Повышение износостойкости и повышения плавности работы зубчатых колес необходимо создать такие условия их контактирования, при которых каждый зуб ведущего колеса в процессе работы входил бы в зацепление с каждым зубом ведомого колеса в определенной последовательности. Если зубчатые колеса имеют передаточные числа с кратностью целых чисел, то на высоких окружных скоростях определённые группы зубьев ведущего колеса контактируют только с определёнными группами зубьев зацепляемого ведомого колеса. В силу технологических причин, зубчатые колеса имеют отклонения от параметров точности, эти погрешности передаются на сопрягаемые ведомые зубчатые колеса с определённым циклом вращения, который соответствует передаточному числу. Погрешности не распространяются на остальные зубья, т.е. группа зубьев ведущего колеса постоянно зацепляется с определённым количеством зубьев ведомого колеса. Такое зацепление зубчатых колес создаёт неравномерный износ всех зубьев и вызывает увеличение динамических нагрузок, связанных со

снижением плавности и повышением шумовых характеристик, что в конечном итоге приводит к созданию микротрещин, макротрещин и к отказам зубчатых колес.

При кратном зубчатом зацеплении (когда в передаче крутящего момента участвуют только определенные пары зубьев) очень часто возникает микропиттинг поверхностей зубчатых колес. Микропиттинг – это явление поверхностной усталости, в основном наблюдающееся на контактирующих поверхностях зубьев шестерен. Микропиттинг приводит к разрушающему износу, который может начаться уже в первые несколько часов работы. Для того, чтобы избежать образования микропиттинга, необходимо использовать зубчатые пары с некратным передаточным отношением, что будет обеспечивать участие всех зубьев в работе и, как следствие, равномерное изнашивание, а также выбрать смазочный материал, предназначенный для предотвращения микропиттинга. Предложена методика расчёта повышения износостойкости, долговечности и повышения плавности работы за счёт создания и прогнозирования определённых передаточных чисел, которые определяют некратность зацепления и обеспечивают работу зубьев ведущего зубчатого колеса со всеми зубьями ведомого зубчатого колеса

Список литературы

1. Решетов, Д. Н. *Детали машин*. – М.: Машиностроение, 1974. – 556 с.
2. Драчев, О. И. *Управление технологической наследственностью деталей малой жесткости [Текст] / Под ред. Ю.М.Соломенцева; Закрытое акционерное общество «ОНИКС» (Об-ние науч., инженерных и коммерческих структур) – Ирбит: ОНИКС, 2011 – 192 с., ил., табл.; - (Серия: Автоматизированное проектирование и автоматизация производственных процессов). ISBN 978-5-9902559-5-1.*
3. Гинзбург Е. Г. Халебский Н. Т. *Производство зубчатых колес* – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1978. – 136 с.
4. Пермінов С.В., Ключко О.О. *Технологічне забезпечення точності та дововічності зубчастих передач приводів верстатів // XII Міжнародна науково-практична конференція магістрантів та аспірантів (17–20 квітня 2018 року): матеріали конференції: у 3-х ч. – Ч. 3 / за ред. проф. Є.І. Сокола. – Харків: НТУ «ХПІ», 2018. – С. 206. ISBN 978-617-05-0264-3 (повне вид.) ISBN 978-617-05-0267-4 (ч. 3)*
5. Kovalev Viktor D, Vasilchenko Yana V Klochko., Alexander A., Gasanov M. *Technology of restoration of large gear boxes. Dašić, P. (editor): Modern trends in metalworking, Vol. 1: Vrnjačka Banja: SaTCIP Publisher Ltd., 2018. – P. 43–63. ISBN 978-86-6075-065-7..*
6. Пермяков А.А., Ключко А.А., Гасанов М.И. *Математическая модель синтеза технологического регламента восстановления функциональных свойств крупномодульных зубчатых передач. XIX Міжнародна науково-технічна конференція „Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта”, 29 червня - 01 липня 2018 року в Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського».* – Київ: НТУУ «КПІ», 2018. – Т. 4. – С. 348–350.
7. Декларативний пат. на корисну модель u 2018 02191 UA, МПК F16H 519/04 (2016.01). *Спосіб забезпечення контактування зубів ведучої шестерні з зубами веденого колеса / В.Д.Ковальов, О. О. Ключко, Д. О. Кравченко, О.М.Шелковий, О.А. Пермяков, М.І.Гасанов, А.О.Скоркін, О.І.Кондратюк. – 4 с.: ил.*
8. Shapovalov V., Klochko A., Gasanov M., Antsyferova O., Belovol A. *Optimizing the technology of reconditioning large high precision gear rims. The current state of scientific research and technology in the industry.* – Kharkiv. 2018. – № 3 (3). – P. 59–70.

9. Гасанов М.І., Клочко О.О., Заковоротний О.Ю., Пермінов Є.В. *Технологічний регламент оптимізації систем відновлення функціональних властивостей великогабаритних відкритих зубчатих передач // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні = Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Techniques in a machine industry: зб. наук. пр. / Нац. техн. ун-т «Харків. політехн. ін-т». – Харків : НТУ «ХПІ», 2018. – № 6 (1282) 2018. – С. 107–112. – ISSN 2079-004X.*
10. Пермяков А.А., Шелковой А.Н., Клочко А.А., Охрименко А.А. *Современные технологии повышения долговечности цилиндрических зубчатых колес / XVIII Міжнародна науково-технічна конференція „Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта”, яка відбулась 29 червня - 01 липня 2017 року в Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». – Київ: НТУУ «КПІ», 2017. – Т. 4. – С. 348–350.*
11. *Имитационное моделирование в задачах машиностроительного производства в 2-х томах, Т. 1: учеб. пособие под редакцией А.Н. Шелкового // Х.: НТУ «ХПІ», 2016. – 400 с. – На русском языке. ISBN 978-966-593-749-4.*
- p. 206. ISBN 978-617-05-0264-3 (more view.) ISBN 978-617-05-0267-4 (part 3)
5. Kovalev Viktor D, Vasilchenko Yana V Klochko., Alexander A., Gasanov M. *Technology of restoration of large gear boxes*. Dašić, P. (editor): Modern trends in metalworking, Vol. 1: Vrnjačka Banja: SaTCIP Publisher Ltd., 2018. pp. 43–63. ISBN 978-86-6075-065-7 .
6. Permyakov A.A., Klochko A.A., Gasanov M.I. *A mathematical model of the synthesis of technological regulations for the restoration of the functional properties of coarse-grained gears*. XIX International Scientific Conference “Progressive Technology, Technology and Engineer Association”, 29 June - 01 March 2014 in the National Technical University of Ukraine “Kiev Polytechnic Institute, Institute, Kyiv NTUU “KPI”, 2018. . 4. pp. 348–350.
7. Declarative Pat. on the cinnamon model u 2018 02191 UA, IPC F16H 5i9 / 04 (2016.01). V. D. Kovalov, O. O. Klochko, D. O. Kravchenko, O. Shelkova, O.A. Permyakov, M.I. Gasanov, AO.Skorkin, O.L.Kondratyuk. 4 p.
8. Shapovalov V., Klochko A., Gasanov M., Antsyferova O., Belovol A. *Optimizing the technology of high precision gear rims. The current state of the art*. Kharkiv. 2018. no 3 (3). pp. 59–70.
9. Hasanov, M.I., Klochko, O.O., Zakovorotny, O.Yu., Perminov, .V. *Technological regulations for optimizing systems of functional support of large-sized gears* Herald of the National Technical University "KhPI". Seriya: Technology in Machines = "Bulletin of the National Technical University" KhPI ". Series: Techniques in a machine industry: zb. sciences. Ave. Nat. tech. University “Kharkiv. Politechn. Kharkiv: NTU "KhPI", 2018. no 6 (1282) 2018. pp. 107–112. - ISSN 2079-004X.
10. Permyakov A.A., Shelkova A.N., Klochko A.A., Okhrymenko A.A. *Modern technology*. Kyiv: NTUU “KPI”, 2017. Vol. 4. pp. 348–350.
11. Simulation modeling in the problems of machine-building production in 2 volumes, Vol. 1: studies. by edited by A.N. Silk NTU "KPI", Kharkov, 2016. 400 p. [In Russian]. ISBN 978-966-593-749-4

Bibliography (transliterated)

1. Reshetov, D.N. *Machine parts*. - M.: Mashinostroenie, 1974. 556 p.
2. Drachev, OI. *Management of technological heredity of small rigidity parts* Ed. Yu.M. Solomentseva; Closed Joint-Stock Company “ONYX” (Scientific, Engineering and Commercial Structures) - Irbit: ONYX, 2011 - 192 pp., Il., Tabl. ; (Series: Automated design and automation of production processes). ISBN 978-5-9902559-5-1.
3. Ginzburg EG Khalebsky, N. T. *Production of gear wheels* Lviv Ye C.V., Klochko OO *Technological measures for precision transmission and transmission of gears of driving gears // XII International, scientific and practical conference, media training and research graduates (17–20 April 2018): materials of the conference: in 3 ch. prof. Є.І. Falcon. Kharkiv: NTU "KhPI", 2018.*

Поступила (received) 23.11.2018

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Шелковий Олександр Миколайович (Шелковой Александр Николаевич, Shelkovoy Alexander Nikolaevich) – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри технології машинобудування та металорізальних верстатів; тел.: (057)-720-66-25, e-mail: alnikshelk@gmail.com

Пермяков Александр Анатольевич, Permyakov Oleksandr Anatolliych) – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», завідувач кафедри технології машинобудування та металорізальних верстатів; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9589-0194>; тел.: (057)-720-66-25; e-mail: perm_a@i.ua

Клочко Александр Александрович (Клочко Александр Александрович, Klochko Alexander Alexandrovich) – доктор технічних наук, професор кафедри технологія машинобудування і металорізальні верстати Національного технічного університету «Харківський політехнічний університет», м. Харків; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2841-9455>; тел.: (067) 936-36-64; e-mail: ukrstanko21@ukr.net

Басова Євгенія Володимирівна (Басова Евгения Владимировна, Yevheniia Basova) – кандидат технічних наук, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри технології машинобудування та металорізальних верстатів; м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0002-8549-4788; e-mail: e.v.basova.khpi@gmail.com

Пермінов Євген Віталійович (Перминов Евгений Витальевич, Yevhen Perminov) – аспірант кафедри технологія машинобудування і металорізальні верстати Національного технічного університету «Харківський політехнічний університет», м. Харків; тел.: (099)-238-5845; e-mail: gekauta@gmail.com

Н.Р. ВЕСЕЛОВСЬКА, О.А. СКОРКІН, О.В. КОТЛЯР, Ю.О. КЛОЧКО, О.П. СТАРЧЕНКО

ІНФОРМАЦІЙНИЙ ФОНД РЕЛЕВАНТНОСТІ КОНСТРУКТОРСЬКО-ТЕХНОЛОГІЧНИХ ВИДІВ КРУПНОГАБАРИТНИХ З'ЄДНАНЬ ДЛЯ ПЕРЕДАЧІ КРУТНОГО МОМЕНТУ

Існує значний інформаційний фонд релевантності конструкторсько-технологічних видів крупногабаритних роз'ємних з'єднань, що використовуються для передачі крутного моменту, в яких роз'єм здійснюється за допомогою особливих конструктивних умов складання. Шпонкові та шліцьові з'єднання призначені для передачі крутного моменту від валу до посаженої на нього деталі (шківа, зубчатого колеса та ін.) і навпаки. Перевагами шпонкових з'єднань є їх простота і надійність у експлуатації, але вони ослаблюють вали та маточину шпонковими пазами і викликають концентрацію напруги. Шліцьові з'єднання в порівнянні з шпонковими мають велику навантажувальну здатність, краще центрують деталь на валу і дають меншу концентрацію напруги, що підвищує втомну міцність валів, але вони складніші у виробництві. Шліцьові з'єднання застосовують для посадок з натягом або зазором деталей (зубчастих коліс, шківів, втулок та ін.) на валу. У порівнянні зі шпонковими, шліцьові з'єднання мають ряд переваг: деталі на шліцьових валах краще центруються і направляються при пересуванні вздовж валу; менше напруги змінання на гранях шліців; вище міцність валів при динамічних і змінних навантаженнях. Шліцьові з'єднання отримали широке поширення в машинобудуванні, що пояснюється їх високою здатністю навантаження, конструктивними і технологічними перевагами перед іншими видами з'єднань типу вал – втулка. Найбільшого поширення в машинобудуванні мають прямокутні шліцьові з'єднання до діаметру $\varnothing 125$ мм. Широке застосування останнім часом стали отримувати крупногабаритні роз'ємні з'єднання з евольвентним профілем зубів діаметром від $\varnothing 125$ мм $\varnothing 500$ мм, що пояснюється тим, що їх здатність навантаження вище, ніж у прямокутного. Наведені основні засоби та методи обробки крупногабаритних роз'ємних з'єднань.

Ключові слова: інформаційний фонд, релевантність, конструкторсько-технологічні види, крупногабаритні шпонкові та шліцеві з'єднання, крупногабаритні роз'єднувачі з'єднувача з впливовим профілем, засоби та методи обробки з'єднань.

Н.Р. ВЕСЕЛОВСЬКА, А.О. СКОРКІН, А.В. КОТЛЯР, Ю.А. КЛОЧКО, Е.П. СТАРЧЕНКО

ИНФОРМАЦИОННЫЙ ФОНД РЕЛЕВАНТНОСТИ КОНСТРУКТОРСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ВИДОВ КРУПНОГАБАРИТНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ДЛЯ ПЕРЕДАЧИ КРУТЯЩЕГО МОМЕНТА

Существует значительный информационный фонд релевантности конструкторско-технологического вида крупногабаритных разъемных соединений, в том числе и для крутящего момента, в которых есть все необходимые условия для сборки. Шпоночные и шлицевые соединения применяются для передач с крутящим моментом от вала до сопрягаемой детали (шкива, зубчатые колеса и др.) и наоборот. Преимуществами шпоночных соединений является их простота и надежность в эксплуатации, но они ослабляют вали и ступицу шпоночными пазами и вызывают концентрацию напряжения. Шлицевые соединения по сравнению с шпоночными имеют большую нагрузочную способность, лучше центрируют деталь на валу и дают меньшую концентрацию напряжения, повышает усталостную прочность валов, но они сложнее в производстве. По сравнению с шпоночными, шлицевые соединения имеют ряд преимуществ: детали на шлицевых валах лучше центрируются и направляются при передвижении вдоль вала; меньше напряжения смятия на гранях шлицев; выше прочность валов при динамических и переменных нагрузках. Шлицевые соединения получили широкое распространение в машиностроении, что объясняется их высокой нагрузочной способностью, конструктивными и технологическими преимуществами перед другими видами соединений типа вал - втулка. Наибольшее распространение в машиностроении имеют прямоугольные шлицевые соединения с диаметром $\varnothing 125$ мм. Широкое применение в последнее время стали получать крупногабаритные разъемные соединения с эвольвентным профилем зубьев диаметром от $\varnothing 125$ мм $\varnothing 500$ мм, что объясняется тем, что их нагрузочную способность выше, чем в прямоугольного. Приведены основные средства и методы обработки крупногабаритных разъемных соединений.

Ключевые слова: информационный фонд, релевантность, конструкторско-технологические виды, крупногабаритные шпоночные и шлицевые соединения, крупногабаритные разъемные соединения с эвольвентным профилем, средства и методы обработки соединений

N.R. VESELOVSKAYA, A.O. SKORKIN, A.V. KOTLYAR, Yu.A. KLOCHKO, E.P. STARCHENKO

INFORMATION SUPPLY FUND OF RELEVANTING CONSTRUCTIVE TECHNOLOGICAL TECHNOLOGY TYPES OF LARGE-SIZED MEANS TO TRANSFER THE TIGHT MOMENT

There is a significant informational fund of relevant design and technological views of large-sized rose plants, which are worthy of a cool moment, but you can come back for additional special constructive minds. Shponkovi that shlitsyovi z'ednannya primarneni for gears cool moment vid shaft before sowing on new parts (shkiva, gears that in.) I navpak. By perevalami shponkovih z'ednan є їх simplicity i nadiynist in exploitation, aloons loosen the weed of the spline grooves i wilykayut concentration of springs. Shlitsyovi z'ednannya in porivnyanni of shponkovimii toil Velika navantazhuvальnu zdatnist, maintained upstream tsentruyut detail on the shaft i give Mensch kontsentratsiyu naprugi scho pidvischue vtomnu mitsnist valiv, ale stink skladnishi in virobnitstvi. Shlitsyovi z'andnannya zastosovuyut for landings with tightness abo clearance of parts (gear parts kol_s, shkiviv, bushings that in.) On the shaft. At the spline of the shponkovimi, shlitsovil"dnannya mayut a number of perevag: details on the shafts of the trees are centered i are sent at the over-swayed shaft; less springs on the edges of shlitsiv; Vishche mitsnist valiv with dynamical i zminnih navantazhennyah. Shlits'ovil є ndnannya otrimali wider broader in machinebudding, please explain to them with high quality navantazhennyah, constructive and technological perevagami before inshiem types z ddnan type shaft - sleeve. The most widespread in machine-waving majut straightness shlitsyovi"dnannya to a diameter of $\varnothing 125$ mm. At the widening of the hour, they began to cut off the large-sized roses of the large-scale with a solvent profile of the teeth with a diameter of $\varnothing 125$ mm $\varnothing 500$ mm, I will explain this time, the design of the building will be set to the height of the towers. Navigate the main methods of processing of large-sized rose plants.

Keywords: information fund, relevance, design and technological views, large-sized keyboards and spline joints, large-size split joints with an engraving profile, tools and methods for processing joints.

Введение Існує значний інформаційний фонд релевантності конструкторсько-технологічних видів крупногабаритних роз'ємних з'єднань, що використовуються для передачі крутного моменту, в

яких роз'єм здійснюється за допомогою особливих конструктивних умов складання. До цієї групи в першу чергу слід віднести шпонкові та шліцьові з'єднання. Це стандартні способи об'єднання, в яких всі

конструктивні параметри, матеріали, точність виготовлення та умови експлуатації, а також збірка

Анализ последних исследований и публикаций.

Шпонкові та шліцьові з'єднання призначені для передачі крутного моменту від валу до посаженої на нього деталі (шків, зубчатого колеса та ін.) і навпаки. Перевагами шпонкових з'єднань є їх простота і надійність у експлуатації, але вони ослаблюють вали та маточину шпонковими пазами і викликають концентрацію напруги. Шліцьові з'єднання в порівнянні з шпонковими мають велику навантажувальну здатність, краще центрують деталь на валу і дають меншу концентрацію напруги, що підвищує втомну міцність валів, але вони складніші у виробництві [1]. Шпонка - елемент з'єднання, захищає з'єднувальні деталі від відносного зміщення, головним чином від відносного повороту [2]. За формою стандартні шпонки поділяються на призматичні, клинові, сегментні та тангенціальні.

Мета дослідження. Метою дослідження є вивчення інформаційного фонду релевантності конструкторсько-технологічних видів

групогабаритних роз'ємних з'єднань, що використовуються для передачі крутного моменту в порівнянні різних видів з'єднань за допомогою особливих конструктивних умов складання. Шпонкові та шліцьові з'єднання призначені для передачі крутного моменту від валу до посаженої на нього деталі (шків, зубчатого колеса та ін.) і навпаки [3].

Шпонкові з'єднання з призматичними шпонками (рис. 1) стандартизовані по ГОСТ 23360-78 [4]. Стандарт встановлює розміри та крайні відхилення розмірів призматичних шпонок та відповідних їм шпонкових пазів на валах та в втулках.

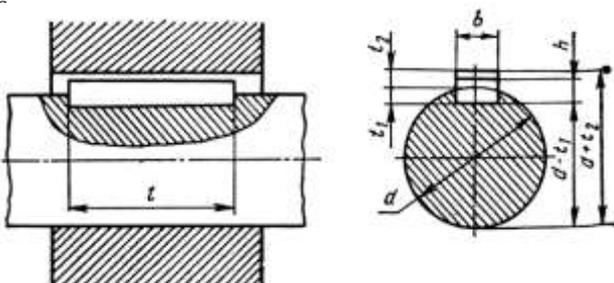


Рис. 1 – З'єднання з призматичною шпонкою
 d – діаметр вала; b – ширина шпонки; h – висота шпонки; l – довжина шпонки; t_1 – глибина паза на валу; t_2 – глибина паза на втулці

Призматичні шпонки виготовляють зазвичай з відношенням висоти до ширини від 1:1 (для валів малих діаметрів) до 1:2. В важко навантажених з'єднаннях застосовують шпонки призматичні високі, що мають значну висоту і ширину [3].

Шпонкові з'єднання з сегментними шпонками (рис. 2) застосовують на валах невеликих діаметрів (до 38 мм); з'єднання прості у виробництві та складанні, однак вал послаблюється глибоким пазом під шпонку [3, 4].

Ще одним різновидом шпонки є клинова шпонка

(рис. 3). Вона встановлюється в пази валу і маточини з бічними зазорами. ГОСТ 24068-80 [6] встановлює розміри і граничні відхилення розмірів клинових шпонок з головкою і без головки і відповідних їм шпонкових пазів на валах і у втулках. Відповідно до стандарту існують такі різновиди клиновий шпонки: клинова з закругленими або плоскими кінцями, клинова з головкою і плоским кінцем.

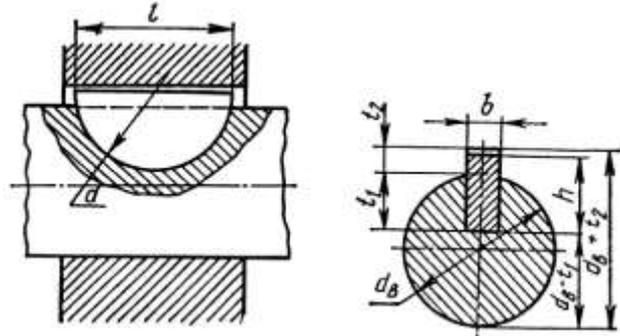


Рис. 2 – З'єднання з сегментною шпонкою
 d – діаметр шпонки; d_B – діаметр вала; b – ширина шпонки; h – висота шпонки; l – довжина шпонки; t_1 – глибина паза на валу; t_2 – глибина паза на втулці

Поперечний переріз шпонки - прямокутник з притупленими дугою або фаскою кутами; робочими є широкі грані. Одна з широких граней має по довжині ухил 1:100, що забезпечує самозупинку шпонки [2].

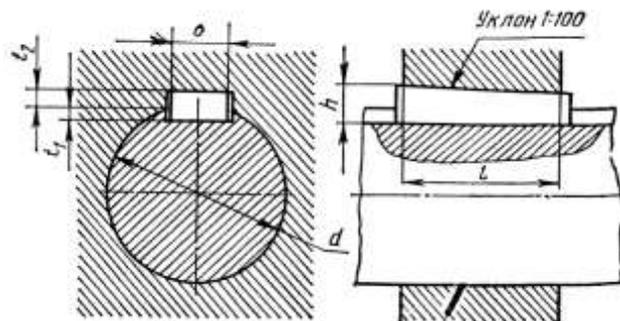


Рис. 3 – З'єднання з клинвою шпонкою
 d – діаметр вала; b – ширина шпонки; h – висота шпонки; l – довжина шпонки; t_1 – глибина паза на валу; t_2 – глибина паза на втулці

Тангенціальні шпонки (рис. 4) з двох односкатних клинів застосовують для важко навантажених валів в умовах реверсивного обертання. Довжина шпонки вибирається на 10 – 15% більше довжини маточини. При великих ударних навантаженнях і частому реверсуванні застосовують посилені тангенціальні шпонки [3].

Виклад основного матеріалу. Шліцьові з'єднання отримали широке поширення в машинобудуванні, що пояснюється їх високою здатністю навантаження, конструктивними і технологічними перевагами перед іншими видами з'єднань типу вал – втулка.

Вибір типу шліцьових з'єднань пов'язаний з конструктивними і технологічними особливостями прямокутних і евольвентних шліцьових з'єднань. Евольвентний профіль зуба має підвищену міцність

завдяки потовщення зубів до основи і наявності заокруглень біля основи, що знижує концентрацію напружень.

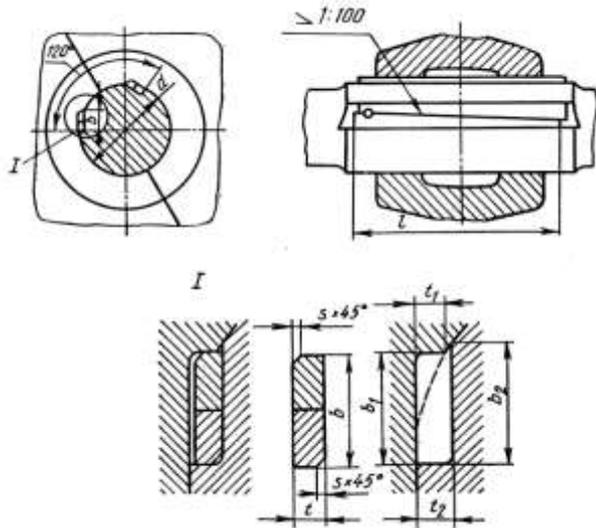


Рис. 4 – З'єднання з тангенціальною шпонкою
 d – діаметр вала; b – ширина шпонки; b_1 – ширина паза у втулці; b_2 – ширина паза на валу; t – товщина шпонки; t_1 – глибина паза на валу; t_2 – глибина паза на втулці; l – довжина шпонки; s – фаска

Форма шліцьового профілю і розмірний ряд прямокутних шліцьових з'єднань (рис. 5) регламентовані стандартом ГОСТ 1139–80 [8].

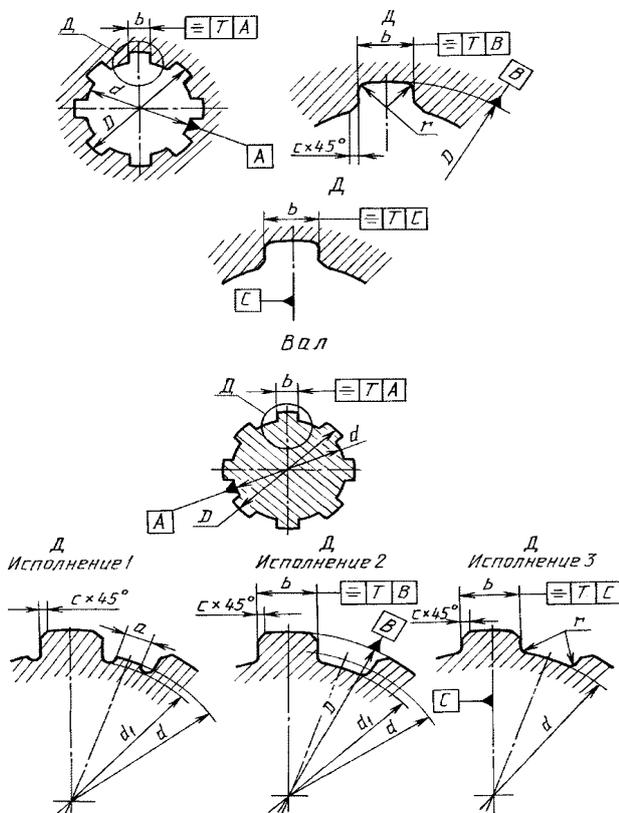


Рис. 5 – З'єднання шліцьове прямокутне
 D – зовнішній діаметр; d , d_1 – внутрішній діаметр; b – ширина шліця; r – радіус заокруглення; a – ширина виступу пазу; c – фаска

Стандарт поширюється на шліцьові з'єднання загального застосування з прямокутним профілем зубів, розташованих паралельно осі з'єднання, і передбачає з'єднання легкої, середньої та важкої серій. Розмірний ряд охоплює з'єднання з зовнішніми діаметрами 14 – 125 мм і числом зубів 6 – 20 і не поширюються на спеціальні шліцьові з'єднання.

Евольвентні шліцьові з'єднання (рис. 6) також стандартизовані. ГОСТ 6033–80 [10] поширюється на шліцьові з'єднання з евольвентним профілем зубів, розташованих паралельно осі з'єднання, з кутом профілю 30° . Стандарт встановлює вихідний контур, форму зубів, номінальні діаметри, модулі і числа зубів, номінальні розміри і вимірювані величини а також допуски і посадки.

Розмірний ряд охоплює з'єднання модулями 0,5–10 мм, зовнішніми діаметрами 4–500 мм і числами зубів 6–82.

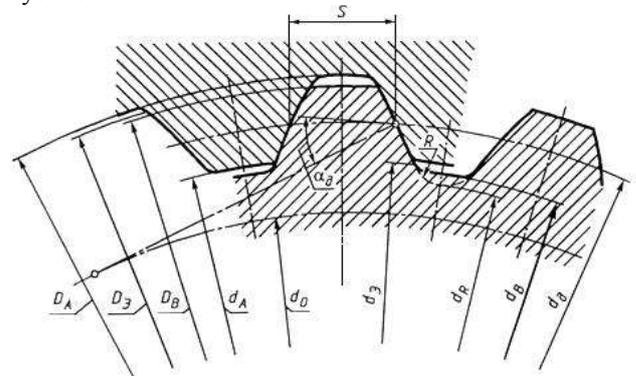


Рис. 6 – З'єднання шліцьове евольвентне
 D_A – номінальний зовнішній діаметр отвору; $D_э$ – діаметр окружності через початкові точки перехідних кривих отвору; D_B – номінальний зовнішній діаметр вала; d_A – номінальний внутрішній діаметр отвору; $d_о$ – діаметр основного кола; $d_э$ – діаметр вала через початкові точки перехідних кривих; d_k – номінальний діаметр вала на заокругленій впадині; d_B – номінальний діаметр вала на плоскій впадині; $d_о$ – діаметр діляльного кола; S – номінальна товщина зуба вала і ширина впадини отвору по діляльному колу; $\alpha_о$ – кут тиску на діляльному колі; R – радіус заокругленої впадини

Евольвентні шліцьові з'єднання використовують для передачі значних крутних моментів, а також в тих випадках, коли до точності центрування з'єднаних елементів пред'являють підвищені вимоги. При евольвентному профілю шліців можна допускати види обробки, що застосовуються при зубонарізанні: шевінгування, шліфування по методу обкатки.

Згідно з ГОСТ 6033–80 евольвентні шліцьові з'єднання обробляються та експлуатуються з урахуванням трьох видів центрування: по зовнішньому діаметру; по бокових поверхнях зубів (для плоскої або заокругленої форми впадини); по внутрішньому діаметру.

Трикутні шліцьові з'єднання (рис. 7) застосовують як правило, для нерухомих з'єднань замість з'єднань з натягом, що дозволяє використовувати тонкостінні втулки, а також для з'єднання втулок з легких сплавів з сталевими валами.

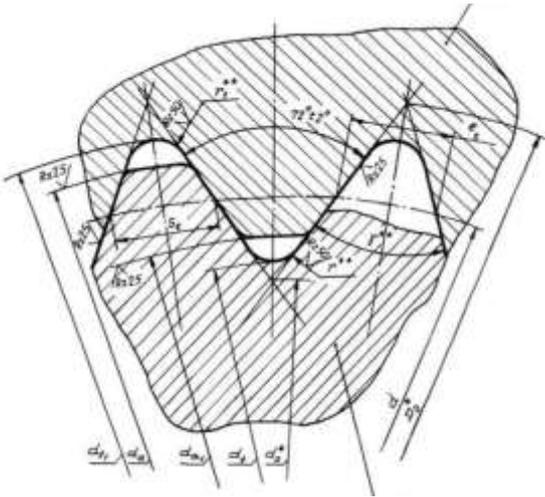


Рис. 7 – З'єднання шліцьове трикутне

Крім рекомендованих, в машинобудуванні застосовують трикутні шліцьові з'єднання в різних галузевих нормалях. Ці нормалі містять з'єднання з кутом профілю 90° , 72° і 60° , номінальними зовнішніми діаметрами 5 – 75 мм, модулями 0,2 – 1,5 мм і числом зубів 20 – 70.

При нарізанні зубів дисковими профільними фрезами використовують універсальні або спеціальні фрезерні верстати, оснащені ділильними головками або спеціальними ділильними пристосуваннями. Як ріжучий інструмент використовують дискові двосторонні фрези в поєднанні з профільною (рис. 8, а) або одну дискову профільну фрезу, обробляючи весь профіль зуба відразу (рис. 8, б).

Рациональна область застосування – багатосерійне і масове виробництво. Досягається точність по коливанню товщини зуба 0,015 – 0,05 мм, шорсткість поверхні $R_z = 20$ мкм.

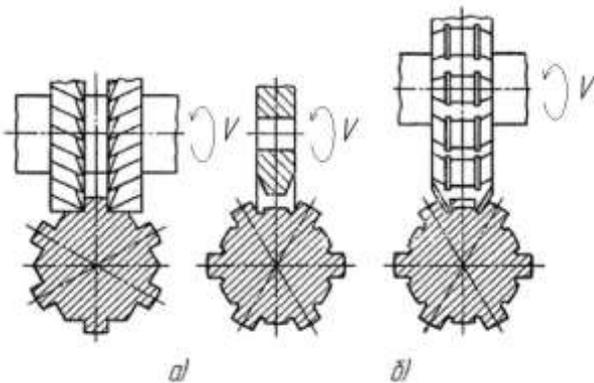
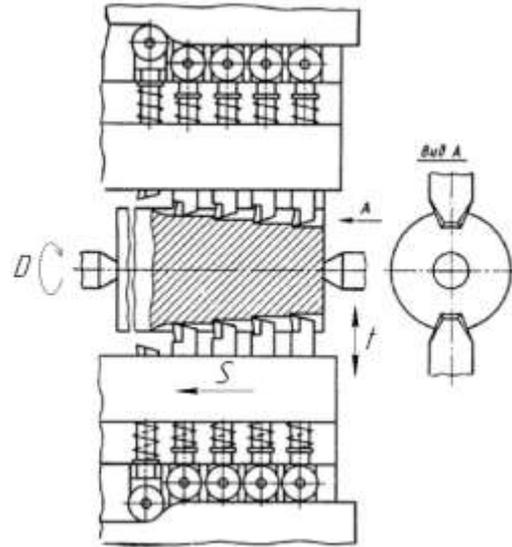


Рис. 8 – Методи обробки зубів валу дисковими профільними фрезами:

V – напрям обертання інструменту; а – дисківі двосторонні фрези; б – дисківі профільна фреза

Продуктивність праці при виготовленні зубів на валах при протягуванні в 6 і більше разів більше, ніж при обробці фрезеруванням черв'ячними фрезами. Ефективність методу протягування особливо зростає при збільшенні довжини оброблюваних зубів (рис.9).

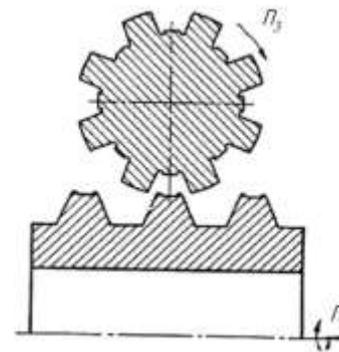
Шліцепротягування забезпечує шорсткість поверхні $R_a = 1,6 - 0,8$ мкм.

Рис. 9 – Схема протягування зубів валу
 S – напрям подачі заготовки; t – напрям переміщення інструменту; D – напрям повороту заготовки

Найбільший економічний ефект від застосування методу протягування досягається в умовах великосерійного і масового виробництва шліцьових валів.

Фрезерування черв'ячними фрезами (рис. 10) є в даний час найбільш відпрацьованим і поширеним способом обробки зубів на валах в умовах великосерійного і масового виробництва. Точність профілю та інших елементів шліцьового валу при обробці методом обкатки вище, ніж при застосуванні методу копіювання.

Черв'ячні фрези для обробки шліцьових поверхонь стандартизовані по ГОСТ 8027–86 [16] для шліцьових валів з прямокутним профілем зуба та по ГОСТ 6637–80 [17] для шліцьових валів з евольвентним профілем.

Рис. 10 – Схема фрезерування зубів валу черв'ячної фрезою: n_2 – напрям обертання заготовки; n_1 – напрям обертання інструмент

Процес різання відбувається безперервно і в ньому беруть участь одночасно кілька ріжучих зубів фрези, завдяки чому цей спосіб нарізування зубів є більш продуктивним, ніж: обробка фрезеруванням однієї профільної фрезою методом копіювання.

Зуби нарізуються зазвичай одно- і двозахідними

фрезами. Застосування двохзаходних фрез дозволяє збільшити продуктивність в 1,5 – 1,8 рази, проте внаслідок більш низької точності їх застосовують при чорновій обробці під подальше чистове фрезерування однозаходною черв'ячної фрезою або шліцешлифування. Остаточне одноразове шліцефрезерування виконують однозаходної черв'ячної фрезою. Точність зубів по товщині при обробці однозаходними фрезами: 0,025 – 0,12 мм; відхилення від паралельності до 0,04 мм на довжині 100 мм; шорсткість обробленої поверхні $R_z = 20 - 40$ мкм.

Режими різання при фрезеруванні зубів вала наступні: подача на оборот заготовки при чорновій (під шліфування) обробці 1,5 - 2,6 мм / об, при чистової по суцільному металу 0,5 - 1,0 мм / об; швидкість різання відповідно 15 - 40 і 10 - 30 м / хв.

Фрезерування черв'ячними фрезами ведуть на спеціальних шліцефрезерних верстатах або на зубофрезерних верстатах.

Обробка довбачем на зубодовбальних верстатах застосовують для обробки зубів отвірних коліс, втулок.

Обробка методом зуботочіння. Інструментом для обробки; зуботочінням (рис. 11) є обкатний різець, за зовнішнім виглядом нагадує косозубий довбач. Число зубів обкатного різця зазвичай в 2 – 4 рази перевищує число зубів оброблюваного валу.

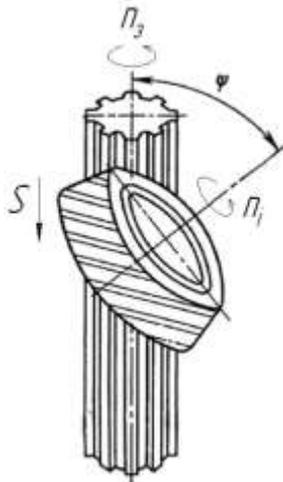


Рис. 11 – Схема обробки зубів валу зуботочінням: n_3 – напрям обертання заготовки; n_i – напрям обертання інструменту; S – напрям подачі

Шліфування зубів. Існує кілька способів шліфування зубів валу (рис. 12). Одночасне шліфування поверхонь, що належать різним зубам, за допомогою декількох шліфувальних кругів не забезпечує економічного отримання досить високої точності через нерівномірний знос кіл, що мають різні окружні швидкості (рис. 12, а).

При роздільному шліфуванні бічних сторін і центру поверхні зубів (рис. 12, б) знижується точність обробки і збільшується трудомісткість виготовлення в зв'язку з тим, що шліцевий профіль валу обробляється послідовно в дві установки. З усіх відомих способів найкращі результати як в сенсі точності, так і продуктивності виходять при шліфуванні зубів одним

профільним колом (рис. 12, в).

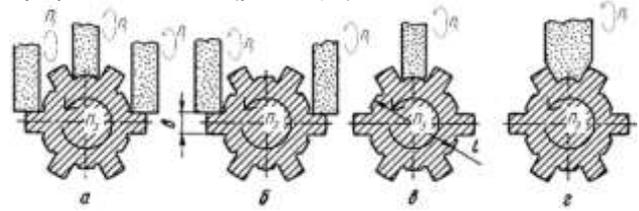


Рис. 12 – Схеми шліфування зубів на валах
а – трьома циліндричними колами; б – роздільне шліфування поверхонь а й б; в – одним профільним колом; n_3 – напрям обертання заготовки; n_i – напрям обертання інструменту

Параметр шорсткості обробленої поверхні в залежності від методу та режиму обробки $Ra = 0,16 - 2,5$ мкм.

Найбільше застосування отримало поздовжнє накопчення зубів багатороликовою головкою (рис. 13).

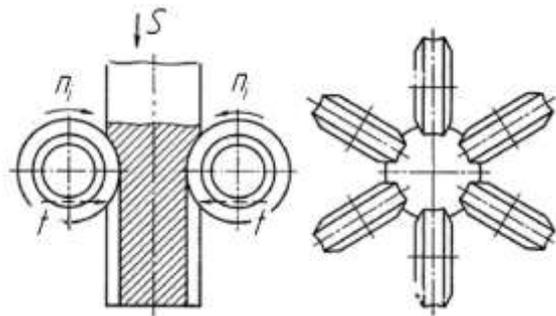


Рис. 13 – Схема поздовжнього накопчення зубів валу багатороликовою головкою: n_i – напрям обертання інструменту; S – напрям подачі; t – напрям переміщення інструменту

Даний метод дозволяє накатати зуби різного профілю з центруванням по зовнішньому або внутрішньому діаметру. Конструкція головки дозволяє накопчувати шліцеві вали як за один, так і за кілька проходів, в залежності від вимог, що пред'являються до точності розмірів, шорсткості поверхні і ступеня деформації.

Широке застосування в промисловості отримало накопчення зубів на валах круглими зубчастими роликками. При накопченні за рахунок переміщення роликків до осі заготовки (рис. 14, а) після формування профілю зуба виконують калібрування при постійній міжцентровій відстані. Накопчуються відбувається одним, двома або трьома роликками. Заготовку встановлюють в центрах або патроні.

Накопчення зубчастими роликками виконують також з тангенціальною подачею заготовки (рис. 14, б) на двошпиндельних різьбонакатних верстатах або на спеціальних шліценкатних верстатах. Накатні роликки встановлюють на необхідну міжцентрову відстань, яка не змінюється в процесі накопчення.

На модернізованих різьбонакатних верстатах або на спеціальних шліценкатних верстатах можна здійснювати накопчення зубчастими роликками з прямими формотворними зубами з осьовою подачею заготовки (рис. 14, в).

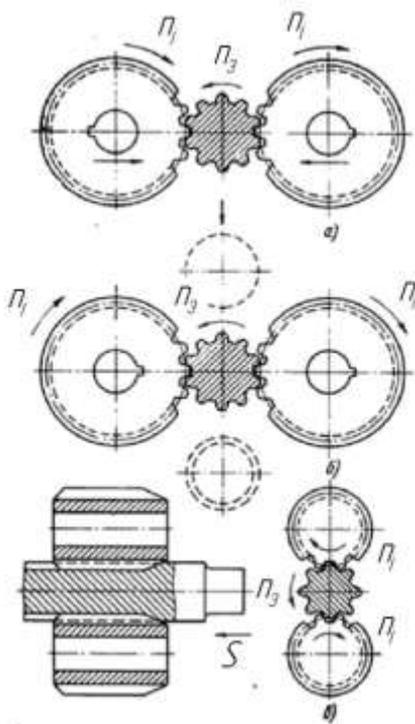


Рис. 14 – Схема накочування зубів валу круглими зубчастими роликками: *a* – з радіальною подачею роликків; *б* – з тангенціальною подачею заготовки; *в* – з осьювою подачею заготовки; n_1 – напрям обертання інструменту; S – напрям подачі; n_2 – напрям обертання заготовки

Зубчаста рейка має три частини: забірну, калібрувальну і ділянку розвантаження (рис.15). Висота зубів забірної частини поступово збільшується, на калібрувальній частині зуби мають висоту, відповідну глибини паза деталі. Термін служби накатних рейок досить великий. Інструмент допускає до чотирьох переточувань; до переточування він обробляє близько 30 000 деталей.

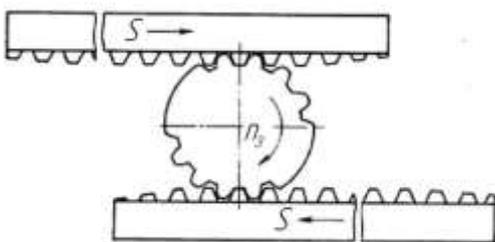


Рис. 15 – Схема накочування зубів валу плоскими рейками: S – напрям подачі; n_2 – напрям обертання заготовки

Точність виготовлення шліцьового отвору багато в чому визначається точність усієї деталі, оскільки вона є конструкторською і технологічною базою. Технологічний процес обробки зубів у отворах до термічної обробки включає попередню обробку отворів свердлінням та розточуванням (зенкеруванням) з підрізкою торця, протягуванням шліцьових канавок однією або послідовно двома протяжками. Для протягування зубців у отворах застосовують протяжки з сталей марок P18, P9, P18Ф2,

P6M5, ХВГ . Протягування здійснюють на горизонтальних або вертикальних станках. Кращу точність забезпечують протяжні станки вертикального типу.

При обробці протягуванням досягається точність із допуском по шостому квалітету, шорсткість поверхні до $R_a = 2,5$ мкм.

У високоточних деталей бічні поверхні впадин між зубами і поверхню D можна обробляти шліфуванням спеціальною головкою, яку встановлюють на плоско або шліцешліфувальних верстатах, або спеціальних верстатах. Схема шліфування показана на рис. 16. Шліфувальний круг малих розмірів по черзі шліфує бічні і центрувальні поверхні впадин.

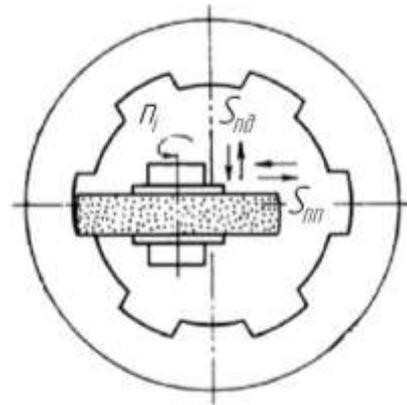


Рис. 16 – Схема шліфування бічних поверхонь впадин шліцьового отвору: S_{nd} – напрямок поперечної подачі; S_{nd} – напрямок повздовжньої подачі; n_2 – напрям обертання інструменту

Висновки. Розглянуто основні відомості про види з'єднань, що застосовуються для передачі крутного моменту, їх переваги, недоліки та області використання. Були наведені основні засоби та методи обробки поверхонь таких з'єднань. На основі цього була обґрунтовано поставлена проблема та виконаний аналіз її стану.

References (transliterated)

1. *Приводы машин: Справочник* / В.В. Долугий, Т.И. Муха, А.П. Цупиков, Б.В. Януш. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1982. – 383 с., ил.
2. *Детали машин. Расчет и конструирование: Справочник* / Н.С. Ачеркин, И.А. Биргер, Л.С. Борович и др. – М.: Машиностроение, 1968. – 440 с.
3. *Расчеты деталей машин: Справ. пособие* / А.В. Кузьмин, И.М. Чернин, Б.С. Козинцов. – 3-е изд., перераб. и доп. – Мн.: Выш. шк., 1986. – 400 с.
4. *ГОСТ 23360–79. Основные нормы взаимозаменяемости. Соединения шпоночные с призматическими шпонками. Размеры шпонок и сечений пазов. Допуски и посадки.* – Взамен ГОСТ 8788–68, ГОСТ 8789–68 и ГОСТ 7227–58 в части призматических шпонок; введ. 01.01.80. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2005. – 21 с.
5. *ГОСТ 24071–97 Основные нормы взаимозаменяемости. Сегментные шпонки и шпоночные пазы.* – Взамен ГОСТ 24071–80; введ. 01.07.2000. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2000. – 9 с.
6. *ГОСТ 24068–80. Основные нормы взаимозаменяемости. Соединения шпоночные с клиновыми шпонками. Размеры шпонок и сечений пазов. Допуски и посадки.* – Взамен ГОСТ 8791–68, ГОСТ 8792–68 и ГОСТ 8793–68; введ. 01.01.81. – М.:

- ИПК Издательство стандартов, 2005. – 14 с.
7. ГОСТ 24069–97. Основные нормы взаимозаменяемости. Тангенциальные шпонки и шпоночные пазы. – Взамен ГОСТ 24069–80; введ. 01.07.2000. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2003. – 8 с
 8. Технологический регламент выбора и назначения параметров обработки при скоростном лезвийном зубофрезеровании / Н.С. Равская, А.А. Охрименко, А.А. Клочко, М.И. Гасанов // XVIII Міжнародна науково-технічна конференція „Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта”, яка відбулась 29 червня - 01 липня 2017 року в Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». – Київ: НТУУ «КПІ», 2017. – Т. 4. – С. 350 – 353.
 9. Шлицевые соединения/ Г.И. Скудин, В.И. Никитин. – М.: Машиностроение, 1981. – 128 с. ил.
 10. ГОСТ 6033–80 Основні норми взаємозамінності. З'єднання шлицьові евольвентні з кутлом профілю 30°. Розміри, допуски і вимірювані величини. – Замість ГОСТ 6033–51; введ. 01.01.1982. – М.: ИПК Видавництво стандартів, 2005. – 86 с.
 11. Клочко О.О., Чекердес С. О., Хорошайло В.В., Федоров В.В., Хомяков С.А. Автоматизация управления технологической подготовкой производства крупногабаритных евольвентных шлицевых з'єднань. Машинобудування очима молодих: прогресивні ідеї – наука – виробництво. Матеріали міжнародної науково-практичної конференції 31 жовтня – 02 листопада 2018 року / Під заг. ред. В. Д. Ковальова. – Краматорськ: ДДМА, 2018. – С. 74.

References (transliterated)

1. V.V. Doligy, T.I. Mucha, A.P. Tsupikov, B.V. Janusz *Drives of machines: a Handbook* 2nd ed., Pererab. and add. Lviv, Mechanical Engineering, Leningrad. separation, 1982. - 383 p., il.
2. N.S. Acherkin, I.A. Birger, L.S. Borovich et al. *Details of cars. Calculation and design: Handbook* Moscow: Mashinostroenie, 1968. 440 p.
3. A.V. Kuzmin, I.M. Chernin, B.S. Kozintsov. *Calculations of machine parts: Ref. allowance* 3rd ed., Pererab. and add. Mn.: Your. school., 1986. 400 p.
4. GOST 23360–79. *Basic standards of interchangeability. Key*

- connections with prismatic keys. The dimensions of the keys and sections of the grooves. Tolerances and landings. - Instead of GOST 8788–68, GOST 8789–68 and GOST 7227–58 in terms of prismatic keys; enter 01.01.80. Moscow, IPK Publishing house of standards, 2005. 21 p.
5. GOST 24071–97 *Basic standards of interchangeability. Segment keys and keyways*. Instead of GOST 24071–80; enter July 01, 2000. Moscow, IPK Publishing house of standards, 2000. 9 p.
6. GOST 24068–80. *Basic standards of interchangeability. Key joints with wedge keys. The dimensions of the dowels and groove sections. Tolerances and landings*. Instead of GOST 8791–68, GOST 8792–68 and GOST 8793–68; enter 01.01.81. Moscow, IPK Publishing house of standards, 2005. 14 p.
7. *Basic standards of interchangeability. Tangential keys and keyways*. - Instead of GOST 24069–80; enter 07/01/2000. Moscow, IPK Publishing house of standards, 2003. 8 p.
8. N.S. Ravskaya, A.A. Okhrimenko, A.A. Klochko, M.I. Hasanov *Technological regulations for the selection and appointment of processing parameters for high-speed blade gear cutting*. XVIII International conference on technical and technical conference “Progressive technology, technology, engineering, engineering, engineering”, yak went on 29 June - 01 March 2017 in the National Technical University, Ukraine, “Kiev, Ukraine, Ukraine, Kyiv, Ukraine, 2017, Kyiv: NTUU “KPI”, 2017. Vol. 4. pp. 350 - 353.
9. G.I. Skudin, V.I. Nikitin, *Shlitsevy connections*. Moscow, Mashinostroenie, 1981. 128 p.
10. GOST 6033–80 *Basic norms of mutual immunity. Prof. Iyu 30°. Rose-ri, tolerances i vimiryuvani great*. A number of GOST 6033–51; enter 01/01/1982. Moscow, IPK Vidavnitstvo Standards, 2005. 86 p.
11. Klochko O.O., Chekerdes S. O., Khoroshaylo V.V., Fedorov V.V., Khomyakov S.A. *Automation of the technical control of the technological preparation of the large-scale evolvent shlitsovih s'dnan*. Machinery of young and young Ochim: progressive idї - science - virobnitstvo. Materials of international practical scientific conference 31 of the Zhovtnya - 02 leaf fall 2018 rock / Pid zag. ed. V.D. Kovalova. - Kramatorsk: DDMA, 2018. pp. 74.

Поступила (received) 03.09.2018

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Веселовська Наталія Ростиславівна (Веселовская Наталья Ростиславовна, Veselovskaya Natalia Rostislavovna) - доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри машин та обладнання сільського господарювання виробництва Вінницький національний аграрний університет, м Вінниця, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9399-6721>; тел. +380975370748; e-mail: wnatalia@ukr.net

Скоркін Антон Олегович, (Скоркин Антон Олегович, Permyakov Oleksandr Anatolliych) – кандидат технічних наук, доцент, Українська інженерно-педагогічна академія, зам. декана; ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-3032-83414>; тел.: 093-464-62-39; e-mail: Andromeda862@ukr.net

Котляр Олексій Віталійович (Котляр Алексей Витальевич, Alexey Kotliar) – кандидат технічних наук, доц. кафедри Технології машиностроєння і металорежущих станків, Національний технічний університет «Харьковский политехнический институт», г. Харьков, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7664-0395>, (057) 720-66-25; e-mail: Alexeykotliar@gmail.com

Клочко Юрій Олександрович (Клочко Юрий Александрович, Klochko Yuriy Aleksandrovich) – кандидат економічних наук, зав.кафедрою менеджмент ДІТМ МНТУ, м. Краматорськ, Україна; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-6219-0087>; e-mail: dosent@ukr.net

Старченко Олена Павлівна (Старченко Елена Павловна, Starchenko Olena Pavlovna) – заст.директра радіотехнічного коледжа, м. Харків; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7444-6668>;тел.: (093)-331-5174; e-mail: estarchenko79@gmail.com

ЗМІСТ

<i>Іванов В.О., Дегтярьов І.М., Залога В.О., Басова Є.В.</i> . Експериментальне дослідження точності механічної обробки деталей типу важелів.....	3
<i>Ковалевський С.В., Ковалевська О.С.</i> . Актуалізація експертних моделей за допомогою нейронних мереж.....	11
<i>Сліпчук А.М., Яким Р.С.</i> Дослідження міцності спряження «комбінований зубок – шарошка» бурових доліт на прикладі 3-D моделі	15
<i>Мельник М.С., Антоненко Я.С.</i> Дослідницький комплекс для контролю якості зварних станин важких верстатів.....	21
<i>Полянський В.И.</i> Повышение эффективности технологии механической обработки формующей оснастки для макаронной и кондитерской отраслей промышленности.....	29
<i>Клименко Г.П., Васильченко Я.В., Шаповалов М.В.</i> Качество и надежность эксплуатации сборных твердосплавных инструментов	34
<i>Костюк Г.И., Семенов О.Д.</i> Влияния способа задания теплофизических и термомеханических характеристик твердого сплава в3 на характер и эффективность образования наноструктур.....	39
<i>Музичка Д. Г.</i> Дослідження працездатності шліфувальних кругів при обробці твердих сплавів.....	46
<i>Єнікєєв О. Ф. , Євсюкова Ф. М., Приходько О. Ю. , Набока О. В.</i> Аналіз частотних характеристик системи керування продуктивністю технологічного процесу алмазного шліфування.....	53
<i>Костюк Г.И., Евсеенкова А.В.</i> Эффективное фрезерование титанового сплава вт22 режущим инструментом из модифицированного твёрдого сплава вк10 с покрытием 0,18HFNT0,82ZRN	57
<i>Степанов М.С., Иванова М.С., Басова Е.В., Слипченко С.Е., Котляр А.В.</i> Техничко-экономические показатели эффективности технологии обработки отверстий с применением комбинированного осевого инструмента.....	62
<i>Шелковой А.Н., Пермяков А.А., Клочко А.А., Басова Е.В., Перминов Е.В.</i> Глобальный метод повышения эффективности эксплуатации цилиндрических и конических зубчатых передач.....	67
<i>Веселовська Н.Р., Скоркін О.А., Котляр О.В., Клочко Ю.О., Старченко О.П.</i> Інформаційний фонд релевантності конструкторсько-технологічних видів крупногабаритних з'єднань для передачі крутного моменту	77

CONTENTS

Ivanov V., Dehtiarov I., Zaloga V., Basova Y. Experimental studies of machining accuracy of levers.....	3
Kovalevskyy S.V., Kovalevska O.S. Actualization of expert models with the help of neural networks.....	11
Slipchuk A.M., Jakym R.S. Research of strength in connection «combined tungsten carbide inset cutter - cone» of roller cone drill bit for example 3-D model.....	15
Melnyk M.S., Antonenko Ya.S. Research complex to control the quality of welded bed of heavy machine-tools.....	21
Polyansky V.I. Improving the efficiency of mechanical treatment technology forming machine for pasta and confectionery industry industries.....	29
Klymenko G. P., Vasilchenko Y.V., Shapovalov M.V. Quality and reliability of operation of assembly of solid-molding tools.....	34
Kostyuk G. I., Semenenko O.D. Influence of the method of the task of the thermophysical and thermomechanical characteristics of solid b3 alloy on the character and efficiency of formation of nanostructures.....	39
Muzychka D. G. Performance research of grinding wheels in cemented carbide compositions machining.....	46
Yenikieiev A., Yevsiukova F., Prihodko O., Naboka O. Analysis of the frequency characteristics of the performance management system of the diamond grinding process.....	53
Kostyuk G. I., Evseenkova A.V. Effective milling of titanium alloy vt22 with a cutting tool from a modified carbide bk10 with a coating of 0.18HFNT0.82ZRN.....	57
Stepanov M., Ivanova M., Basova Ye., Slipchenko S., Kotliar A. Technical and economic indicators of the efficiency of the technology of hole-making processes by a combined axial tool.....	62
Shelkovoy A.N., Permyakov A.A., Klochko A.A., Basova Ye., Perminov E.V. Global method to improve operational efficiency cylindrical and conical gears.....	67
Veselovskaya N.R., Skorkin A.O., Kotlyar A.V., Klochko YA., Starchenko E.P. Information supply fund of relevanting constructive technological technology types of large-sized means to transfer the tight moment.....	77

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

ВІСНИК НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ «ХП».
СЕРІЯ: ТЕХНОЛОГІЇ В МАШИНОБУДУВАННІ

Збірник наукових праць

№ 34 (1310) 2018

Наукові редактори: Пермяков О.А., д-р техн. наук, професор, НТУ «ХП», Україна
Клочко О. О., д-р техн. наук, професор, НТУ «ХП», Україна
Технічний редактор: Басова Є.В., канд. техн. наук, НТУ «ХП», Україна

Відповідальний за випуск Обухова І. Б., канд. техн. наук

АДРЕСА РЕДКОЛЕГІЇ: 61002, Харків, вул. Кирпичова, 2, НТУ «ХП».
Кафедра технології машинобудування та металорізальних верстатів.
Тел.: (057) 707-66-25; e-mail: e.v.basova.khpi@gmail.com.

Обл.-вид № ____–____.

Підп. до друку __.2018 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. № 301133. Ціна договірна.

Видавець і виготовлювач

Видавничий центр НТУ «ХП». Свідоцтво про державну реєстрацію суб'єкта видавничої справи
ДК № 5478 від 21.08.2017 р.
61002, Харків, вул. Кирпичова, 2

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